

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA MECÂNICA

**INCERTEZAS DA DETERMINAÇÃO DE POTÊNCIA SONORA EM CÂMARAS
REVERBERANTES PELO MÉTODO DIRETO**

Tese submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS AURÉLIO PEDROSO

Florianópolis, dezembro de 2006.

Marcos Aurélio Pedroso: Formado em Engenharia Elétrica em 1999 pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestrado em Metrologia defendido em fevereiro de 2002 (UFSC – Labmetro); título da dissertação: “Aspectos Metrológicos da Calibração de Audiômetros”. Artigo científico sobre este tema escrito para a revista *Metrologia* (França): “*Uncertainty in Audiometer Calibration*”, dentre outros trabalhos.

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

INCERTEZAS DA DETERMINAÇÃO DE POTÊNCIA SONORA EM CÂMARAS
REVERBERANTES PELO MÉTODO DIRETO

MARCOS AURÉLIO PEDROSO

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D.
Orientador e Presidente da banca examinadora

Prof. Fernando Cabral, Ph.D. – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alcir de Faro Orlando, Ph.D.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.Eng.

Prof. Roberto Jordan, Dr.Eng.

Marco Antonio Nabuco de Araujo, D.Sc.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas, alunos, funcionários administrativos e professores do LVA-UFSC;

A Felipe Eugênio Kich Gontijo pelo apoio em diversos momentos nestes últimos anos;

Aos meus familiares, especialmente aos pais;

A Marco Antônio Nabuco de Araújo, pelo apoio direto ao andamento dos trabalhos técnicos;

E a Paulo Massarani pela ajuda técnica no LAENA-INMETRO.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS	XII
SIMBOLOGIA	XVII
RESUMO.....	XX
ABSTRACT.....	XXI
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 ASPECTOS E DIRETRIZES GERAIS DOS CÁLCULOS DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	6
2.1.1 <i>A questão da incerteza de medição nas normas internacionais.....</i>	9
2.1.1.1 Política do ISO/TC 43 “Acústica” e ISO/TC 43/SC 1 “Ruído” com respeito à incerteza de medição.....	9
2.1.1.2 Tratamento de incertezas de medição em normas na área de acústica, (documento adotado: ISO/TC 43 N 1023, junho de 2004).....	10
2.1.1.3 Comentários adicionais sobre o documento ISO/TC 43 N 1023.....	12
2.1.1.4 Desenvolvimento atual do projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741.....	13
2.1.2 <i>Conceitos do Guia para a Expressão de Incerteza de Medição, ISO GUIA.....</i>	22
2.1.2.1 A questão do mensurando caracterizado por “valor único”.....	23
2.1.2.2 A expressão “incerteza da incerteza”.....	25
2.1.2.3 A questão da correlação entre grandezas de entrada.....	26
2.1.3 <i>Abordagens para avaliação de incertezas de medição em laboratórios de ensaio.....</i>	28
2.1.3.1 Abordagem através de modelo matemático.....	32
2.1.3.2 Comentários sobre as abordagens de avaliações de incertezas.....	32
2.2 MODELOS DE CÁLCULOS DE INCERTEZAS EM DETERMINAÇÕES DE NÍVEIS DE POTÊNCIA SONORA	33
2.2.1 <i>Influências das posições de fonte de ruído na incerteza dos níveis de potência sonora.....</i>	36
2.2.2 <i>Intercomparação laboratorial de potência sonora.....</i>	41
2.3 ESTIMATIVAS DE INCERTEZAS PADRÃO E DESVIO PADRÃO EXPERIMENTAIS.....	44
2.4 DESEMPENHO DE CÂMARAS REVERBERANTES	47
2.5 FONTES SONORAS.....	48
CAPÍTULO 3 DETERMINAÇÃO DE NÍVEIS DE POTÊNCIA SONORA EM CÂMARAS REVERBERANTES.....	51
3.1 NECESSIDADE DE CORREÇÕES ATUALMENTE APLICADAS NO CÁLCULO DE NÍVEIS DE POTÊNCIA SONORA	53
3.2 EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA OS CÁLCULOS DE NÍVEIS DE POTÊNCIA SONORA	55
CAPÍTULO 4 ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE POTÊNCIA SONORA COM FONTE SONORA BK 4204 DO LVA-UFSC.....	59
4.1 MEDIÇÕES COM FONTE SONORA BK 4204 NO LVA-UFSC.....	60
4.1.1 <i>Equipamentos e métodos de medição utilizados no LVA-UFSC.....</i>	61
4.1.1.1 Correções das respostas dos microfones de medição	66
4.1.1.2 Câmaras reverberantes utilizadas no LVA-UFSC.....	76
4.1.2 <i>Métodos de cálculos usados para estimar as incertezas</i>	81
4.1.3 <i>Resultados experimentais e incertezas de medição obtidos com a fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m³ do LVA-UFSC.....</i>	84
4.1.3.1 Primeira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, câmara 2 (193 m ³).....	85
4.1.3.2 Segunda bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, câmara de 193 m ³	101
4.1.3.3 Terceira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, câmara de 193 m ³	109
4.1.3.4 Quarta bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, câmara de 193 m ³	115
4.1.4 <i>Resultados experimentais e incertezas de medição obtidos com a fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC.....</i>	121
4.1.4.1 Primeira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 145 m ³	121
4.1.4.2 Segunda bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 145 m ³	134
4.1.5 <i>Resultados experimentais obtidos com a fonte sonora BK 4204 na câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC</i>	139
4.1.5.1 Comparação dos resultados obtidos nas câmaras reverberantes e semi-aneecóica do LVA-UFSC.....	140
4.1.6 <i>Investigações adicionais nos ensaios de determinação de níveis de potência sonora</i>	143
4.1.6.1 Medições com dois microfones próximos e afastados, investigações das curvas de respostas em frequência e da difusividade da câmara reverberante de 145 m ³	143
4.1.6.2 Comparação entre os níveis de potência sonora calculados usando os tempos de reverberação T ₁₅ e T ₂₀	147

4.1.7 Resultados antigos de determinação de potência sonora obtidos com fonte sonora BK 4204 no LVA-UFSC.....	152
4.2 MEDIÇÕES COM FONTE SONORA DE REFERÊNCIA BK 4204 NO LAENA-INMETRO	154
4.2.1 Equipamentos e métodos de medição utilizados no LAENA-INMETRO.....	154
4.2.1.1 Correções das curvas de respostas dos microfones	155
4.2.1.2 Câmara reverberante utilizada no LAENA-INMETRO	157
4.2.2 Métodos de cálculos usados para estimar as incertezas	157
4.2.3 Resultados experimentais e incertezas de medição obtidos com a fonte sonora BK 4204 no LAENA-INMETRO.....	158
4.2.3.1 Medição dos níveis de pressão sonora, câmara reverberante do LAENA-INMETRO.....	159
4.2.3.2 Medição dos tempos de reverberação, câmara do LAENA-INMETRO.....	160
4.2.3.3 Níveis de potência sonora calculados no LAENA-INMETRO	161
4.2.3.4 Detalhamento das estimativas de fontes de incertezas.....	162
4.2.3.5 Balanços de incertezas por bandas de terço de oitava, fonte sonora BK 4204 no LAENA-INMETRO.....	166
4.2.3.6 Balanços das incertezas globais considerando os desvios padrão experimentais, e os desvios padrão experimentais da média.....	168
4.3 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E INCERTEZAS DE MEDIÇÃO OBTIDAS COM A FONTE SONORA DE REFERÊNCIA BK 4204.....	174
CAPÍTULO 5 ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE POTÊNCIA SONORA COM OUTRAS FONTES....	179
5.1 MEDIÇÕES COM A FONTE SONORA VIBRANIHIL.....	180
5.1.1 Equipamentos e métodos de medição.....	181
5.1.2 Ensaio com fonte Vibranihil na câmara reverberante de 83 m ³ do LVA-UFSC.....	184
5.1.3 Resultados experimentais obtidos com a fonte sonora Vibranihil.....	185
5.1.4 Cálculos de incertezas dos ensaios com fonte sonora Vibranihil nas câmaras reverberantes LVA-UFSC	191
5.1.4.1 Investigação das fontes de incertezas predominantes, fonte sonora Vibranihil ensaiada na câmara reverberante de 193 m ³	192
5.1.4.2 Investigação das fontes de incertezas predominantes, fonte sonora Vibranihil na câmara de 145 m ³	202
5.1.4.3 Investigações de problemas ocorridos na obtenção dos tempos de reverberação a partir das curvas de decaimento.....	209
5.1.5 Análise comparativa geral dos resultados, fonte sonora Vibranihil.....	211
5.2 ENSAIOS COM SECADOR DE CABELO.....	215
5.2.1 Resultados experimentais obtidos com secador de cabelo.....	215
5.2.2 Os cálculos de incertezas e as estimativas das fontes de incertezas, secador de cabelo ensaiado nas câmaras reverberantes do LVA.....	218
5.2.3 Análise comparativa dos resultados, secador de cabelo	226
5.3 ENSAIOS COM LIQUIDIFICADOR.....	228
5.3.1 Resultados experimentais obtidos nos testes com liquidificador	229
5.3.2 Cálculos de incertezas dos ensaios com liquidificador nas câmaras reverberantes do LVA	232
5.3.3 Análise comparativa geral dos resultados, liquidificador.....	239
5.4 ANÁLISE DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO CALCULADAS.....	242
CAPÍTULO 6 OS MODELOS DE CÁLCULOS DE INCERTEZAS	244
6.1 AS FONTES DE INCERTEZAS.....	245
6.2 MODELO DE CÁLCULO DE INCERTEZAS BASEADO NO ISO GUM.....	249
6.2.1 Estimativas de incertezas baseadas nos níveis de potência sonora obtidos experimentalmente e combinados como variáveis não correlacionadas.....	253
6.3 OS COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE.....	256
6.3.1 Coeficientes de sensibilidade calculados para as bandas de terço de oitava.....	260
6.4 PROCEDIMENTOS DE COMBINAÇÕES DE INCERTEZAS.....	262
6.4.1 Correlações entre as bandas de terço de oitava.....	264
6.4.2 Comparações entre resultados de cálculos de incertezas globais obtidas por procedimentos de combinações distintos.....	265
6.5 COMENTÁRIOS SOBRE OS MODELOS DE CÁLCULOS DE INCERTEZAS.....	267
7 CONCLUSÕES.....	269
REFERÊNCIAS	274
APÊNDICE 1.....	278

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração da lei de propagação de incertezas. Fonte: PRIEL 2005	29
Figura 2 - Ilustração da lei de propagação de distribuições. Fonte: PRIEL 2005	30
Figura 3 - Diagrama ilustrativo dos métodos de avaliação de incertezas em laboratórios. Fonte: PRIEL 2005.....	31
Figura 4 - Incertezas padrão de cada variável independente; em medições de fonte sonora de referência. Incertezas padrão dos L_p medidos, dos L_p de ruído de fundo, dos L_p de L_w da fonte sonora de referência (RSS). Fonte: BESSAC e BLANQUART, 2005	36
Figura 5 - Níveis de potência sonora do “chiller 1” (unidade condicionadora de ar), e suas incertezas estimadas; gráfico com duas coordenadas para Y. Normas XP ENV 12102 e ISO 3741. Fonte: BESSAC e BLANQUART, 2005.....	38
Figura 6 - Incertezas expandidas estimadas no CETIAT (França) para aparelhos condicionadores de ar (chillers) em câmara reverberante. Normas XP ENV 12102 e ISO 3741. Fonte: BESSAC e BLANQUART 2005.....	38
Figura 7 - Influência do parâmetro “posição de fonte sonora”, utilizando fonte sonora padrão de referência (“RSS – reference sound source”). CETIAT (França). Fonte: BESSAC e BLANQUART 2005.....	39
Figura 8 - Desvios padrão de resultados experimentais obtidos por (EBBING e MALING, 1973). Qualificação de câmara reverberante; seis posições de microfone, uma e duas posições de fonte sonora. Com base em norma ANS S1.21. Fonte: JASA 54(4), p.947, 1973.....	46
Figura 9 - Influência da velocidade de rotação de fonte sonora de referência aerodinâmica modelo BK 4204 sobre o nível de potência sonora emitido pela fonte sonora. FONTE: Brüel & Kjær	49
Figura 10 - Analogia hidráulica da estabilização do nível de energia acústica em câmara reverberante excitada por uma fonte sonora. Adaptado de FAHY (2001).....	51
Figura 11 - Níveis de pressão sonora (NPS ou L_p) medidos em bandas de terço de oitava de 12,5 Hz a 20 kHz com microfone de uma polegada. Níveis com ponderação A em dB(A), e sem ponderação em dB. Próximo a um condicionador de ar no LVA-UFSC. Analisador de sinais Larson Davis 824.....	52
Figura 12 - Curva de decaimento medida com auxílio do analisador de sinais Pulse 3560-C e software Pulse Labshop de Brüel & Kjær.	53
Figura 13 - Comparações dos níveis de potência sonora irradiados por uma fonte sonora, em câmara reverberante e em campo livre. Fonte: MALING, G. (JASA, 1967, p.860).....	54
Figura 14 - Espectros de níveis de potência sonora típicos de fontes sonoras modelo BK 4204. FONTE: Brüel & Kjær.....	61
Figura 15 – Diagrama simplificado do procedimento de determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto.....	62
Figura 16 - Analisador dinâmico de sinais Pulse 3560-C e diagrama de possibilidades de conexão a um microcomputador (PC) através de cabo de rede local; LAN (Local Area Network). Foram usados apenas o módulo 3560-C (foto à esquerda) e microcomputador. FONTE: Brüel & Kjær.....	63
Figura 17 - Foto de fonte sonora eletroacústica BK 4205 e seu sistema com alto-falante HP1001. FONTE: Brüel & Kjær.....	64
Figura 18 - À esquerda: Elementos básicos de um microfone de medição capacitivo: grade de proteção (protection grid), membrana metálica (diaphragm), placa traseira (backplate), invólucro (casing) e isolador elétrico (insulator). À direita: Foto de microfone capacitivo de meia polegada de diâmetro FONTES: Per Rasmussen, Acoustic Measurement , CRC Press LLC, 2000. E catálogo G.R.A.S. Sound & Vibration.....	64
Figura 19 - Diagramas de coordenadas para medições práticas de sensibilidade de microfones baseadas em campo livre, com objetivo de calcular a sensibilidade em campo de incidência aleatória. FONTE: IEC 1183:1994 – Capítulo 4 e Anexo A.	68
Figura 20 - Características típicas de direcionalidade de microfones de meia polegada, normalizadas para zero grau de incidência. Sensibilidade atinge cerca -5 dB entre 90° e 270° para frequência de 10 kHz. FONTE: Microphone Handbook, Brüel & Kjær.....	68
Figura 21 - Microfones modelos 4160 e 4180, de uma polegada e meia polegada, respectivamente. Com anéis adaptadores e membranas metálicas expostas (a esquerda). Gráfico com curvas típicas relativas às respostas de microfones de uma polegada, meia polegada e um quarto de polegada (a direita). Em altas frequências há forte dependência da resposta em função do diâmetro do microfone. FONTE: Brüel & Kjær.....	69

Figura 22 - Esboço de configuração de câmara reverberante para o ensaio de calibração de microfones baseado em medições em campo sonoro difuso, incidência aleatória, segundo norma IEC 1183:1994. “Boom rotate” faz com que o microfone gire em trajeto circular durante medições. É recomendado o uso de duas fontes sonoras para aumentar a difusão (difusividade) do campo sonoro dentro da câmara.	72
Figura 23 - Níveis de pressão sonora obtidos em ensaio de direcionalidade com microfone modelo GRAS 40AE em câmara semi-aneóica LVA-UFSC.	74
Figura 24 - Gráfico de curva de resposta em campo sonoro livre, incidência 0°, do microfone marca GRAS modelo 40AE número de série 34581 fornecido no certificado do fabricante. Curva superior é a resposta em campo livre; curva inferior é atribuída à resposta em campo de pressão obtida com atuador eletrostático. FONTE: G.R.A.S. Sound & Vibration, Dinamarca.	74
Figura 25 - Gráfico de curva de resposta em campo sonoro livre, incidência 0°, do microfone marca GRAS modelo 40AE número de série 34583 fornecido no certificado do fabricante. Curva superior é a resposta em campo livre; curva inferior é atribuída à resposta em campo de pressão obtida com atuador eletrostático. FONTE: G.R.A.S. Sound & Vibration, Dinamarca.	75
Figura 26 - Fotos das câmaras reverberantes de 145 m ³ e 193 m ³ , câmara 1 e 2, LVA-UFSC: (a) porta acústica para o exterior da câmara (à esquerda) e um painel de absorção sonora; (b) portas acústicas entre as duas câmaras reverberantes; de 145 m ³ e 193 m ³ . (c) porta acústica para o lado exterior, câmara de 145 m ³ ; (d) Portas acústicas entre as duas câmaras reverberantes (vista da câmara de 145 m ³), fonte sonora Vibranihil ao centro, e difusor acústico no canto acima; (e) três painéis de absorção sonora e fonte Vibranihil na câmara de 193 m ³ nominal; (f) Fonte sonora eletroacústica BK 4241 “dodecaedro” e difusores acústicos acima, câmara de 145 m ³	77
Figura 27 - Esboço das dimensões da câmara 2 (193 m ³) do LVA-UFSC. Largura e comprimento apenas, sem as dimensões de altura. Além das dimensões principais, há um volume de 5,10 . 0,35 . 2,00 que foi computado no volume total da câmara 2.	78
Figura 28 - Gráfico de barras representando as contribuições de cada fonte de incerteza nas bandas de terço de oitava. Valores de incertezas padrão ao quadrado. Fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC, fevereiro 2005.	99
Figura 29 - Gráfico de barras representando as contribuições de incertezas, em dB ² , com relação à incerteza do nível de potência sonora global L _{WA} , em dB(A). Fonte sonora BK 4204; câmara reverberante de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC, fevereiro 2005.	100
Figura 30 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u _c ² , em dB ² , calculadas para cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC (2ª bateria de ensaios), julho 2005.	108
Figura 31 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Fonte sonora BK 4204 sob teste na câmara reverberante de 193 m ³ do LVA-UFSC (2ª bateria de ensaios), julho 2005.	108
Figura 32 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u _c ² , em dB ² , calculadas para cada banda de terço de oitava. Microfones 1 e 2. Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara de 193 m ³ (3ª bateria de ensaios), LVA-UFSC agosto 2005.	114
Figura 33 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza dos dois níveis de potência sonora global em dB(A). Microfones 1 e 2, (dois canais de medição). Fonte sonora BK 4204 sob teste na câmara reverberante de 193 m ³ (3ª bateria de ensaios), LVA-UFSC, agosto 2005.	114
Figura 34 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u _c ² , em dB ² , calculadas para o nível de potência sonora de cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 (4ª bateria de ensaios) na câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC, novembro 2005.	120
Figura 35 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Fonte sonora BK 4204 sob teste (4ª bateria de ensaios) na câmara reverberante de 193 m ³ do LVA-UFSC, novembro 2005.	120
Figura 36 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u _c ² , em dB ² , calculadas para os níveis de potência sonora de cada banda de terço de oitava. Microfones 1 e 2 em separado. Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara de 145 m ³ do LVA-UFSC, agosto 2005.	133
Figura 37 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza dos dois níveis de potência sonora global em dB(A). Microfones 1 e 2 em separado, (dois canais de medição). Fonte sonora BK 4204 sob teste na câmara reverberante de 145 m ³ do LVA-UFSC, agosto 2005.	133
Figura 38 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u _c ² , em dB ² , calculadas para os níveis de potência sonora de cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara de 145 m ³ do LVA-UFSC, novembro 2005.	138

Figura 39 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Fonte sonora BK 4204 sob teste na câmara reverberante de 145 m ³ do LVA-UFSC, novembro 2005.	139
Figura 40 - Gráfico de barras. Comparações entre os níveis de potência sonora obtidos nas câmaras acústicas do LVA-UFSC com a fonte sonora BK 4204: câmara semi-aneecóica e câmaras reverberantes de 145 e 193 m ³ . Barras de erros representam as estimativas de incertezas expandidas $U_{95\%}$. <i>LWA</i> global em dB(A). Medições em novembro de 2005.	141
Figura 41 - Representação gráfica dos níveis de potência sonora globais em dB e dB(A), e respectivas incertezas expandidas, obtidos com a fonte BK 4204 em câmaras acústicas do LVA-UFSC. Câmaras 1 e 2 são as reverberantes de 145 e 193 m ³ , e câmara 3 representa a câmara semi-aneecóica. Novembro 2005.	142
Figura 42 - Gráfico de barras. Diferenças dos níveis de pressão sonora, L_p em dB, de dois canais de medição. Medições simultâneas com microfones separados, e microfones “juntos” (distância de 1 a 4 cm). Total de 15 medições, em 30 posições de microfones. Câmara reverberante de 145 m ³ , LVA-UFSC, agosto 2005.	144
Figura 43 - Gráfico de barras. Diferenças dos níveis de pressão sonora, L_p em dB, de dois canais de medição (simultâneos). Três medições consecutivas com os dois microfones próximos; “juntos” (distância de 1 a 4 cm). Câmara reverberante de 145 m ³ , LVA-UFSC, agosto 2005.	145
Figura 44 - Gráfico de barras. Diferenças dos níveis de pressão sonora, L_p em dB, de dois canais de medição (simultâneos). Três medições consecutivas com os dois microfones separados (distância mínima de 2 m). Câmara reverberante de 145 m ³ , LVA-UFSC, agosto 2005.	146
Figura 45 - Esboço dos arranjos de posições de dois microfones. A área retangular representa o piso da câmara reverberante de 145 m ³ do LVA. “Lp1” a “Lp3” esboçam as posições referentes às três primeiras medições com os microfones de ambos os canais afastados.	146
Figura 46 - Curvas de decaimentos das bandas de 250 Hz e 1600 Hz obtidas em fevereiro de 2005 na câmara reverberante de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC. Ajustes “manuais” das faixas de avaliação dos decaimentos para obtenção dos tempos de reverberação T_{15}	148
Figura 47 - Comparação entre os tempos de reverberação T_{15} , T_{20} e T_{30} obtidos a partir do mesmo conjunto de curvas de decaimentos. Câmara reverberante de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC, fevereiro de 2005.	149
Figura 48 - Gráfico de barras dos tempos de reverberação T_{20} e T_{30} obtidos através do mesmo conjunto de curvas de decaimentos, e através do método de integração reversa. Uso do Software Pulse Labshop 9.0 para obtenção dos valores. Câmara reverberante de 193 m ³ nominal, fevereiro de 2005.	150
Figura 49 - Gráfico de barras dos tempos de reverberação T_{20} e T_{30} obtidos pelo método da interrupção do ruído. Avaliação dos decaimentos através de mínimos quadrados. Câmara reverberante de 193 m ³ , com cinco painéis de absorção sonora, fevereiro de 2005.	151
Figura 50 - Gráfico de barras; comparativo entre os níveis de potência sonora, em dB, calculados a partir dos valores dos tempos de reverberação T_{15} , T_{20} e T_{30} e os mesmos níveis de pressão sonora L_p . Câmara reverberante de 193 m ³ LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204, fevereiro de 2005.	152
Figura 51 - Gráfico de barras. Comparações entre os níveis de potência sonora, em dB(A), obtidos nas câmaras acústicas do LVA-UFSC com a fonte sonora BK 4204 no ano de 2001, e valores fornecidos pelo fabricante da fonte sonora. Antiga câmara reverberante de 140 m ³ nominal e câmara semi-aneecóica.	154
Figura 52 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas por bandas de terço de oitava, calculadas com base nos desvios padrão experimentais de L_p e de T_{15} . Valores expressos como incertezas padrão ao quadrado, em dB ² . Fonte sonora BK 4204, câmara reverberante de 197 m ³ do LAENA-INMETRO, outubro 2005.	170
Figura 53 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas relativas a cada banda de terço de oitava, calculadas com base nos desvios padrão experimentais da média de L_p e de T_{15} . Valores expressos como incertezas padrão ao quadrado, em dB ² . Fonte sonora BK 4204, câmara reverberante de 197 m ³ do LAENA-INMETRO, outubro 2005.	171
Figura 54 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Incertezas calculadas com base nos desvios padrão experimentais de L_p e de T_{15} . Fonte sonora BK 4204, câmara reverberante de 197 m ³ do LAENA-INMETRO, outubro 2005. ...	172
Figura 55 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Incertezas calculadas com base nos desvios padrão experimentais da média de L_p e de T_{15} . Fonte sonora BK 4204, câmara reverberante de 197 m ³ do LAENA-INMETRO, outubro 2005.	172
Figura 56 - Níveis de potência sonora globais em dB e em dB(A) determinados na câmara reverberante de 197 m ³ (também denominada “Câmara 4”, LAENA-INMETRO). Incertezas expandidas U_{c1} calculadas com base em desvios padrão experimentais, e U_{c2} com base em desvios padrão experimentais da média (de L_p e de T_{15}). (U_{c1} + Deriva) considera a deriva do calibrador de nível sonoro no cálculo. Ensaio 1 (out/05), ensaio 2 (nov/05).	174

Figura 57 - Comparativo geral dos resultados obtidos em ensaios com a fonte sonora BK 4204 do LVA. Ensaio no LAENA-INMETRO, no LVA-UFSC, e valores do fabricante; Brüel & Kjær. Curvas gaussianas ilustrando distribuições de probabilidades relativas às incertezas calculadas sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro .	176
Figura 58 - Comparativo geral dos resultados obtidos em ensaios com a fonte sonora BK 4204 do LVA. Ensaio no LAENA-INMETRO, no LVA-UFSC, e valores do fabricante; Brüel & Kjær. Curvas gaussianas ilustram as distribuições de probabilidades relativas às incertezas calculadas considerando a deriva dos calibradores de nível sonoro .	176
Figura 59 - Foto da fonte sonora Vibranihil na câmara de 83 m ³ do LVA-UFSC; ao centro abaixo. Também caixas acústicas e painel com espumas de absorção sonora; aos fundos e acima.	182
Figura 60 - Níveis de potência sonora em gráfico de barras. Comparativo de resultados entre dois ensaios de potência sonora com protótipo de fonte sonora Vibranihil na câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC.	186
Figura 61 - Níveis de potência sonora em dB(A). Comparativo de resultados de quatro ensaios de potência sonora com protótipo de fonte sonora Vibranihil em câmaras acústicas distintas. Em duas câmaras reverberantes e uma câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC. Barras de erros representam os desvios padrão dos resultados dos quatro ensaios, por banda de frequência e valores globais.	189
Figura 62 - Gráfico de barras representando as contribuições de cada fonte de incerteza nas bandas de terço de oitava. Valores de incertezas padrão ao quadrado. Fonte sonora Vibranihil na câmara reverberante de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC.	200
Figura 63 - Gráfico de barras representando as contribuições de incertezas, em dB ² , com relação à incerteza do nível de potência sonora global L _{WA} , em dB(A). Fonte sonora Vibranihil; câmara reverberante de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC.	201
Figura 64 - Gráfico de barras representando as contribuições de cada fonte de incerteza nas bandas de terço de oitava. Valores de incertezas padrão ao quadrado. Fonte sonora Vibranihil na câmara reverberante de 145 m ³ nominal do LVA-UFSC.	208
Figura 65 - Gráfico de barras representando as contribuições de incertezas, em dB ² , com relação à incerteza do nível de potência sonora global L _{WA} , em dB(A). Fonte sonora Vibranihil; câmara reverberante de 145 m ³ nominal do LVA-UFSC.	208
Figura 66 - Exemplo de curva de decaimento obtida experimentalmente através médias de cinco medições repetitivas, usando o método de interrupção de ruído. Avaliação do decaimento correta . Banda de terço de oitava de 10 kHz. Câmara reverberante LVA-UFSC, software Pulse Labshop de Brüel & Kjær.	210
Figura 67 - Exemplo de curva de decaimento obtida experimentalmente através médias de cinco medições repetitivas, usando o método de interrupção de ruído. Avaliação do decaimento incorreta . Banda de terço de oitava de 10 kHz. Câmara reverberante LVA-UFSC, software Pulse Labshop de Brüel & Kjær.	211
Figura 68 - Gráfico de barras dos níveis de potência sonora, em dB, da fonte Vibranihil determinados nas câmaras reverberantes de 145 e 193 m ³ do LVA-UFSC. Barras de erros representam $U = U_{95\%} = k \cdot u_c$, incertezas expandidas de cada banda de frequência; $k = 2,0$ e intervalo de confiança de aproximadamente 95 %. Incertezas calculadas a partir de medições de L _p e T ₂₀ , em condições de repetitividade, e outras fontes de incertezas.	212
Figura 69 - Níveis de potência sonora globais em dB e em dB(A) obtidos com fonte sonora Vibranihil nas câmaras 1, 2 e 3, câmaras reverberantes de 145 m ³ , 193 m ³ , e câmara semi-aneecóica (LVA-UFSC), respectivamente. Barras de erros representam incertezas calculadas.	213
Figura 70 - Gráfico de barras, comparativo de resultados obtidos nas câmaras reverberantes de 193 m ³ e 145 m ³ do LVA-UFSC, níveis de potência sonora de um modelo de secador de cabelo . Barras de erros representam as incertezas expandidas U _{95%} .	217
Figura 71 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u _c ² , em dB ² , calculadas para cada banda de terço de oitava. Secador de cabelo ensaiado na câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC.	224
Figura 72 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Secador de cabelo sob teste na câmara reverberante de 193 m ³ do LVA-UFSC.	225
Figura 73 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Secador de cabelo sob teste na câmara reverberante de 145 m ³ do LVA-UFSC.	225
Figura 74 - Gráfico comparativo entre resultados obtidos com secador de cabelo sob teste nas câmaras reverberantes de 145 m ³ e 193 m ³ do LVA-UFSC (Câmara 1 e 2). Níveis de potência sonora globais em dB e em dB(A), e barras de erro ilustrando as incertezas calculadas.	226
Figura 75 - Gráfico de barras; comparativo de resultados obtidos nas câmaras reverberantes de 193 m ³ e 145 m ³ do LVA-UFSC, níveis de potência sonora de um modelo de liquidificador (velocidade 2), em dB. Barras de erros representam as incertezas expandidas U _{95%} .	231

Figura 76 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para cada banda de terço de oitava. Liquidificador (na velocidade 2) ensaiado na câmara de 193 m^3 do LVA-UFSC.....	237
Figura 77 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para cada banda de terço de oitava. Liquidificador (na velocidade 2) ensaiado na câmara de 145 m^3 do LVA-UFSC.....	238
Figura 78 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A) . Liquidificador (na velocidade 2) sob teste na câmara reverberante de 193 m^3 do LVA-UFSC.....	238
Figura 79 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A) . Liquidificador, na velocidade 2 (máxima), sob teste na câmara reverberante de 145 m^3 do LVA-UFSC.....	239
Figura 80 - Gráfico comparativo entre resultados obtidos com liquidificador (velocidade máxima) sob teste nas câmaras reverberantes de 145 m^3 e 193 m^3 do LVA-UFSC (Câmara 1 e 2). Níveis de potência sonora globais em dB e dB(A) , e barras de erros representando as incertezas calculadas.....	240
Figura 81 - Validação do cálculo do coeficiente de sensibilidade de tempo de reverberação, c_2 , para a frequência de 1000 Hz , e com dados do ensaio de novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m^3 do LVA.....	258
Figura 82 - Validação do cálculo do coeficiente de sensibilidade de volume da câmara reverberante, c_3 , para a frequência de 1000 Hz , e com dados do ensaio de novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m^3 do LVA-UFSC.....	259
Figura 83 - Validação do cálculo do coeficiente de sensibilidade de área de superfície, c_4 , para a frequência de 1000 Hz . Dados do ensaio realizado em novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m^3 do LVA-UFSC.	259
Figura 84 - Validação do cálculo do coeficiente de sensibilidade de temperatura, c_5 , para a frequência de 1000 Hz , e com dados do ensaio de novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m^3 do LVA.....	260
Figura 85 - Diagrama de blocos que representa o procedimento de combinações de incertezas padrão para cada j -ésima banda de terço de oitava. “Método 1 – Parte 1” no qual u_{cal} é combinada com incertezas da cadeia de medição u_{mic} e $u_{\text{analisador}}$	262
Figura 86 - Diagrama de blocos que esboça o procedimento de cálculo da incerteza “total” do nível de potência sonora global. As incertezas relativas às bandas de 100 Hz a 10 kHz são combinadas para obtenção da incerteza do nível de potência sonora global L_{WA} . “Método 1 – Parte 2”.....	263
Figura 87 - Diagrama de blocos que representa o procedimento de combinações de incertezas padrão para cada j -ésima banda de terço de oitava. “Método 2 – Parte 1” no qual u_{cal} não é combinada com incertezas padrão da cadeia de medição u_{mic} e $u_{\text{analisador}}$	263
Figura 88 - Diagrama de blocos que esboça o procedimento de cálculo da incerteza “total” do nível de potência sonora global. As incertezas relativas às bandas de 100 Hz a 10 kHz são combinadas para obtenção da incerteza do nível de potência sonora global L_{WA} . Incertezas padrão u_{cal} e $u_{L_{\text{WA}}}$ são combinadas por somatório quadrático. “Método 2 – Parte 2”.....	264
Figura 89 – Gráfico de barras dos níveis de potência sonora da comparação bilateral entre LAENA-INMETRO e LVA-UFSC. Barras de erros representam as incertezas expandidas. Fonte sonora BK4204, câmaras 4 e 2 são as reverberantes do LAENA e LVA (197 e 193 m^3), respectivamente. Ensaio em outubro/05 e novembro/05, respectivamente.....	270

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Estimativas de valores superiores (máximos) dos desvios padrão de reprodutibilidade de níveis de potência sonora determinados de acordo com ISO 3741 terceira edição de 1999, e para o projeto de revisão ISO/DIS 3741 de 2006, apenas os valores referentes às bandas de terço de oitava.	16
Tabela 2.2 - Do anexo G do projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 de 2006. Balanço de incerteza para determinações de níveis de potência sonora e níveis de energia sonora usando o método direto, válido para frequências de 500 Hz a 4 kHz, ou para medições ponderadas por “curva A” de uma fonte de ruído com espectro de frequência relativamente plano.....	19
Tabela 2.3 - Fatores de abrangência especificados em função do nível de confiança desejado segundo o projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 de 2006.	21
Tabela 2.4 - Desvios padrão máximos permitidos dos níveis de pressão sonora em testes de qualificação de câmaras reverberantes , relativo à fontes de ruído banda larga . Norma ISO 3741 (1999) anexo E, e projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006) anexo C que somente especifica os correspondentes às bandas de terço de oitava.....	22
Tabela 2.5 - Desvios padrão máximos permitidos dos níveis de pressão sonora , s_f , em testes de qualificação de câmaras reverberantes , relativo à fontes de ruído contendo componentes de frequências discretas consideráveis . Norma ISO 3741 (1999) anexo A, e projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006) anexo D que somente especifica os correspondentes às bandas de terço de oitava.	22
Tabela 2.6 - Influência do parâmetro “posição de microfones e de fonte de ruído / fonte sonora padrão de referência”, (cálculos baseados no mesmo espectro de níveis de potência sonora). Fonte: BESSAC e BLANQUART 2005.....	39
Tabela 2.7 - Desvios padrão, σ , e “limite de reprodutibilidade”, R, de calibrações de fontes sonoras de referência (modelo BK 4204). Dados calculados a partir da intercomparação de potência sonora na Europa em 1992 e 1993. FONTE: VORLÄNDER (PTB, 1993).	42
Tabela 2.8 - Média final dos resultados da intercomparação laboratorial de potência sonora com fontes sonoras modelo BK 4204. Somente resultados para câmaras reverberantes. Intercomparação dirigida por VORLÄNDER em 1992 e 1993.	43
Tabela 4.1 - Características de resposta em campo difuso de microfones tipo LS2aP segundo norma internacional IEC 61183 de 1994; também denominada IEC 1183. Adaptada da Tabela B.1 da norma.	72
Tabela 4.2 - Valores das correções aplicadas aos resultados brutos das medições de níveis de pressão sonora obtidos com microfones marca GRAS modelo 40AE, números de série 34581 e 34583. Valores foram estimados através de curvas de respostas em campo livre de certificados do fabricante.....	75
Tabela 4.3 - Parâmetros detalhando o cálculo de determinação dos níveis de potência sonora L_W . Câmara reverberante de 193 m ³ (câmara 2) do LVA-UFSC, 1ª bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, fevereiro 2005.....	87
Tabela 4.4 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora , L_p , 1ª bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m ³ (câmara 2) do LVA-UFSC, fevereiro 2005.....	89
Tabela 4.5 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC (1ª bateria de ensaios) fevereiro de 2005. As estimativas de incertezas X_{Trev} foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor d_{Trev} e incertezas padrão combinadas $u_{Trev}(L_W)$	91
Tabela 4.6 - Estimativas de incertezas padrão relativas ao volume da câmara reverberante, u_v . E estimativas de incertezas padrão, u_s , relativas à área da superfície interna da câmara reverberante de 193 m ³ do LVA-UFSC.....	92
Tabela 4.7 - Estimativas de Incertezas padrão relacionadas às variações de temperatura ambiente, estimadas em $\pm 2^\circ$ C, câmara reverberante de 193 m ³ do LVA-UFSC. E incertezas padrão estimadas (superestimadas) para as frequências centrais das bandas de terço de oitavas.....	94
Tabela 4.8 - Estimativa de incerteza padrão, u_B , (em dB), devido às variações da pressão atmosférica (pressão barométrica) em Pascal.	95
Tabela 4.9 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Primeira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m ³ (câmara 2), fevereiro de 2005, LVA-UFSC.	96
Tabela 4.10 - Valores do cálculo da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Primeira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m ³ (câmara 2) LVA-UFSC, fevereiro 2005.	98
Tabela 4.11 - Níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A). Incertezas expandidas $U_{95\%}$ estimadas para os L_{WA} em dB(A). Fonte sonora BK 4204 (2ª bateria de ensaios) ensaiada na câmara reverberante de 193 m ³ do LVA-UFSC. Julho de 2005.	102

Tabela 4.12 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 (2ª bateria de ensaios) julho 2005.	103
Tabela 4.13 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC em julho de 2005 (2ª bateria de ensaios). As estimativas de incertezas X_{Trev} foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor d_{Trev} e incertezas padrão combinada $u_{Trev}(L_W)$	104
Tabela 4.14 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 sob teste (2ª bateria de ensaios). Câmara de 193 m ³ LVA-UFSC, julho de 2005.	105
Tabela 4.15 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 sob teste (2ª bateria de ensaios), julho 2005.	106
Tabela 4.16 - Níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A). Incertezas expandidas $U_{95\%}$ estimadas para os L_{WA} em dB(A). Medições de L_p feitas em dois canais simultaneamente. Fonte sonora BK 4204 (3ª bateria de ensaios) na câmara reverberante de 193 m ³ do LVA-UFSC, agosto de 2005.	109
Tabela 4.17 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , sem considerar deriva do calibrador de nível sonoro. Dois canais (microfones) de medição simultâneos. Câmara reverberante de 193 m ³ do LVA-UFSC. Fonte sonora BK 4204 sob teste (3ª bateria de ensaios), agosto 2005.	110
Tabela 4.18 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava; para dois canais de medição de L_p . Fonte sonora BK 4204 sob teste. Câmara de 193 m ³ LVA-UFSC, (3ª bateria de ensaios) agosto de 2005.	111
Tabela 4.19 - Valores do cálculo das incertezas dos valores globais de níveis de potência sonora em dB(A), câmara de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 sob teste, (3ª bateria de ensaios); dois canais de microfones. Agosto 2005.	112
Tabela 4.20 - Níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A). Incertezas expandidas $U_{95\%}$ estimadas para os L_W em dB. Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara reverberante de 193 m ³ (4ª bateria de ensaios) LVA-UFSC. Novembro de 2005.	115
Tabela 4.21 - Incertezas padrão u_{Lp} calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC, (4ª bateria de ensaios) fonte sonora BK 4204, novembro 2005.	116
Tabela 4.22 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC (4ª bateria de ensaios), novembro de 2005. As estimativas de incertezas X_{Trev} foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor d_{Trev} e incertezas padrão combinada $u_{Trev}(L_W)$	117
Tabela 4.23 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 sob teste, câmara de 193 m ³ LVA-UFSC (4ª bateria de ensaios), novembro de 2005.	118
Tabela 4.24 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 sob teste (4ª bateria de ensaios), novembro 2005.	119
Tabela 4.25 - Parâmetros detalhando o cálculo de determinação dos níveis de potência sonora. Medições de L_p em dois canais distintos. Fonte sonora BK 4204 , 1ª bateria de ensaios na câmara reverberante de 145 m ³ (LVA-UFSC), agosto de 2005.	122
Tabela 4.26 - Incertezas padrão u_{Lp} calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , medidos em duas posições de microfones, (dois canais). Câmara de 145 m ³ do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 , agosto 2005.	124
Tabela 4.27 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 145 m ³ do LVA-UFSC em agosto de 2005. As estimativas de incertezas X_{Trev} foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor d_{Trev} e incertezas padrão combinadas $u_{Trev}(L_W)$	125
Tabela 4.28 - Estimativas de incertezas padrão relativas ao volume da câmara reverberante, u_v . E estimativas de incertezas padrão, u_s , relativas à área da superfície interna da câmara reverberante de 145 m ³ nominal do LVA-UFSC.	127
Tabela 4.29 - Estimativas de Incertezas padrão relacionadas às variações de temperatura ambiente, estimadas em $\pm 2^\circ C$, câmara reverberante de 145 m ³ nominal do LVA-UFSC. E incertezas padrão estimadas (superestimadas) para as frequências centrais das bandas de terço de oitavas.	128
Tabela 4.30 - Estimativa de incerteza padrão, u_B , (em dB), devido às variações da pressão atmosférica (pressão barométrica) em Pascal.	129
Tabela 4.31 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Dois canais de medição de L_p . Câmara reverberante de 145 m ³ , fonte sonora BK 4204, agosto de 2005, LVA-UFSC.	129

Tabela 4.32 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 145 m ³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 sob teste; dois canais de microfones. Agosto 2005.....	131
Tabela 4.33 - Níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A). Incertezas expandidas $U_{95\%}$ estimadas para os L_{WA} em dB(A). Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara reverberante de 145 m ³ do LVA-UFSC. Novembro de 2005.	134
Tabela 4.34 - Teste de conformidade entre resultados (parciais) dos ensaios realizados em agosto e novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m ³ do LVA-UFSC, com fonte sonora BK 4204. Somente bandas de 1000 a 2500 Hz e valor global em dB(A). “Ensaio 1” com microfone 1 em agosto; “ensaio 2” em novembro.	135
Tabela 4.35 - Teste de conformidade entre resultados (parciais) dos ensaios realizados em agosto e novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m ³ do LVA-UFSC, com fonte sonora BK 4204. Somente bandas de 1000 a 2500 Hz e valor global em dB(A). “Ensaio 1” com microfone 2 em agosto; “ensaio 2” em novembro.	135
Tabela 4.36 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p ; tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 145 m ³ (nominal) do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 , novembro 2005. Coeficientes de sensibilidade c_1 e c_2 , divisores d_{Lp} e d_{Trev} e incertezas padrão combinadas $u_{Lp}(L_w)$ e $u_{Trev}(L_w)$	136
Tabela 4.37 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 sob teste. Câmara de 145 m ³ LVA-UFSC, novembro de 2005.	137
Tabela 4.38 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 145 m ³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 sob teste, novembro 2005.	137
Tabela 4.39 - Níveis de pressão sonora médios em dB; níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A) obtidos com a fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara semi-anecóica do LVA-UFSC. Novembro de 2005.....	140
Tabela 4.40 - Níveis de potência sonora em dB(A) da fonte sonora BK 4204 obtidos em 2001 no LVA-UFSC (câmara reverberante <i>antes da reforma</i> (143,2 m ³) e câmara semi-anecóica), e valores fornecidos pelo fabricante; Brüel & Kjær.....	153
Tabela 4.41 - Balanço de incertezas para a cadeia de medição utilizada no LAENA-INMETRO para executar as medições de níveis de pressão sonora; outubro 2005.....	158
Tabela 4.42 - Níveis de pressão sonora L_p (corrigidos) e desvios padrão experimentais. Valores em dB. Medições com conjunto de seis microfones, quatro posições de fonte sonora BK 4204, total de 24 amostras. Câmara reverberante de 197 m ³ do LAENA-INMETRO; outubro 2005.	160
Tabela 4.43 - Tempos de reverberação, T_{15} em segundos, medidos na câmara do LAENA-INMETRO, seis microfones, três posições de fonte sonora eletroacústica, total de 18 amostras. Desvios padrão, desvios experimentais da média, e uma medição de T_{15} adicional. Outubro 2005.....	161
Tabela 4.44 - Níveis de potência sonora calculados a partir dos T_{15} e L_p medidos no LAENA-INMETRO. Valores de L_{WF} em dB; L_{WA} em dB(A), entre 100 Hz e 10 kHz. Medição extra L_w (04/nov.). Câmara reverberante de 197 m ³ , outubro e novembro de 2005.....	162
Tabela 4.45 - Estimativas das incertezas dos níveis de pressão sonora, $X_{Lp,1}$ e $X_{Lp,2}$, utilizando os desvios padrão e os desvios padrão experimental da média , provenientes dos valores medidos. Coeficiente de sensibilidade c_1 , divisor d_{Lp} , incertezas padrão u_{Lp} e estimativas dos números de graus de liberdade (G.L.). Câmara reverberante de 197 m ³ LAENA-INMETRO, outubro 2005.	163
Tabela 4.46 - Incertezas dos tempos de reverberação, $X_{Trev,1}$ e $X_{Trev,2}$, estimadas através dos desvios padrão e desvios padrão experimental da média , provenientes dos valores medidos. Coeficiente de sensibilidade c_2 , divisor d_{Trev} , e incertezas padrão. Câmara reverberante de 197 m ³ LAENA-INMETRO, outubro 2005.....	164
Tabela 4.47 - Estimativas de incertezas padrão relativas ao volume da câmara reverberante, u_v . E estimativas de incertezas padrão, u_s , relativas à área da superfície interna da câmara reverberante de 197 m ³ nominal do LAENA-INMETRO.	165
Tabela 4.48 - Incertezas padrão relacionadas às variações de temperatura ambiente, estimadas em 1° C, câmara reverberante de 197 m ³ nominal do LAENA-INMETRO. E incertezas padrão estimadas (superestimadas) para as frequências centrais das bandas de terço de oitavas.....	165
Tabela 4.49 - Estimativa de incerteza padrão, u_B , (em dB), devido às variações da pressão atmosférica (pressão barométrica) em Pascal. Coeficiente de sensibilidade c_6	166
Tabela 4.50 - Valores das fontes de incertezas no cálculo das incertezas padrão combinadas (u_c) de potência sonora em cada banda de terço de oitava. Com base nos desvios padrão experimentais de L_p e de T_{15} . Estimativas dos números de graus de liberdade (G.L.) e dos coeficientes t de student. Câmara de 197 m ³ , fonte sonora BK 4204. Outubro 2005, LAENA-INMETRO.	167

Tabela 4.51 - Valores das fontes de incertezas no cálculo das incertezas padrão combinadas (u_c) de potência sonora em cada banda de terço de oitava. Com base nos desvios padrão experimental da média de L_p e de T_{15} . Estimativas dos números de graus de liberdade (G.L.) e dos coeficientes t de student. Câmara de 197 m ³ , fonte sonora BK 4204. Outubro 2005, LAENA-INMETRO.....	167
Tabela 4.52 - Cálculo das incertezas do valor global de nível de potência sonora em dB(A), câmara reverberante de 197 m ³ do LAENA-INMETRO, outubro 2005. Duas abordagens de cálculo, uma considerando os desvios padrão experimentais de L_p e de T_{15} , e outra considera os desvios padrão experimentais da média de L_p e de T_{15}	169
Tabela 5.1 - Resultados referentes à qualificação da câmara de 83 m ³ , câmara de protetores auditivos do LVA-UFSC. Valores de desvios padrão de 19 medições em diferentes posições de microfone, e tolerâncias de qualificação segundo Anexo E da norma ISO 3741:1999.....	184
Tabela 5.2 - Valores dos níveis de potência sonora, L_{WA} , da fonte Vibranihil medidos nas câmaras acústicas do LVA-UFSC. Também valores de incertezas expandidas $U_{95\%}$ calculadas para as medições nas câmaras reverberantes; temperatura e pressão atmosférica durante os ensaios.....	188
Tabela 5.3 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , câmara de 193 m ³ (nominal) do LVA-UFSC, fonte sonora Vibranihil, novembro 2005.....	193
Tabela 5.4 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC em novembro de 2005. As estimativas de incertezas X_{Trev} foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor d_{Trev} e incertezas padrão combinada $u_{Trev}(L_W)$	195
Tabela 5.5 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Câmara de 193 m ³ , fonte sonora Vibranihil, novembro de 2005.....	196
Tabela 5.6 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de nível de potência sonora em dB(A). Câmara reverberante de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora Vibranihil, novembro 2005.....	199
Tabela 5.7 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , câmara de 145 m ³ (nominal) do LVA-UFSC, fonte sonora Vibranihil, novembro 2005.....	203
Tabela 5.8 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 145 m ³ do LVA-UFSC em novembro de 2005. O parâmetro x_{Trev} foi estimado a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor d_{Trev} e incertezas padrão combinada $u_{Trev}(L_W)$	204
Tabela 5.9 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Câmara de 145 m ³ , fonte sonora Vibranihil, novembro de 2005.....	205
Tabela 5.10 - Valores do cálculo de incerteza do valor global de nível de potência sonora em dB(A). Câmara reverberante de 145 m ³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora Vibranihil , novembro 2005.....	206
Tabela 5.11 - Análise da conformidade dos resultados das medições com fonte sonora Vibranihil . Incertezas expandidas, $U_{95\%}$, de ambas as câmaras reverberantes (193 e 145 m ³) foram somadas para avaliar a conformidade dos valores obtidos, em cada banda de terço de oitava e dos valores globais em dB(A).....	214
Tabela 5.12 - Valores dos níveis de potência sonora, L_{WA} , do secador de cabelo medidos em duas câmaras reverberantes do LVA-UFSC. Também valores de incertezas expandidas $U_{95\%}$ calculadas; temperatura e pressão atmosférica durante ensaios.....	216
Tabela 5.13 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , sem considerar deriva do calibrador de nível sonoro. Câmaras de 193 m ³ e 145 m ³ do LVA-UFSC. Secador de cabelo sob teste. Novembro de 2005.....	219
Tabela 5.14 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m ³ do LVA-UFSC em novembro de 2005. O parâmetro x_{Trev} foi estimado a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor d_{Trev} e incertezas padrão combinada $u_{Trev}(L_W)$. Avaliações incorretas de decaimentos não foram computadas nas bandas de 8 e 10 kHz.....	220
Tabela 5.15 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível de potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fator de abrangência adotado $k = 2,0$. Secador de cabelo sob teste. Câmara de 193 m ³ LVA-UFSC, novembro de 2005.....	221
Tabela 5.16 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível de potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fator de abrangência adotado $k = 2,0$. Secador de cabelo sob teste. Câmara reverberante de 145 m ³ LVA-UFSC, novembro de 2005.....	222
Tabela 5.17 - Valores do cálculo da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), câmara de 193 m ³ nominal do LVA-UFSC, secador de cabelo sob teste; novembro 2005.....	223
Tabela 5.18 - Valores do cálculo da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), câmara de 145 m ³ nominal do LVA-UFSC, secador de cabelo sob teste; novembro 2005.....	223

Tabela 5.19 - Análise da conformidade dos resultados das medições com secador de cabelo . Incertezas expandidas, $U_{95\%}$, de ambas as câmaras reverberantes foram somadas para avaliar a conformidade dos valores obtidos, em cada banda de terço de oitava e incertezas dos valores globais em dB(A).	227
Tabela 5.20 - Valores dos níveis de potência sonora, L_{WA} , do liquidificador, nas velocidades 1 e 2, medidos em duas câmaras reverberantes do LVA-UFSC. Também valores de incertezas expandidas $U_{95\%}$ calculadas, apenas para a “velocidade 2”; temperatura e pressão atmosférica durante ensaios.	230
Tabela 5.21 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro. Câmaras reverberantes de 193 m^3 e 145 m^3 do LVA-UFSC. Liquidificador sob teste (na velocidade 2). Novembro de 2005.	233
Tabela 5.22 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Liquidificador sob teste, na velocidade 2. Câmara de 193 m^3 LVA-UFSC, novembro de 2005.	234
Tabela 5.23 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Liquidificador sob teste, na velocidade 2. Câmara reverberante de 145 m^3 LVA-UFSC, novembro de 2005.	235
Tabela 5.24 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 193 m^3 nominal do LVA-UFSC, liquidificador sob teste, na velocidade 2, novembro 2005.	235
Tabela 5.25 - Valores do cálculo da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), câmara de 145 m^3 nominal do LVA-UFSC, liquidificador sob teste, na velocidade 2, novembro 2005.	236
Tabela 5.26 - Análise da conformidade dos resultados das medições com liquidificador, nas velocidades 1 e 2. Incertezas expandidas, $U_{95\%}$, de ambas as câmaras reverberantes foram somadas para avaliar a conformidade dos valores obtidos, em cada banda de terço de oitava e dos valores globais em dB(A).	241
Tabela 6.1 - Valores de fontes de incertezas (Tipo B) relacionadas com os equipamentos das cadeias de medição utilizados no LVA-UFSC e no LAENA-INMETRO. Estimativas foram usadas nos balanços de incertezas desenvolvidos nos Capítulos 4 e 5.	247
Tabela 6.3 - Cálculos de incertezas a partir de níveis de potência sonora L_W obtidos experimentalmente em ensaios no LVA-UFSC e LAENA-INMETRO. Considerando bandas de terço de oitava como grandezas de entrada independentes (não-correlacionadas).	255
Tabela 6.4 - Incertezas globais em dB(A) calculadas através de dois procedimentos (métodos) de combinação de incertezas distintos; Método 1 e Método 2. Fonte sonora BK 4204.	266
Tabela A.1 - Proposta de balanço de incertezas para cada i-ésima banda de terço de oitava da determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto. Formato e símbolos similares aos dados no documento EA-4/02-S1 (Suplemento 1 ao EA-4/02) da “European Co-operation for Accreditation of Laboratories”.....	279
Tabela A.2 - Balanço da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), a partir de cada j-ésima banda de terço de oitava.	279
.....	

SIMBOLOGIA

Alfabeto latino:

A	área equivalente de absorção sonora (Sabine)	[m ²]
B	pressão atmosférica (barométrica)	[milibar] ou [pascal]
C	correção	**
c	velocidade do som no ar	[m/s]
$c_i = \frac{\partial L_w}{\partial x_i}$	coeficientes de sensibilidade em função de cada i-ésima grandeza de entrada; derivadas parciais do nível de potência sonora pela i-ésima grandeza de entrada	***
c_1	coeficiente de sensibilidade equivalente à derivada parcial do nível de potência sonora (L_w) pelo nível de pressão sonora (L_p), valor unitário, $c_1 = 1,0$	***
c_2	coeficiente de sensibilidade equivalente à derivada parcial do nível de potência sonora pelo tempo de reverberação (T_{rev})	***
c_3	coeficiente de sensibilidade equivalente à derivada parcial do nível de potência sonora pelo volume (V) da câmara reverberante	***
c_4	coeficiente de sensibilidade equivalente à derivada parcial do nível de potência sonora pela área de superfície (S) interna da câmara reverberante	***
c_5	coeficiente de sensibilidade equivalente à derivada parcial do nível de potência sonora pela temperatura (θ)	***
c_6	coeficiente de sensibilidade equivalente à derivada parcial do nível de potência sonora pela pressão atmosférica ou barométrica (B)	***
c_7	coeficiente de sensibilidade equivalente à derivada parcial do nível de potência sonora pela frequência da banda de terço de oitava (f)	***
c_j	coeficiente de sensibilidade para cada banda de terço de oitava; pondera influências sobre o valor global	***
dB	decibels, decibel	[decibel]
dB(A)	decibels com ponderação da “curva A”	[dB(A)]
dB(F) dB	decibels sem ponderação; curva plana (“flat”).	[dB]
d_{Lp}	divisor relativo à distribuição de probabilidade atribuída aos níveis de pressão sonora medidos	***
d_{Trev}	divisor relativo à distribuição de probabilidade atribuída aos tempos de reverberação	***
d_V	divisor relativo à distribuição de probabilidade atribuída à medição do volume da câmara reverberante	***
d_S	divisor relativo à distribuição de probabilidade atribuída à área de superfície da câmara reverberante	***

d_t	divisor relativo à distribuição de probabilidade atribuída à temperatura ambiente	***
d_B	divisor relativo à distribuição de probabilidade atribuída à pressão barométrica	***
d_f	divisor relativo à distribuição de probabilidade atribuída às frequências centrais das bandas de terço de oitava	***
$Deriva_{cal}$	deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro	[dB]
f	frequência central de banda de terço de oitava	[Hz]
FW	correção de Waterhouse (a partir de ISO 3741, 1999)	[dB]
K_W	correção de Waterhouse (Vorländer, 1993)	[dB]
k	fator de abrangência	***
\overline{L}_p	nível de pressão sonora, média no tempo e no espaço	[dB]
L_{p_i}	nível de pressão sonora na i -ésima posição de microfone; média no tempo	[dB]
L_W	nível de potência sonora	[dB]
\overline{L}_{W_i}	média energética de níveis de potência sonora; se refere a i -ésima banda de terço de oitava	[dB]
L_{WA}	nível de potência sonora expresso em dB(A)	[dB(A)]
N ou n	número de medições efetuadas	***
r	distância entre fonte sonora e microfone, determinação de potência sonora segundo ISO 3745; câmara semi-aneecóica	[m]
S	área total de superfície interna de câmara reverberante	[m ²]
$s(L_p)$	desvio padrão experimental (espacial) dos níveis de pressão sonora	[dB]
$s(T_{rev})$	desvio padrão experimental dos tempos de reverberação	[s]
s_{LW}	desvio padrão de níveis de potência sonora obtidos em diversos ensaios, sem condições de repetitividade	[dB]
T_{15}	tempo de reverberação avaliado na faixa de 15 decibéis	[s]
T_{20}	tempo de reverberação avaliado na faixa de 20 decibéis	[s]
T_{30}	tempo de reverberação avaliado na faixa de 30 decibéis	[s]
T_{rev}	tempo de reverberação	[s]
$U_{95\%}$ ou U	incerteza expandida com intervalo de confiança tipicamente estabelecido em 95 %	**
u	incerteza padrão	**
u_B	incerteza padrão atribuída as variações de pressão barométrica	[dB]
$U(L_W)$	incerteza expandida $U_{95\%}$ do nível de potência sonora L_W	[dB]
u_c	incerteza padrão combinada	**
$u_c(L_W)$	incerteza padrão combinada do nível de potência sonora L_W	[dB]
u_{Lp}	incertezas padrão dos níveis de pressão sonora	[dB]

u_V	incertezas padrão da medição do volume da câmara reverberante	[dB]
u_S	incertezas padrão da medição da área de superfície da câmara reverberante	[dB]
u_{Trev}	incertezas padrão dos tempos de reverberação	[dB]
u_t	incertezas padrão da temperatura ambiente	[dB]
u_f	incertezas padrão das frequências das bandas de terço de oitava	[dB]
u_{ccm}	incertezas padrão da cadeia de medição	[dB]
$u_c(L_{WA_R})$	parâmetro expresso como uma das estimativas de incerteza padrão de diversos resultados de ensaios de potência sonora, sem condições de repetitividade	[dB]
$u_c^2(L_W) = \sum_i c_i^2 \cdot u_i^2$	incerteza padrão combinada (ao quadrado) a partir das i -ésimas grandezas de entrada (fontes de incertezas) do nível de potência sonora, ponderadas pelos coeficientes de sensibilidade c_i	[dB]
V	volume de câmara reverberante	[m ³]
$X_{Lp_aleatório}$	estimativa de incerteza de nível de pressão sonora de caráter aleatório; desconsidera deriva do calibrador de nível sonoro; por banda de terço de oitava	[dB]
X_{Trev}	estimativa de incerteza atribuída aos tempos de reverberação, por banda de terço de oitava	[s]
X_V	estimativa de incerteza atribuída ao volume da câmara reverberante	[m ³]
X_S	estimativa de incerteza atribuída à área de superfície da câmara reverberante	[m ²]
X_t	estimativa de incerteza atribuída à temperatura	[°C]
X_B	estimativa de incerteza atribuída à pressão atmosférica (barométrica)	[Pa]
X_f	estimativa de incerteza atribuída às frequências das bandas de terço de oitava	[Hz]

Alfabeto grego:

σ_{Ro}	desvio padrão de reprodutibilidade do procedimento de medição (de acordo com ISO 5725)	**
σ_r	desvio padrão de repetitividade	**
σ_R	desvio padrão de reprodutibilidade total	**
θ	temperatura, em graus Celsius	[°C]

Observação: algumas grandezas (ou parâmetros) são adimensionais e por isto estão denotadas por ***. Os parâmetros denotados por ** são usados em metrologia ou estatística e suas unidades dependem da grandeza específica a qual o parâmetro metrológico é aplicado.

RESUMO

Uma das questões metrológicas recentemente discutida no contexto do desenvolvimento e publicação de novas normas internacionais na área de acústica é a incerteza de medição. Procedimentos para a determinação de níveis de potência sonora estão descritos na norma ISO 3741 versão 1999, *International Organization for Standardization*. Sendo considerada uma das normas cujos métodos são de precisão, ou seja, teoricamente produz resultados mais exatos que outras normas ISO, as normas que são consideradas como método de engenharia e de inspeção. Um dos problemas envolvendo a publicação de novas versões destas normas é a exigência, por parte dos grupos de pesquisas acústicas, da elaboração de pelo menos um apêndice tratando da questão da incerteza de medição. O qual possa dar informações e/ou procedimentos para a avaliação da incerteza envolvendo estes processos de medição. Neste trabalho foram investigados os parâmetros inerentes ao método direto de determinação de potência sonora. Destacaram-se como principais fontes de incertezas: os níveis de pressão sonora e os tempos de reverberação. Estes parâmetros foram medidos nas câmaras reverberantes do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da UFSC e do Laboratório de Ensaio Acústicos (LAENA) da Divisão de Acústica e Vibrações do INMETRO. Foram utilizadas neste trabalho experimental três câmaras reverberantes com volumes entre 145 e 197 m³, projetadas para este tipo de medição, nas quais foi testada uma fonte sonora de referência aerodinâmica modelo BK 4204. Esta última foi o padrão acústico para a comparação metrológica entre os dois laboratórios. Além de ensaios de qualificação, testes de difusividade do campo sonoro, e testes de potência sonora com outras fontes sonoras (secador de cabelo e liquidificador), para complementar as investigações e cálculos de incertezas do método. Este trabalho propõe diretrizes para o tratamento e estimativa das incertezas do método de medição investigado.

Palavras-chave: incerteza de medição, potência sonora, câmara reverberante, fonte sonora de referência aerodinâmica.

ABSTRACT

Uncertainty of sound power determination in reverberant rooms by the direct method

One of the metrological issues that have been discussed recently in the context of the development and publication of new and revised international acoustics standards is the measurement uncertainty. Determination of sound power levels procedures are described in the ISO 3741 standard, version 1999, from International Organization for Standardization. ISO 3741 is regarded as a precision method standard. One of the problems in the development of new versions of these measurement standards is the demand, from acousticians and researchers, about the guidelines on uncertainty calculation. The standard must have an annex that can provide information on measurement uncertainty evaluation. The quantities (parameters) related to sound power levels determination by the direct method were investigated. The main uncertainties sources have been: the sound pressure levels and the reverberation times measured in the reverberation rooms of the Vibrations and Acoustics Laboratory (LVA) in UFSC, and in the Acoustics Testing Laboratory (LAENA) of the Acoustics and Vibrations Division; INMETRO. A reference sound source, model BK 4204, was tested in three reverberation rooms with volumes between 145 m³ up to 197 m³. The BK 4204 was the laboratorial comparison object. Some acoustic tests were performed, such as: reverberant room qualification, sound field diffusivity, sound power determination of blender and hair dryer, to complement the investigations, and uncertainties evaluation of the measurement process. These studies intend provide guidelines for the measurement uncertainty treatment and estimation regarding the method investigated.

Key words: measurement uncertainty, sound power, reverberant room, aerodynamic reference sound source.

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos está havendo maior mobilização com relação às questões metrológicas e relativas à incerteza de medição. Um exemplo disto, na área de acústica, foi o Simpósio em Le Mans (França, 2005)¹, no qual os participantes se dedicaram a assuntos exclusivamente relacionados a incertezas de medições na área de acústica. Neste evento foi exposto que tanto os laboratórios de calibração quanto os de ensaio têm interesse em obter conhecimentos necessários para a implementação prática da avaliação e expressão da incerteza de medição. Também foi enfatizado que os profissionais envolvidos com medições acústicas estejam mais dispostos a participar de intercomparações de calibrações e ensaios. Além de que procurem efetivamente adotar o ISO GUIA (*ISO GUM*) “Guia para a expressão da incerteza de medição” nos seus procedimentos de cálculos de incertezas.

Este trabalho de tese tem um enfoque especialmente direcionado a um **projeto de revisão de norma**, atualmente denominado ISO/DIS 3741 (2006), que trata de determinações de níveis de potência sonora. Segundo o ISO/TC 43, grupo técnico que trata de questões de normas acústicas na ISO “*International Organization for Standardization*” não estão sendo aceitas (aprovadas) as revisões de normas de medições acústicas que não tenha um apêndice específico sobre a incerteza associada às medições específicas de cada laboratório² (preferencialmente segundo o ISO GUIA (2003)). Neste caso, também pode haver informações sobre a incerteza do método de medição, mas estas últimas são consideradas abordagens (soluções) de caráter

¹ *International INCE Symposium. Managing uncertainties in noise measurements and predictions: a new challenge for acousticians. Le Mans, França – junho de 2005.*

² Incertezas generalizadas atribuídas ao método de medição **não** são consideradas consistentes com o ISO GUIA (2003).

pragmático e deverão futuramente ser substituídas por avaliações consistentes de incerteza da medição.

Quanto aos objetivos gerais deste trabalho, foi lançado mão da utilização de metodologia experimental para produzir investigações sobre as incertezas das determinações de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto. Medições com e sem condições de repetitividade foram executadas e suas incertezas estimadas.

Além disto, outro objetivo é a investigação das incertezas de forma a contribuir com soluções “não-pragmáticas”, ou seja, buscar apontar as soluções baseadas em teoria e regras estabelecidas; preferencialmente no ISO GUIA (2003), o qual é um documento que visa orientar os profissionais na implementação prática da avaliação e expressão da incerteza em diversas áreas que envolvem medições.

Parece plausível começar os estudos de incertezas na área de acústica através do estudo inicial baseado em fontes sonoras de referência, pois estas têm características normalizadas. E isto foi uma das diretrizes iniciais deste trabalho.

Para enfatizar ainda mais a importância desta área de pesquisa, deve-se lembrar que a questão da competência de laboratórios atualmente está sendo relacionada com a expressão das incertezas das medições fornecidas pela instituição.

Os objetivos específicos são relacionados diretamente ou indiretamente com as seguintes questões:

- Elaborar uma proposta em forma tabular de balanço de incertezas para a determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo *método direto*. A ser uma contribuição para a norma ISO 3741 (nova norma) especialmente no anexo da norma. Ver Apêndice 1 da tese;

- Investigar fontes de incertezas nas medições em câmaras reverberantes e instrumentação de medição, e casos específicos de medições com fontes de ruído distintas;

- Identificar possíveis correlações entre as grandezas de entrada do processo de medição de níveis de potência sonora, por bandas de terço de oitava e valor de nível global dB(A);

- Calcular os coeficientes de sensibilidade referentes ao processo de medição de acordo com o ISO GUIA (2003);

- Estimar incertezas padrão através de desvios padrão experimentais e desvios padrão experimentais da média, e comparar os resultados das avaliações de incertezas;

– Comparar diversas incertezas dos níveis de potência sonora, L_W , de fonte sonora de referência obtidos em diferentes períodos (meses diferentes), objetivando observar as variações nas estimativas de incertezas, especialmente as dos valores globais;

– Executar uma comparação laboratorial de potência sonora entre LVA-UFSC e LAENA-INMETRO através de uma fonte sonora de referência modelo BK 4204 de Brüel & Kjær;

– E assim, analisar a rastreabilidade e as incertezas dos níveis de potência sonora, L_W , obtidos no LVA-UFSC e no LAENA-INMETRO.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica onde a abordagem principal é fortemente voltada às questões de metrologia, especialmente na área de medições acústicas. Discorrendo a respeito dos conceitos do ISO GUIA (2003), incertezas padrão: suas combinações e estimativas, a questão da avaliação de incerteza de medição inserida no contexto das novas normas internacionais. Além disto, são apresentados modelos de incerteza de determinação de níveis de potência sonora (*método da comparação*), inclusive valores de cálculos de incertezas que foram recentemente desenvolvidos na Europa. Algumas partes (pertinentes) do conteúdo do **projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006)** são apresentadas, preconizando os pontos mais importantes para o desenvolvimento de propostas novas no contexto de aprimoramento da norma.

No Capítulo 3 é exposta a questão da necessidade de correções que são termos da equação apresentada na norma ISO 3741. Elas estão novamente sendo assuntos de revisão da norma; principalmente correções de temperatura e pressão atmosférica. Pode-se notar a semelhança entre as diversas equações utilizadas nos últimos anos (ou décadas) para a determinação de L_W no contexto das versões da norma ISO 3741.

O Capítulo 4 é dedicado a reportar os resultados experimentais obtidos com a fonte sonora de referência modelo BK 4204 no LVA-UFSC e LAENA-INMETRO. As incertezas foram avaliadas conforme os conceitos presentes no ISO GUIA (2003). Basicamente, foram seis ensaios nas câmaras reverberantes do LVA-UFSC e um no LAENA-INMETRO³, os quais tiveram suas incertezas avaliadas através de “modelo matemático” e com a aplicação do conceito de incertezas padrão combinadas.

O Capítulo 5 é uma espécie de extensão do Capítulo 4, mas para ensaios e análises de incertezas de dois eletrodomésticos; secador de cabelo e liquidificador. Tendo por objetivo

³ LNM – Laboratório Nacional de Metrologia. Xerém – Duque de Caxias – RJ.

observar as variações nos valores de incertezas obtidos com fontes de ruído com diferentes características de espectro sonoro.

O Capítulo 6 tem por objetivo levar a reflexão e apontar solução para as questões relativas aos modelos de cálculos de incertezas específicos da determinação de níveis de potência sonora. Também é apresentado e comentado em detalhes um dos modelos de cálculos de incertezas de determinação de potência sonora pelo método da comparação (norma ISO 3743-1), que foi proposto por COSTA-FÉLIX (2000).

Procura-se tratar efetivamente de duas questões metrológicas pertinentes: rastreabilidade das medições (verificação da calibração do analisador; validade das medições), e possíveis correlações que podem ser “evitadas ou eliminadas” por meios consistentes com o ISO GUIA (2003).

O Capítulo 7 expõe as conclusões sobre os trabalhos desenvolvidos e propostas de trabalhos futuros nesta área de pesquisa.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Este capítulo tem por objetivo mostrar os diversos aspectos do desenvolvimento e dificuldades encontradas no campo da avaliação da incerteza de medições acústicas, especialmente na área de ensaios de determinação de níveis de potência sonora em ambientes reverberantes⁴. São enfatizadas as questões mais atuais de normas internacionais de medições acústicas. Além de assuntos tais como: os conceitos apresentados no ISO GUIA (2003) “Guia para a expressão da incerteza de medição”⁵, as estimativas de incertezas através de desvios padrão, os modelos de cálculos de incertezas de determinação de níveis de potência sonora que já foram propostos e/ou estão em desenvolvimento, coeficientes de sensibilidade, incertezas de níveis de pressão (e de potência) globais em função das incertezas por bandas de terço de oitava, características de propagações de incertezas (“lei de propagação de incertezas padrão” e propagação de distribuições de probabilidade). Também são apresentados alguns valores de incertezas obtidos através de comparações interlaboratoriais de potência sonora com fontes sonoras padrão de referência. O processo de comparação interlaboratorial foi importante para a revisão e modificação da norma ISO 6926, da primeira edição (1990) para a segunda (1999)⁶.

De forma breve foi apresentada uma questão relativa ao grau de confiabilidade da estimativa de incerteza. A qual pode ser denominada “incerteza da incerteza” (ISO GUIA, 2003).

⁴ **Norma ISO 3741** – “Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources – Precision methods for broad band sources in reverberation rooms”, segunda edição 1988. **Norma ISO 3741** – “Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources – Precision methods for reverberation rooms”, terceira edição 1999. **Projeto de revisão da norma ISO/DIS 3741 (2006)** – Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation rooms.

⁵ Também denominado *ISO GUM – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Ou simplesmente *GUM*.

⁶ **ISO 6926 : 1999** – Acoustics – Requirements for the performance and calibration of reference sound sources used for the determination of sound power levels.

Na verdade, esta questão é atribuída à comparação da qualidade entre estimativas do Tipo A e do Tipo B das incertezas de medição. Há um parâmetro que é indicado pelo ISO GUIA para estimar a “incerteza da incerteza”, o qual é apresentado neste trabalho, porém **não** é calculado neste trabalho de tese. De fato, esta revisão bibliográfica trata de diversos assuntos relacionados com a expressão (e processos de avaliação) de incertezas de medição. No entanto, há outras várias questões que, mesmo não sendo aqui abordadas, têm relação direta ou indireta com a incerteza de medição, inclusive em metrologia acústica.

2.1 Aspectos e diretrizes gerais dos cálculos de incerteza de medição

Conceitos básicos, recomendações e procedimento de avaliação de incertezas de medição. Estes três tópicos são, em resumo, a abordagem do ISO GUIA (também denominado ISO GUM) para orientar efetivamente os pesquisadores e profissionais dos laboratórios e instituições metrológicas na reflexão, conhecimento e quantificação das incertezas de suas medições. As quais demonstram a confiabilidade, a capacidade técnica do serviço prestado, e a validade de cada resultado de medição. Portanto, o conhecimento e expressão da incerteza por parte da instituição que trabalha com algum tipo de processo de medição é parte integrante do reconhecimento da competência desta instituição.

De acordo com PRIEL (2005), “atualmente diferentes métodos e ferramentas estão disponíveis para desenvolver avaliações de incertezas. Estes novos métodos seguem os conceitos e recomendações do “Guia para a expressão da incerteza de medição” (ISO GUM ou ISO GUIA)”.

Segundo o projeto de revisão da norma de determinação de potência sonora ISO/DIS 3741 (2006), que futuramente deverá substituir a atual versão ISO 3741 (1999):

“As incertezas de medição associadas com os níveis de potência sonora e níveis de energia sonora determinados de acordo com esta norma internacional normalmente têm que ser avaliados através do “Guia para a expressão da incerteza de medição”. De qualquer maneira, durante o período em que esta norma internacional esteve sendo preparada, informações insuficientes estavam disponíveis para esboçar uma declaração que estivesse de acordo com o ISO GUIA. Uma indicação do tipo de informação que precisaria ser incluída em tal declaração é dada no anexo G (da ISO/DIS 3741 : 2006).”

Isto é consequência de um esforço dos grupos que elaboram as novas normas e revisões das normas internacionais existentes, especialmente normas dedicadas a especificar

processos de medição. É um caminho rumo à normalização, através de um documento aceito a nível mundial. Segundo (BRINKMANN, HIGGINSON e NIELSEN, 2005):

“Institutos nacionais de metrologia e laboratórios de calibração, por várias décadas, avaliaram as incertezas de seus resultados de medições e declararam os respectivos valores numéricos em certificado de calibração como um indicador de exatidão (accuracy) e confiabilidade. Especialmente durante a implantação do “mercado interno europeu”, houve aumento da cooperação entre os diversos países; melhores capacidades de medição (menores incertezas) dos laboratórios baseadas em estimativas de incerteza receberam mais e mais atenção e tornaram-se igualmente um fator importante no mercado. Era óbvio então (naquele momento) que um entendimento comum de como determinar e expressar incerteza de medição era essencial para gerar dados confiáveis e comparáveis. Estas considerações levaram a um acordo sobre harmonização internacional de procedimento para a avaliação de incerteza de medição o qual foi editado em 1993 por seis organizações internacionais altamente reconhecidas e hoje é conhecido mundialmente como⁷ o “Guia para a expressão de incerteza de medição” (GUM).”

“*Incerteza* deveria ter sido sempre uma palavra chave no campo de normalização sendo que muitas normas são dedicadas a fornecer métodos de medição de todos os tipos de grandezas”, JACQUES (2005).

“A incerteza de medição é o modo mais simples de expressar a confiabilidade do resultado”, PRIEL (2005).

Segundo COSTA-FÉLIX (2000), a incerteza de medição associada ao mensurando é de fundamental importância para a confiabilidade de medições em geral, incluindo medições acústicas:

*“Em metrologia, a expressão do resultado de uma medição só pode ser considerada completa se além do valor encontrado para o mensurando for fornecida também uma avaliação da qualidade e confiabilidade da medição. O conceito metrológico que define esses parâmetros é o da **incerteza**.”*

No Brasil, de acordo com a norma INMETRO, NIT-DICLA-033, a estimativa da incerteza de medição é requerida para laboratórios de ensaios acreditados ou postulantes à acreditação junto ao INMETRO. Estes laboratórios podem ter os serviços (acreditação) suspensos se não se enquadrarem nas regras dadas na norma do INMETRO, sendo fundamental desenvolver meios próprios para calcular e expressar a incerteza de seus ensaios.

O objetivo da norma INMETRO NIT-DICLA-033 é “estabelecer a política da Cgcre/Inmetro para que os laboratórios de ensaio implementem a estimativa de incerteza de medição para os ensaios acreditados de acordo com os requisitos da NBR ISO/IEC 17025 ; 2001”.

⁷ Guide to the expression of uncertainty in measurement.

Dentre outros itens especificados para a implementação da estimativa de incerteza de medição em laboratórios de ensaios, a NIT-DICLA-033 cita que os “métodos de ensaios que requeiram a identificação de todos os componentes da incerteza e um cálculo detalhado da incerteza de medição de acordo com os métodos publicados que sejam consistentes com aqueles constantes no “Guia para a expressão da incerteza de medição” publicado pelo BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML”.

De um modo geral, e especialmente na Europa, em um estágio inicial foi reconhecido que resultados de ensaios quantitativos devem ser avaliados através dos princípios do ISO GUIA (2003) e que são igualmente aplicáveis a todos os tipos de medições incluindo aquelas usadas por laboratórios de ensaios. Contudo, somente em raras exceções estes laboratórios estimam e declaram suas incertezas de medições em certificados ou laudos⁸. Isto era principalmente devido à falta de conhecimento nesta área (avaliação de incerteza). Além disso, uma certa relutância dos clientes era observada, indicando que eles realmente não gostavam de ser confrontados com o fato de que os resultados **não** são simplesmente “exatos”. Este tipo de atitude mudou nos últimos anos, quando os clientes dos laboratórios tiveram consciência que qualquer tipo de resultados de medições somente podem ser comparados com confiabilidade, se suas respectivas incertezas são conhecidas, e que muitas vezes declarações válidas sobre a conformidade de um produto com limites especificados somente podem ser feitas se a incerteza dos resultados de ensaios são levados em consideração (BRINKMANN, HIGGINSON e NIELSEN, 2005).

Isto se tornou especialmente relevante quando os fabricantes desenvolveram um interesse vital em obter resultados de testes para seus produtos que fossem reconhecidos internacionalmente, evitando assim repetições dos ensaios (em outros países). Como na área de calibração, é esperado um interesse crescente por parte dos clientes para selecionar dentre os laboratórios de ensaio concorrentes aquele que fornece resultados confiáveis por um preço razoável.

Isto impôs alguma pressão sobre os laboratórios de ensaio que aumentou consideravelmente quando a norma⁹ ISO/IEC 17025 foi publicada pela primeira vez em 1999. Desde então, a norma ISO/IEC 17025 é a base para o credenciamento de laboratórios em diversos países do mundo. Esta norma requer¹⁰ que “os laboratórios de ensaio devem ter e devem aplicar procedimentos para cálculo das incertezas de medição”. Além disso, especifica que

⁸ “*Test reports*” ou literalmente em português: “relatórios de testes”.

⁹ Em inglês: *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. Versão em português: NBR ISO/IEC 17025 : 2001 “Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”.

¹⁰ Na sua Subseção 5.4.6.

“quando for estimada a incerteza de medição, todos os componentes de incertezas que sejam importantes para uma determinada situação devem ser considerados usando-se métodos de análise apropriados” (BRINKMANN, HIGGINSON e NIELSEN, 2005).

De qualquer forma, aparentemente os laboratórios de ensaio em muitos casos ainda não estão familiarizados com o conceito de incerteza de medição sendo incapazes de cumprir os requisitos da norma ISO/IEC 17025 sem orientação adicional. Na verdade, estes laboratórios desejam receber informações sobre avaliação de incertezas de medição que sejam dadas nas normas internacionais. Porém, de modo geral, as normas ainda não fornecem este tipo de orientação. Conseqüentemente, laboratórios e organismos de credenciamento, há alguns anos, solicitaram às principais instituições de normalização ISO e IEC que, durante o desenvolvimento de normas internacionais (que especificam métodos de medição), a questão da incerteza de medição fosse tratada com mais atenção.

2.1.1 A questão da incerteza de medição nas normas internacionais

A partir das séries de dúvidas e dificuldades dos usuários das normas de caráter internacional, situação que foi exposta na subseção anterior, tiveram início discussões sobre a organização dos trabalhos nos Comitês Técnicos dos órgãos internacionais de normalização; IEC/TC 29 “Eletroacústica”, ISO/TC 43 “Acústica” e especialmente ISO/TC 43/SC 1 “Ruído”; (BRINKMANN, HIGGINSON e NIELSEN, 2005).

Recentemente, os membros dos Comitês ISO/TC 43 “Acoustics” (Acústica), do ISO/TC 43/SC 1 “Noise” (Ruído), e do CEN/TC 211 “Acoustics” (Acústica) chegaram a algumas conclusões relativas à experiência na implantação dos assuntos de incerteza de medição em normas internacionais. Os principais tópicos relacionados com estes grupos de desenvolvimento de normas e também pertinentes ao trabalho desta tese são comentados a seguir.

2.1.1.1 Política do ISO/TC 43 “Acústica” e ISO/TC 43/SC 1 “Ruído” com respeito à incerteza de medição

De acordo com (BRINKMANN, HIGGINSON e NIELSEN, 2005), inicialmente houve a necessidade de maior ênfase na questão da incerteza de medição durante o desenvolvimento de normas novas ou projetos de revisão de normas, a qual foi reconhecida pelo ISO/TC 43/SC 1 em 1999. A seguinte resolução foi adotada:

“ISO/TC 43/SC 1 solicita que cada um dos Grupos de Trabalho considere o “Guia para a expressão da incerteza de medição”¹¹ (ISO GUIA) na preparação dos documentos, e se apropriado, inclua uma declaração sobre incerteza de medição.”

Aparentemente, de qualquer forma, dentre os especialistas designados aos Grupos de Trabalho da ISO, o conhecimento suficiente para tratar adequadamente da questão de incerteza de medição em normas internacionais dificilmente era encontrado. De forma que os resultados **não** foram satisfatórios; com raras exceções. Tornou-se óbvio que mais informações e orientação direta teriam que ser fornecidas sobre os princípios do ISO GUIA e sua aplicação em medições acústicas. Por isto, um seminário técnico foi organizado para setembro de 2003, em Berlin, no qual estiveram reunidos os membros dos Grupos de Trabalho do ISO/TC 43 e de seus subcomitês.

O seminário foi assistido por cerca de cem especialistas e teve boa aceitação. Embora não tivesse intenção de ajudar os Grupos de Trabalho em seus problemas específicos, o seminário objetivou reduzir as dificuldades e a aversão ao assunto. Além disto, foi dada a orientação correta sobre a aplicação do ISO GUIA, a qual é menos complexa do que era esperado anteriormente.

Um documento sobre o tratamento da incerteza de medição foi apresentado e aceito com algumas modificações durante as reuniões do ISO/TC 43. O qual foi considerado **uma abordagem pragmática**¹² do assunto e desde então forma a base para o tratamento de incerteza em normas ISO sobre medições e predição sonoras. O documento¹³ é apresentado na subseção a seguir.

2.1.1.2 Tratamento de incertezas de medição em normas na área de acústica, (documento adotado: ISO/TC 43 N 1023, junho de 2004)

1 – Se relevante, cada norma deverá conter uma seção específica sobre incerteza de medição em seu texto principal. A qual deverá conter a seguinte declaração:

¹¹ *Guide to the expression of uncertainty in measurement.*

¹² Especialmente aprovando soluções de problemas de forma adequada à situação presente ao invés de obedecer a teorias, idéias ou regras fixadas.

¹³ Tradução livre do original em inglês.

“A incerteza de resultados obtidos de medições de acordo com esta norma internacional deverá ser avaliada preferencialmente de acordo com o ISO GUIA (ISO GUM). Se reportada, a incerteza expandida junto com o fator de abrangência¹⁴ correspondente a um determinado nível de confiança¹⁵ de ... % (preferivelmente de 95 %) como definido no ISO GUIA deverão ser declarados. Orientação sobre a determinação da incerteza expandida é dada no Anexo yx.”

2 – O ISO GUIA (ISO GUM) deverá ser adicionado à lista de referências normativas.

3 – Na seção que trata dos resultados de ensaios, a declaração da incerteza de medição é considerada obrigatória a menos que, em um caso particular, um grupo de trabalho tenha boas razões para deixá-la opcional.

4 – O anexo sobre incerteza deve ser estruturado como segue:

- Informação geral;
- uma relação funcional (modelo) que relaciona todas as grandezas de entrada à grandeza de saída (mensurando);
- um **balanço de incertezas em forma tabular**, contendo as grandezas de entrada dominantes em relação à incerteza global, suas melhores estimativas, as incertezas padrão associadas a estes valores, as distribuições de probabilidades assumidas, os coeficientes de sensibilidade obtidos do modelo e as contribuições para a incerteza padrão combinada;
- o cálculo da incerteza expandida para o nível de confiança declarado.

(Anexo J da norma¹⁶ ISO 3745:2003 fornece um exemplo útil deste princípio.)

5 – A avaliação da incerteza de medição é de responsabilidade de cada laboratório que executa a medição. Mesmo se os requisitos da norma são totalmente cumpridos, as incertezas dos resultados de diferentes laboratórios podem ser diferentes dependendo das condições específicas de medição.

Cada grupo de trabalho decide se informações quantitativas sobre as diversas contribuições de incertezas podem ser dadas ou não, e se esta informação é considerada uma situação típica ou um caso pior.

É enfatizado que um balanço de incertezas detalhado de acordo com o ISO GUIA fornecerá informação útil sobre as maiores contribuições de incertezas e permitirá ao laboratório

¹⁴ Coverage factor.

¹⁵ Coverage probability.

¹⁶ ISO 3745 (2003) – Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure -- Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms.

melhorar determinadas condições de medição com o objetivo de reduzir a incerteza global, se solicitado.

6 – Se, durante a preparação de uma norma, conhecimento suficiente ainda não está disponível para a total aplicação do ISO GUIA, enquanto que informações sobre dados de reprodutibilidade de comparações interlaboratoriais estão disponíveis, esta informação deverá ser fornecida. Uma declaração deverá, então, ser incluída no texto principal da norma, de que a incerteza expandida para um determinado *nível de confiança* de 95 % deverá ser dada como *duas vezes o desvio padrão de reprodutibilidade*.

Se um nível de confiança diferente do preferencial 95 % é escolhido, este “fator de abrangência de duas vezes” terá que ser ajustado de acordo com o nível de confiança escolhido¹⁷.

De qualquer forma, esta abordagem deve ser considerada apenas intermediária e deverá ser substituída pela expressão de incerteza em conformidade com o ISO GUIA em alguma das revisões futuras da norma. Orientação de como o ISO GUIA pode ser (principalmente) aplicado, como descrito no item 4 acima (anterior), deverá ser incluída na norma já no presente momento.

2.1.1.3 Comentários adicionais sobre o documento ISO/TC 43 N 1023

Com relação aos *parágrafos 1 e 2* na subseção anterior, há um forte reconhecimento do ISO GUIA como referência no assunto de avaliação de incerteza de medição. Cada norma especificando um método de medição ou predição de som, seja ela nova ou uma revisão de uma norma existente, deverá conter uma seção sobre incerteza de medição; (com o texto apresentado, no *parágrafo 1*, incluído em tal seção). Isto requer que a incerteza tem que ser avaliada quando um método normalizado é aplicado. Preferência é dada para o ISO GUIA. De qualquer maneira, se reconhece o fato que atualmente o grau de conhecimento pode não permitir a aplicação do ISO GUIA quantitativamente, outros métodos de avaliação são permitidos (*ver parágrafo 6*). Além disto, se reconhece que de acordo com a norma ISO/IEC 17025 a incerteza de medição nem sempre precisa ser declarada em relatórios de ensaios. De qualquer forma, se declarada, deve haver uniformidade das informações. Sendo que a incerteza expandida de medição junto com o nível de confiança escolhido (preferivelmente 95 %) como especificado no ISO GUIA deverá ser declarado.

¹⁷ O fator de abrangência deve ser ajustado em função do nível de confiança adotado e do número de graus de liberdade (efetivos), quando este último não for suficientemente alto, inferior a 30, por exemplo.

Além disso, cada norma deverá conter um anexo onde o conceito do ISO GUIA é descrito em detalhes para a determinada aplicação permitindo ao laboratório aplicar estes princípios de avaliação. Isto em casos onde valores numéricos definitivos relativos às diversas fontes de incertezas não podem ser especificados no presente momento.

A respeito do *parágrafo 6* na subseção anterior, é reconhecido que o conhecimento atual pode não ser sempre suficiente para aplicar o ISO GUIA em cada detalhe quantitativo (ver parágrafo 1). Por outro lado, dados confiáveis de comparações interlaboratoriais às vezes estão disponíveis, fornecendo dados válidos com relação a reprodutibilidade. Isto ocorre se o método é aplicado em diferentes laboratórios. A política adotada, portanto, permite o uso apropriado destes dados para declarações de incertezas das medições em relatórios de ensaios como um passo pragmático e intermediário com o objetivo de não atrapalhar o andamento do processo de normalização. De qualquer forma, o pré-requisito para o uso de tais dados é que dados sólidos de intercomparações usando o método especificado realmente existam e não sejam apenas meras estimativas. Adicionalmente, deve-se sempre perceber que incertezas de medição baseadas em dados de reprodutibilidade podem proporcionar uma imagem muito otimista em relação ao quadro real. Isto devido ao fato que nem todas as fontes de incertezas podem ter sido detectadas (e avaliadas) através de comparações interlaboratoriais, (BRINKMANN, HIGGINSON e NIELSEN, 2005).

2.1.1.4 Desenvolvimento atual do projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741

Neste ano de 2006 está em andamento o projeto de revisão da norma ISO 3741, cuja versão em vigor é a terceira edição¹⁸ de 1999. Para os usuários desta norma é possível notar que as equações de cálculo dos níveis de potência sonora têm apresentado correções que diferem ligeiramente a cada revisão da norma. Houve algumas modificações nas correções (de temperatura e pressão atmosférica) adicionadas à equação de cálculo de níveis de potência sonora da norma ISO 3741 de 1988 em relação à norma de 1999. Novamente isto acontece; o projeto de revisão de norma¹⁹ ISO/DIS 3741 de 2006 também propõe mudanças nas correções de temperatura e pressão atmosférica de sua equação. Além disso, este projeto de revisão da norma ISO/DIS 3741 propõe estabelecer procedimento de medição / cálculo de níveis de energia sonora. Este último está fora do escopo deste trabalho de tese.

¹⁸ Sendo que uma página referente a algumas correções do texto da norma (errata) foi publicada em 2001.

¹⁹ ISO/DIS 3741 (*draft 2006*) – *Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation test rooms.*

A seguir, são apresentadas as partes mais pertinentes sobre as declarações e procedimentos de avaliação das incertezas dos níveis de potência sonora medidos em câmaras reverberantes, por métodos considerados de precisão. O esboço da nova norma (conteúdo do projeto da norma ISO/DIS 3741 de julho de 2006) apresenta seções sobre incertezas de medição que vão de encontro com os critérios estabelecidos no documento ISO/TC 43 N1023; ver subseções anteriores (da tese). A questão da implementação da avaliação de incerteza através dos *desvios padrão de reprodutibilidade* é realmente uma *solução pragmática*; que não é baseada exatamente nos princípios estabelecidos no ISO GUIA (2003).

A Seção 10 do projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 de 2006 trata especificamente de incerteza de medição. É citado o anexo G no qual está o esboço do balanço de incertezas (*uncertainty budget*) em forma tabular. Parte do conteúdo da **Seção 10**, do esboço de **revisão da norma de julho de 2006**, é apresentada a seguir:

“As incertezas de medição associadas com os níveis de potência sonora e níveis de energia sonora determinados de acordo com esta norma internacional normalmente têm que ser avaliados através do “Guia para a expressão da incerteza de medição”. De qualquer maneira, durante o período que esta norma internacional esteve sendo preparada, informações insuficientes estavam disponíveis para esboçar uma declaração que estivesse de acordo com o ISO GUIA. Uma indicação do tipo de informação que precisaria ser incluída em tal declaração é dada no anexo G (da ISO/DIS 3741 : 2006).”

“O componente de incerteza que descreve os desvios devido ao procedimento de medição normalizado incluindo sua manipulação pode ser quantificada através do *desvio padrão de reprodutibilidade do procedimento de medição*, σ_{R0} , obtido por um ensaio interlaboratorial de acordo com ISO 5725 usando uma fonte sonora ideal com emissão sonora estável. Este desvio padrão cobre efeitos como variações entre locais dos ensaios, influências de instrumentação diferentes e procedimentos de calibração, números de posições de medições (de microfones e fonte sonora) e suas localizações, tempos de integração e a imperfeições de correções devidas a influências atmosféricas, de ruído de fundo e ambientais.”

“De acordo com o caráter desta norma internacional como um “documento base (frame)” a informação sobre incerteza dada na Tabela 2.1 é baseada²⁰ nos *desvios padrão de reprodutibilidade do procedimento de medição*, σ_{R0} , os quais não cobrem os desvios de emissão sonora reais durante ensaios interlaboratoriais, assumindo $\sigma_r = 0$.”

²⁰ Somente valores relativos às bandas de terço de oitava que são mostrados na Tabela 2.1.

“Os desvios na emissão sonora causados por fonte sonora (máquina) específica sob teste são quantificados por *desvios padrão de repetitividade*, σ_r , obtidos por várias (no mínimo 6) medições repetidas (*ver ISO 7574-1*) desenvolvidas no mesmo local de teste, e usando a mesma instrumentação etc. como descrito pela norma para uma única medição. Conseqüentemente σ_r é um valor obtido basicamente em função das condições de operação e montagem as quais são dadas por instruções do ensaio de ruído específicas do maquinário sob teste.”

“O *desvio padrão de reprodutibilidade total*, σ_R , é determinado pela Equação 2.1:”

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_{R_0}^2 + \sigma_r^2} \quad (2.1)$$

“Se relatada, a incerteza expandida de medição das determinações de níveis de potência sonora feitas de acordo com esta norma internacional, para um nível de confiança de 95 % (fator de abrangência $k = 2$) como definido no *ISO guia para a expressão de incerteza de medição*, deverá ser dada sendo duas vezes o *desvio padrão de reprodutibilidade total*, σ_R , a não ser que mais conhecimento esteja disponível. Por exemplo, pelo laboratório executando as medições ou em um documento com instruções de ensaio de ruído para uma família específica de fontes de ruído (máquinas).”

Segundo a norma ISO 3741 terceira edição (1999), *os valores máximos dos desvios padrão de reprodutibilidade* são os dados na Tabela 2.1. Estes valores são os mesmos no projeto de revisão da norma ISO/DIS 3741 (2006), exceto da sexta a nona linhas da Tabela 2.1 que se referem às bandas de oitava as quais **não** são dadas no projeto de revisão de norma. Como estes valores são considerados “valores superiores” então se pressupõe que sejam relativos aos piores casos (mas ainda em conformidade com a norma ISO 3741); maiores desvios que devem ser encontrados.

Tabela 2.1 - Estimativas de valores superiores (máximos) dos desvios padrão de reprodutibilidade de níveis de potência sonora determinados de acordo com ISO 3741 terceira edição de 1999, e para o projeto de revisão ISO/DIS 3741 de 2006, apenas os valores referentes às bandas de terço de oitava.

Largura de banda	Frequências centrais (Hz)	Valores superiores de desvio padrão de reprodutibilidade (dB)
Terço de oitava	100 ^(a) a 160	3,0
	200 a 315	2,0
	400 a 5000	1,5
	6300 a 10000	3,0
Oitava	125 ^(a)	2,5
	250	1,5
	500 a 4000	1,0
	8000	2,0
Ponderado “A”, em dB(A)		0,5^(b)

^(a) Recomendações para frequências abaixo de 100 Hz são dadas nos anexos das normas (1999 e projeto de revisão 2006)

^(b) Aplicável à fonte sonora que emite ruído com um espectro relativamente “plano” na faixa de frequência de 100 Hz a 10.000 Hz.

Através das informações que estão sendo dadas no esboço da nova norma, nota-se uma ênfase às medições apenas por bandas de terço de oitavas, deixando de fornecer informações sobre os desvios que seriam relacionados com as bandas de oitavas.

A *reprodutibilidade*, relativa às medições, é definida em 3.7 no VIM (Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia)²¹.

“Reprodutibilidade (dos resultados de medição) [reproducibility (of results of measurements) / reproductibilité (des résultats de mesurage), ff]”

Grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando, efetuadas sob condições variadas de medição.

Observações:

1) *Para que uma expressão da reprodutibilidade seja válida, é necessário que sejam especificadas as condições alteradas:*

2) *As condições alteradas podem incluir:*

- *princípio de medição;*
- *método de medição;*
- *observador;*
- *instrumento de medição;*
- *padrão de referência;*
- *local;*
- *condições de utilização;*
- *tempo.*

3) *Reprodutibilidade pode ser expressa quantitativamente em função das características da dispersão dos resultados.*

²¹ Portaria INMETRO nº 029, de 10 de março de 1995.

4) *Os resultados aqui mencionados referem-se usualmente a resultados corrigidos.*

Apesar de ser uma solução considerada pragmática e intermediária, o projeto de revisão da norma ISO/DIS 3741 (julho de 2006) permite que as incertezas sejam expressas com base em *desvios padrão de reprodutibilidade*. Porém, alerta que estes desvios devem obrigatoriamente ser fruto de comparações válidas, e **não** apenas estimativas baseadas em suposições e/ou valores sem fundamento metrológico adequado. **A seguir são apresentadas algumas partes pertinentes do conteúdo (traduzido) do anexo G do projeto de revisão da norma ISO/DIS 3741 (2006)**, o qual é um anexo considerado informativo. Este anexo futuramente deverá ser aprimorado e servirá de auxílio para os usuários da norma estimarem suas incertezas de medição.

Anexo G - G.1 Geral

“A informação sobre reprodutibilidade de medição dada nesta norma internacional (na Seção 10 da norma) pode ser útil no sentido de se estimar²² (calcular) incertezas de medição, mas é incompleta. Em particular, não é dada indicação alguma de tendências sistemáticas as quais podem ocorrer entre os níveis de potência sonora e níveis de energia sonora determinados usando diferentes métodos normalizados. Nem dá uma análise dos vários componentes de incerteza de medição e suas magnitudes. O formato aceito para a expressão de incertezas geralmente associadas aos métodos de medição é o dado no ISO Guia para a expressão da incerteza de medição. Este formato incorpora um balanço de incertezas, no qual todas as diversas fontes de incertezas são identificadas e quantificadas, das quais a incerteza padrão combinada total pode ser obtida. Os dados necessários para permitir que este formato seja adaptado para o caso desta norma internacional não estão disponíveis no momento em que está sendo preparada. De qualquer forma, a intenção deste anexo é fornecer a base para o desenvolvimento de informação adequada através da qual o ISO GUIA possa ser aplicado.”

G.2 Expressão para o cálculo do nível de potência sonora

G.2.1 Método direto

“Preliminarmente estimativas mostram que o nível de potência sonora L_W de uma fonte de ruído, determinada de acordo com a norma internacional²³ pelo método direto, é uma função de um número de parâmetros²⁴ indicada pela Equação 2.2”

$$L_W = L_W \left(\overline{L}_P, \delta_{K_1}, \delta_{bgd}, \delta_{slm}, \delta_{mount}, \delta_{rep}, \delta_{mic}, \delta_T, \delta_B, \delta_\theta, \delta_A \right) \quad (2.2)$$

²² Do original em inglês: *derivation of*.

²³ No projeto de norma internacional ISO/DIS 3741.

²⁴ A Equação 2.2 é dada no projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006), e representa L_W por bandas de terço de oitava. Os parâmetros têm uma simbologia similar ao encontrado no documento EA-4/02 S1 (documento de origem europeia). Os símbolos denotados por δ representam as grandezas e as respectivas incertezas (e/ou variações) associadas; por exemplo: $\delta_\theta = \theta \pm \Delta\theta$.

onde: $\overline{L_p}$ é o **nível de pressão sonora**, por banda de oitava média no tempo, da fonte de ruído sob teste, apropriadamente corrigida em função do ruído de fundo;

δ_{K_1} representa a “**grandeza de entrada**”²⁵ relativa à correção de ruído de fundo e sua incerteza associada;

δ_{bgd} representa a “grandeza de entrada” relativa à medição do ruído de fundo e respectiva incerteza associada;

δ_{slm} representa a “grandeza de entrada” relativa à incerteza na instrumentação de medição;

δ_{mount} representa a “grandeza de entrada” relativa à variabilidade nas condições de montagem da fonte de ruído sob teste;

δ_{rep} representa a “grandeza de entrada” relativa aos desvios nas condições de operação da fonte de ruído sob teste, em condições nominais;

δ_{mic} representa a “grandeza de entrada” relativa às incertezas devidas ao número finito de posições de microfone;

δ_T representa as determinações dos **tempos de reverberação** da câmara reverberante e suas incertezas associadas;

δ_B representa a “grandeza de entrada” relativa à medição da pressão barométrica (atmosférica) na câmara reverberante e sua incerteza associada;

δ_θ representa a “grandeza de entrada” relativa à medição da temperatura do ar na câmara reverberante e respectiva incerteza associada;

δ_A é uma “grandeza de entrada” relativa à determinação do **nível de potência sonora “ponderado A”** a partir dos níveis das bandas de frequências, e respectivas incertezas.

G.3 Contribuições para a incerteza de medição

“(…) As contribuições das respectivas “**grandezas de entrada**”²⁶ para a incerteza global são dadas pelos produtos das incertezas padrão com seus respectivos coeficientes de sensibilidade. A informação necessária para calcular a incerteza global do método direto é aquela ilustrada na Tabela 2.2 (na tese).”

As informações contidas no balanço de incertezas em forma tabular, na Tabela 2.2, foram baseadas na Equação 2.3. A qual está sendo proposta no projeto de revisão da norma ISO 3741 para o cálculo dos níveis de potência sonora; para mais detalhes sobre a Equação 2.3, ver Capítulo 3. Espera-se que este balanço de incertezas realmente auxilie os usuários da norma (laboratórios de ensaios de potência sonora em câmaras reverberantes), de

²⁵ Do original em inglês: *input quantity*, que significa literalmente “quantidade de entrada” ou “quantia de entrada”.

²⁶ Do original em inglês: *input quantities*, que significa literalmente “quantidades de entrada” ou “quantias de entrada”.

maneira que a interpretação não deixe margens de dúvida e/ou provoque dificuldades no entendimento e aplicação do mesmo.

$$L_w = \overline{L_{p(ST)}} + \left\{ 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) + 4,34 \frac{A}{S} + 10 \log \left(1 + \frac{S \cdot c}{8V \cdot f} \right) + C_1 + C_2 - 6 \right\} \text{ em dB} \quad (2.3)$$

Tabela 2.2 - Do anexo G do projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 de 2006. Balanço de incerteza para determinações de níveis de potência sonora e níveis de energia sonora usando o método direto, válido para frequências de 500 Hz a 4 kHz, ou para medições ponderadas por “curva A” de uma fonte de ruído com espectro de frequência relativamente plano.

Grandeza	Estimativa dB	Incerteza padrão u_i dB	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade c_i	Contribuição de incerteza $c_i u_i$ dB
Nível de pressão sonora	$\overline{L_{p(ST)}}$				
δ_{K_1} , fator de correção K_1	$-K_1$	$u_{L_{p(B)}}$	Normal	$\frac{10^{-0,1(\overline{L_{p(ST)}} - \overline{L_{p(B)}})}}{1 - 10^{-0,1(\overline{L_{p(ST)}} - \overline{L_{p(B)}})}}$	0,7
δ_{bgd} , ruído de fundo	K_1	$u_{L_{p(B)}}$	Normal	$10^{-0,1(\overline{L_{p(ST)}} - \overline{L_{p(B)}})}$	0,5
δ_{lim} , medidor de nível sonoro	0	0,5 dB	Normal	1	0,5
δ_{mount} , montagem	0	0,3 dB	Normal	1	0,3
δ_{rep} , repetitividade	0	$u_{\overline{L_{p(ST)}}$	Normal	1	0,3
δ_{mic} , amostragem	0	$s_M / \sqrt{N_S \cdot N_M}$	Normal	1	0,9
δ_T , tempo de reverberação	0	ΔT_{rev}		$\frac{-4.3}{T_{rev}} - \frac{240 \cdot V}{T_{rev}^2 \cdot S \cdot c}$	
δ_B , pressão barométrica	0	ΔB		$-8,7/B$	0,1
δ_θ , temperatura	0	$\Delta \theta$		$\approx 8,7/(273 + \theta)$	0,03
δ_A , ponderação "A"	0	0,3 dB	Triangular	1	0,3
TOTAL: $\sqrt{\sum_i (u_i \cdot c_i)^2}$					

A Tabela 2.2 tem um formato e simbologia similares aos dados no documento EA-4/02-S1 “Expressão da incerteza de medição na calibração (Suplemento 1 ao EA-4/02)”, e difere do formato adotado nos balanço de incertezas apresentados nos capítulos que tratam das análises de incertezas neste trabalho.

“As incertezas padrão de várias contribuições para a maioria das fontes de ruído ainda precisam ser estabelecidas através de pesquisas.” (ISO/DIS 3741:2006).

“As maiores fontes de variabilidade, além dos desvios possíveis provenientes do modelo teórico (método direto) e erros inerentes à calibração da fonte sonora de referência (método da comparação) nos métodos de ensaio especificados nesta norma internacional, são associados à amostragem inadequada do campo sonoro e variações no acoplamento acústico da fonte sonora ao campo sonoro (para diferentes câmaras reverberantes e para diferentes posições dentro de uma câmara reverberante). Em qualquer laboratório, pode ser possível reduzir a incerteza de medição por um ou mais dos seguintes procedimentos:”

- a) *uso de mais de uma posição de fonte de ruído;*
- b) *melhoramento da amostragem espacial do campo sonoro pelo aumento do número de posições de microfone, ou aumento do percurso no caso de microfone móvel;*
- c) *adição de absorvedores de baixas frequências para melhorar a sobreposição modal;*
- d) *uso de difusores móveis.*

A partir dos resultados da intercomparação laboratorial feita na Europa com participação do PTB (Alemanha) e dirigida por Vorländer (1993) foram relatadas as questões julgadas essenciais, na época, para a otimização da determinação de níveis de potência sonora **de fontes sonoras de referência** em câmaras reverberantes, dentre outras informações que foram úteis nos processos da revisão anterior da norma. As propostas publicadas no relatório da intercomparação (VORLÄNDER, 1993) para serem consideradas nas revisões de normas (especialmente²⁷ ISO 3741 e ISO 6926) foram as seguintes:

- medições com fonte de ruído sobre o piso ou elevadas;
- conjunto de no mínimo seis posições distintas de microfone;
- microfones (tipo campo de pressão / campo difuso) devem ser calibrados para campo difuso;
- no mínimo quatro posições de fonte de ruído devem ser usadas;
- todas as posições devem ser 2 m distantes umas das outras, e 1,5 m das paredes;
- para as medições dos tempos de reverberação, no mínimo seis posições de microfone e três posições de fonte eletroacústica (*loudspeaker*), cada uma com três medições de decaimentos (método da interrupção do ruído);
- T_{10} ou T_{15} devem ser medidos, ao invés de T_{30} ;
- as câmaras reverberantes não devem ser menores que 193 m^3 e não devem ter dimensão menor que 4 m.

De acordo com o projeto de revisão da norma ISO/DIS 3741 (2006): “Uma câmara reverberante grande pode ser usada para diminuir a variabilidade em baixas frequências,

²⁷ Revisões da época após 1993, sendo a revisão da norma ISO 3741 no período entre 1988 e 1999, e não a atual revisão.

apesar de que a precisão das determinações dos níveis de potência sonora em altas frequências poderá ser degradada. Reciprocamente, em uma câmara reverberante de dimensões menores poder-se-á obter variabilidade reduzida em altas frequências, porém aumentá-la em baixas frequências. Assim, se for necessário mais precisão, duas câmaras reverberantes poderão ser utilizadas, caso estejam disponíveis.”

Na questão efetiva do processo de avaliação (cálculos) de incertezas o projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006) considera que as bandas de terço de oitava não têm interdependência, ou seja, são *não-correlacionadas*. Isto pode ser observado na Subseção G.4 do Anexo G do projeto de revisão:

G.4 Incerteza expandida de medição

“Para o caso de correlação entre as “grandezas de entrada”²⁸ desprezível, a incerteza padrão combinada da determinação do nível de potência sonora, $u(L_W)$, (e similarmente para o nível de energia sonora) para o método direto é dada pela seguinte Equação 2.4:”

$$u(L_W) = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (c_i u_i)^2} \quad (2.4)$$

“O ISO GUIA (2003) requer que uma incerteza expandida, U , seja especificada, de tal forma que o intervalo $[L_W - U, L_W + U]$ corresponda, por exemplo, a 95 % dos valores de L_W que razoavelmente possam ser atribuídos à L_W . Por isto, é usado o fator de abrangência k , tal que $U = k \cdot u$. O fator de abrangência depende da distribuição de probabilidade associada ao mensurando.”

Os fatores de abrangência correspondentes a determinados níveis de confiança segundo o projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006) são dados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Fatores de abrangência especificados em função do nível de confiança desejado segundo o projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 de 2006.

Nível de confiança	Fator de abrangência
67%	1,0
80%	1,3
90%	1,6
95%	2,0
99,9%	2,6

Através dos valores de desvios padrão máximos admitidos no processo de qualificação de câmaras reverberantes, é possível notar a influência do espectro sonoro da fonte de ruído sob teste sobre o campo sonoro dentro da câmara. Na Tabela 2.4 estão os desvios padrão máximos para o caso de ensaios com fontes de ruído com espectro sonoro de banda larga,

²⁸ Do original em inglês: *input quantities*, que significa literalmente “quantidades de entrada” ou “quantias de entrada”.

ou seja, espectros sonoros sem tons puros (frequências discretas), e semelhantes a ruído branco (banda larga). Na Tabela 2.5 os valores são consideravelmente maiores, isto mostra que as tolerâncias devem ser maiores no caso de espectros sonoros irregulares e com tons de frequências discretas, sendo que o campo sonoro dentro da câmara reverberante é afetado significativamente pelas características espectrais da fonte de ruído.

Tabela 2.4 - Desvios padrão máximos permitidos dos **níveis de pressão sonora** em testes de **qualificação de câmaras reverberantes**, relativo à fontes de ruído **banda larga**. Norma ISO 3741 (1999) anexo E, e projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006) anexo C que somente especifica os correspondentes às bandas de terço de oitava.

Frequências centrais das bandas de oitava (Hz)	Frequências centrais das bandas de terço de oitava (Hz)	Desvio padrão máximo permitido (dB)
125	100 a 160	1,5
250 e 500	200 a 630	1,0
1000 e 2000	800 a 2500	0,5
4000 e 8000	3150 a 10 000	1,0

Tabela 2.5 - Desvios padrão máximos permitidos dos **níveis de pressão sonora**, s_f , em testes de **qualificação de câmaras reverberantes**, relativo à fontes de ruído **contendo componentes de frequências discretas consideráveis**. Norma ISO 3741 (1999) anexo A, e projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006) anexo D que somente especifica os correspondentes às bandas de terço de oitava.

Frequências centrais das bandas de oitava (Hz)	Frequências centrais das bandas de terço de oitava (Hz)	Desvio padrão máximo permitido s_f (dB)
125	100 a 160	3,0
250	200 a 315	2,0
500	400 a 630	1,5
1000 e 2000	800 a 2500	1,0

De fato, quanto melhor for o desempenho de determinada câmara reverberante no processo de qualificação, espera-se que as incertezas obtidas nas medições sejam menores. Isto é devido à contribuição dominante da incerteza padrão dos níveis de pressão sonora para a incerteza global de L_w .

2.1.2 Conceitos do Guia para a Expressão de Incerteza de Medição, ISO GUIA

Segundo o ISO GUIA (2003), na sua Subseção 3.3.1, “a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando”. Mesmo que sejam corrigidos os efeitos sistemáticos (conhecidos), o resultado da medição ainda é uma **estimativa** do valor do mensurando. Isto por causa da incerteza proveniente de efeitos sistemáticos e da

correção imperfeita de efeitos sistemáticos. Também de acordo com o ISO GUIA, na prática existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo:

- a) *definição incompleta do mensurando;*
- b) *realização imperfeita da definição do mensurando;*
- c) *amostragem não-representativa – a amostra medida pode não representar o mensurando definido;*
- d) *conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;*
- e) *erro de tendência pessoal na leitura dos instrumentos analógicos;*
- f) *resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;*
- g) *valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;*
- h) *valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usadas no algoritmo de redução de dados;*
- i) *aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;*
- j) *variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.*

As finalidades do ISO GUIA (2003) são apresentadas no Capítulo 1:

“(1.1) Este Guia estabelece regras gerais para avaliar e expressar a incerteza de medição que podem ser seguidas em vários níveis de exatidão e em muitos campos, desde o chão de fábrica até o da pesquisa fundamental. Os princípios deste Guia, portanto, são aplicáveis a um amplo espectro de medições, incluindo aquelas necessárias para:

- *manter o controle da qualidade e a garantia da qualidade na produção;*
- *respeitar e fazer cumprir leis e regulamentos;*
- *conduzir pesquisa básica, pesquisa aplicada e desenvolvimento na ciência e na engenharia;*
- *calibrar padrões e instrumentos e executar ensaios, através de um sistema nacional de medição, de forma a obter **rastreabilidade** até os padrões nacionais;*
- *desenvolver, manter e comparar padrões físicos de referência nacional e internacional, incluindo materiais de referência.”*

2.1.2.1 A questão do mensurando caracterizado por “valor único”

Um fato que possivelmente deve levar os pesquisadores da área de acústica a refletir sobre as questões de repetitividade, desvios padrão, incertezas padrão, definição do mensurando, dentre outras, é que em câmaras reverberantes deve-se utilizar no mínimo seis diferentes posições de microfones. E devido às características (variáveis) do próprio campo sonoro dentro de uma câmara reverberante, as características dos mensurandos níveis de pressão sonora e tempos de reverberação nestas posições distintas (e aleatórias) na câmara também variam. Exemplo disto são os desvios de níveis de pressão sonora relativamente elevados, especialmente nas bandas de baixas frequências.

Segundo o ISO GUIA (2003), o mensurando é definido e pode ser caracterizado por *um valor essencialmente único*:

*“(1.2) Este Guia está primariamente relacionado com a expressão da incerteza da medição de uma grandeza física bem definida, o **mensurando, que pode ser caracterizado por um valor essencialmente único**. Se o fenômeno de interesse pode ser representado somente como uma distribuição de valores ou é dependente de um ou mais parâmetros, tal como o tempo, então os mensurandos requeridos para sua descrição são o conjunto de grandezas que descrevem aquela distribuição ou aquela dependência.”*

Pelo fato de ser aplicável as várias áreas da ciência, o ISO GUIA apresenta margem as diversas interpretações. Isto está relacionado com a diversidade de processos de medição, de calibrações e de ensaios nos quais pode ser desejável avaliar incertezas:

“(1.3) Este Guia é também aplicável à avaliação e expressão da incerteza associada ao projeto conceitual e à análise teórica de experimentos, métodos de medição, componentes de sistemas complexos. Uma vez que o resultado de uma medição e sua incerteza podem ser conceituais e baseados inteiramente em dados hipotéticos, o termo resultado de uma medição, tal como é usado neste Guia, deve ser interpretado neste sentido mais amplo.”

ISO GUIA (2003), Capítulo 3, Subseção 3.1.3, “Na prática, o grau de especificação ou definição necessário para o mensurando é ditado pela *exatidão de medição requerida*. O mensurando deve ser definido com completeza suficiente relativa à exatidão requerida, de modo que, para todos os fins práticos associados com a medição, **seu valor seja único**. É nesse sentido que a expressão “valor do mensurando” é usada neste *Guia*.”

“(3.1.5) Supõe-se que as variações em observações repetidas surjam porque as **grandezas de influência** que possam afetar o resultado de medição **não** são mantidas completamente constantes.”

*“(3.2.2) O **erro aleatório** presumivelmente se origina de variações temporais ou espaciais, estocásticas ou imprevisíveis, **das grandezas de influência**. Os efeitos de tais variações, daqui para a frente denominados efeitos aleatórios, são a causa de **variações em observações repetidas do mensurando**. Embora não seja possível compensar o erro aleatório de um resultado de medição, ele pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de observações; sua esperança ou valor esperado é zero.”*

*“NOTA 1: O **desvio padrão experimental da média** ou média de uma série de observações **não** é o erro aleatório da média embora ele assim seja designado em algumas publicações. Ele é, em vez disso, uma medida da incerteza da média devida a efeitos aleatórios. O valor exato do erro na média, que se origina destes efeitos, não pode ser conhecido.”*

Segundo o ISO GUIA (2003), na sua Subseção 3.2.2 (acima), as variações que causam os denominados erros aleatórios são atribuídas às **grandezas de influência**, e **não** ao mensurando. No caso da variação causada por diferentes posições de microfone(s) em uma

câmara reverberante, a variação espacial efetivamente acarreta variações no mensurando; ou mensurandos (níveis de pressão sonora, L_p , e tempos de reverberação, T_{rev}).

ISO GUIA (2003), Capítulo 4, Subseção 4.1.1, na maioria dos casos o mensurando Y não é medido diretamente, mas é determinado a partir de N outras grandezas X_1, X_2, \dots, X_N através de uma relação funcional f :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

*“NOTA 1, (...) neste Guia será usado o mesmo símbolo para a grandeza física (o mensurando) e para a variável aleatória que representa o possível resultado de uma observação dessa grandeza. Quando é declarado que X_i tem uma determinada distribuição de probabilidade, o símbolo é usado neste último sentido e **supõe-se** que a própria grandeza física possa ser **caracterizada por um valor essencialmente único**.”*

Novamente o ISO GUIA (2003) atribui ao mensurando característica de “valor essencialmente único”. Isto deve levar os pesquisadores, especialmente da área de acústica, a refletir sobre a questão da estimativa de incerteza no caso de n medições repetidas, se é adequado utilizar os desvios padrão, ou os desvios padrão experimentais da média, no processo de avaliação das incertezas do Tipo A.

Com relação às determinações de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes surgem *questões-chave*, tais como: As posições de microfone(s) são grandeza(s) de influência? Ou cada posição de microfone deve ser considerada um mensurando “único”? Ou ambos os conceitos podem ser considerados consistentes no contexto de medições em câmaras reverberantes?

De fato, parece haver um certo grau de subjetividade neste tipo de ensaio, isto devido às posições aleatórias dos microfones, posições da fonte de ruído, influências do campo sonoro, das bandas de frequências de interesse, e da própria complexidade da definição do mensurando (níveis de potência sonora).

2.1.2.2 A expressão “incerteza da incerteza”

Incertezas denominadas do Tipo B podem ser obtidas de fontes de informações tais como certificados de calibração, manuais e certificados de fabricantes. Mas qual é a confiabilidade que se deve esperar deste tipo de incerteza? Ela é menos confiável, ou tem menos qualidade, que a estimativa do Tipo A? O ISO GUIA (2003) aborda esta questão através de um “parâmetro” que é denominado “incerteza da incerteza”. De fato, este parâmetro não foi calculado neste trabalho de tese, mas é citado nos capítulos que tratam justamente da análise dos diversos ensaios realizados no contexto deste trabalho.

ISO GUIA (2003) anexo E (*Motivação e base para a Recomendação INC-1 (1980)*), (E.4.3) “As avaliações baseadas em observações repetidas **não** são necessariamente superiores àquelas obtidas por outros meios. Considere $s(\bar{q})$ o desvio padrão experimental da média de n observações q_k independentes de uma variável q aleatória, distribuída normalmente. A grandeza $s(\bar{q})$ é uma estatística que estima $\sigma(\bar{q})$, o desvio padrão da distribuição da probabilidade de \bar{q} , que é o desvio padrão da distribuição dos valores de \bar{q} que seria obtido se a medição fosse repetida um número infinito de vezes. A variância $\sigma^2[s(\bar{q})]$ de $s(\bar{q})$ é dada, aproximadamente, por $\sigma^2[s(\bar{q})] = \sigma^2(\bar{q})/2\nu$ (E.7 no ISO GUIA), onde $\nu = n - 1$ é o número de graus de liberdade de $s(\bar{q})$. Assim o desvio padrão relativo de $s(\bar{q})$, que é dado pela razão $\sigma[s(\bar{q})]/\sigma(\bar{q})$ e que pode ser tomado como uma medida da incerteza relativa de $s(\bar{q})$, é, aproximadamente, $[2(n-1)]^{-1/2}$. Esta “incerteza da incerteza” de \bar{q} que decorre do motivo puramente estatístico da amostragem limitada, pode ser surpreendentemente grande; para $n = 10$ observações, é de 24 por cento. (...) Isto mostra que o desvio padrão de um desvio padrão estatisticamente estimado não é desprezível para valores práticos de n . Pode-se, portanto, concluir que as avaliações Tipo A da incerteza padrão **não** são necessariamente mais confiáveis do que as avaliações do Tipo B, e em muitas situações práticas de medições, onde o número de observações é limitado, os componentes obtidos por avaliações do Tipo B podem ser mais bem conhecidos do que os componentes obtidos de avaliações do Tipo A.”

2.1.2.3 A questão da correlação entre grandezas de entrada

Durante a análise e levantamento das diversas fontes de incertezas em processos de medição, eventualmente surgem suspeitas de que pode haver correlações entre as grandezas de entrada. Foi o caso das bandas de terço de oitava utilizadas para as medições dos níveis de pressão sonora em câmaras reverberantes, dentre outros ambientes. Durante o ajuste da sensibilidade (ganho) do analisador de sinais, processo no qual é necessário usar o calibrador de nível sonoro, as bandas de terço de oitavas são ajustadas com base em uma única frequência (e único nível de pressão sonora) gerados pelo calibrador. Isto levantou a suspeita da existência de correlações, as quais podem ser mascaradas pelo fato de ser “o mesmo instrumento medindo diversos mensurandos”; ver (5.2.4) a seguir. A seguir é apresentado o conceito estabelecido no ISO GUIA (2003) para a questão de correlações entre as grandezas de entrada em processos de medição.

“(5.2.3) Considere duas médias aritméticas \bar{q} e \bar{r} que estimam as esperanças μ_q e μ_r de duas grandezas q e r , variando aleatoriamente, e calcule \bar{q} e \bar{r} a partir de n pares independentes de observações simultâneas de q e r , feitas sob as mesmas condições de medição. Então a covariância de \bar{q} e \bar{r} é estimada por:

$$s(\bar{q}, \bar{r}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})(r_k - \bar{r})$$

onde q_k e r_k são as observações individuais das grandezas q e r , e \bar{q} e \bar{r} são calculados a partir das observações *e através de média aritmética*. Se, de fato, as observações **não** são *correlacionadas*, espera-se que a covariância calculada fique próxima de zero. (...)”

“(5.2.4) Pode existir *correlação* significativa entre duas grandezas de entrada, se os mesmos instrumentos de medição, **padrão de medição físico**, ou dados de referência, tendo uma incerteza padrão significativa, são usados na sua determinação.”

“Por exemplo, se um certo termômetro é usado para determinar uma correção de temperatura requerida na estimativa do valor de uma grandeza de entrada X_i , e o mesmo termômetro é usado para determinar uma correção similar de temperatura requerida na estimativa de grandeza de entrada X_j , as duas grandezas de entrada poderiam estar significativamente *correlacionadas*. Contudo, se X_i e X_j , neste exemplo, são redefinidas para serem grandezas não-corrigidas, e as grandezas que definem a curva de calibração para o termômetro estão incluídas como grandezas de entrada adicionais, com incertezas padrão independentes, a *correlação* entre X_i e X_j é eliminada.”

“(5.2.5) (...) Em muitos casos, os efeitos de tais influências têm *interdependência* desprezível, e as grandezas de entrada afetadas podem ser supostas como não-correlacionadas. Entretanto, se elas não podem ser supostas como *não-correlacionadas*, suas próprias *correlações podem ser evitadas*, se influências comuns são introduzidas como grandezas de entrada independentes adicionais, como indicado em 5.2.4 (do ISO GUIA).”

No Capítulo 6, que trata dos modelos de cálculos de incertezas, a idéia de elaborar o *Método 2 (Partes 1 e 2)* é baseada na afirmação acima (ISO GUIA em 5.2.5), adicionando a incerteza padrão atribuída ao calibrador sonoro (u_{cal}) ao valor de incerteza padrão do valor de nível de potência sonora global em dB(A). Desta forma, pretende-se “evitar as correlações entre as bandas de terço de oitavas” ocasionadas por influências comuns.

2.1.3 Abordagens para avaliação de incertezas de medição em laboratórios de ensaio

Segundo PRIEL (2005), há várias alternativas de abordagens de avaliação de incertezas para os laboratórios: “abordagem através de modelagem / de modelo matemático” (*modelling approach*), “abordagem por simples validação em laboratório” (*single laboratory validation approach*), “abordagem por validação interlaboratorial” (*inter-laboratory validation approach*), e “abordagem por teste de proficiência” (*proficiency testing approach*). (Ver Figura 3). As novas abordagens para a avaliação de incertezas irão aperfeiçoar os resultados de medições e relatórios de ensaios, e também a sua rastreabilidade.

Muitas decisões importantes são baseadas em medições e resultados de ensaios. Os ensaios podem ser usados, por exemplo, para avaliar os níveis de ruído, verificar materiais em função de especificação ou limites de tolerância. Sempre que decisões são baseadas em medições, é importante ter indicação da qualidade dos resultados. A incerteza de medição é o modo mais simples de expressar a confiabilidade do resultado. Desde quando a norma ISO/IEC 17025²⁹ foi publicada em 2000, o conceito de incerteza medição ou resultados de ensaios parece ser a questão chave para os laboratórios e seus clientes. Até este momento, somente laboratórios de calibração estiveram profundamente envolvidos com a questão de avaliação de incertezas. O conceito de incerteza é certamente difícil de entender e de admitir por pessoas que não estão familiarizadas com atividades técnicas. Atualmente as equipes que trabalham com ensaios reconhecem a importância de se declarar a incerteza relacionada a medições específicas tão quanto é importante relatar o próprio resultado da medição. Também é claro que uma medição ou um resultado de ensaio sem uma avaliação da sua confiabilidade é completamente inútil. Sem conhecer a incerteza é impossível avaliar a comparação entre diferentes medições do mesmo parâmetro, ou comparar um resultado com a especificação limite (tolerância). Resultados de medições e ensaios representam a informação básica para a declaração de conformidade de vários produtos ou atividades.

A avaliação da incerteza é muitas vezes considerada como uma tarefa difícil e árdua. O “Guia para a expressão da incerteza de medição” (ISO GUIA ou ISO GUM) fornece conceitos aceitos internacionalmente, recomendações e um procedimento para a avaliação de incerteza. Consistência com o ISO GUIA requer que o conceito básico seja aceito e as recomendações sejam seguidas.

²⁹ Versão em português: NBR ISO/IEC 17025 : 2001 “Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”.

Segundo PRIEL (2005), existem três níveis no ISO GUIA (2003) que podem ser identificados: (1) conceitos básicos, (2) recomendações e (3) procedimento de avaliação. Com relação ao procedimento de avaliação de incertezas, o qual é resumido no Capítulo 8 do ISO GUIA, PRIEL afirma que evoluções irão aparecer logo. Através de um documento que pode ser denominado “Suplemento 1 ao ISO GUIA”³⁰ haverá recomendações a respeito de métodos numéricos para a *propagação de distribuições*.

No procedimento apresentado pelo ISO GUIA recomenda-se a aplicação da lei de propagação de incertezas. O modelo tem grandezas de entrada independentes, por exemplo $X = (X_1, X_2, X_3)^T$, cujo valor é estimado por x_i com uma incerteza padrão associada $u(x_i)$. O valor da grandeza de saída Y é estimada por y , com uma incerteza padrão associada $u(y)$. A ilustração deste modelo é dado na Figura 1.

A lei de propagação de incertezas dada pela Equação 2.5 é baseada na série de Taylor de primeira ordem; onde $u_c^2(y)$ é a incerteza padrão combinada, $\partial f / \partial x_i$ são as derivadas parciais da grandeza de saída por cada grandeza de entrada, $u(x_i, x_j)$ são as covariâncias entre x_i e x_j ; (ISO GUIA, 2003; PRIEL, 2005).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2.5)$$

Segundo PRIEL (2005), no documento “*GUM supplement 1*” (ISO GUIA suplemento 1) é proposto propagar distribuições ao invés da propagação de variância³¹ (incertezas padrão) como é descrito no procedimento do Capítulo 8 do ISO GUIA. A Figura 2 ilustra este conceito de propagação de distribuições.

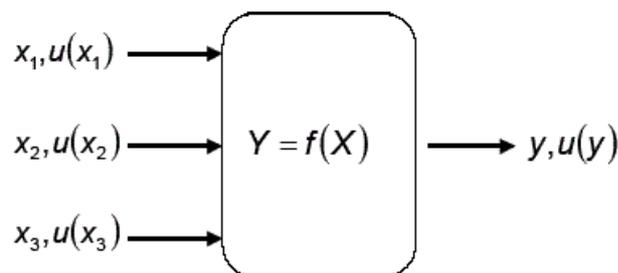


Figura 1 - Ilustração da lei de propagação de incertezas. Fonte: PRIEL 2005

³⁰ *Supplement 1 to the GUM.*

³¹ Incertezas padrão.

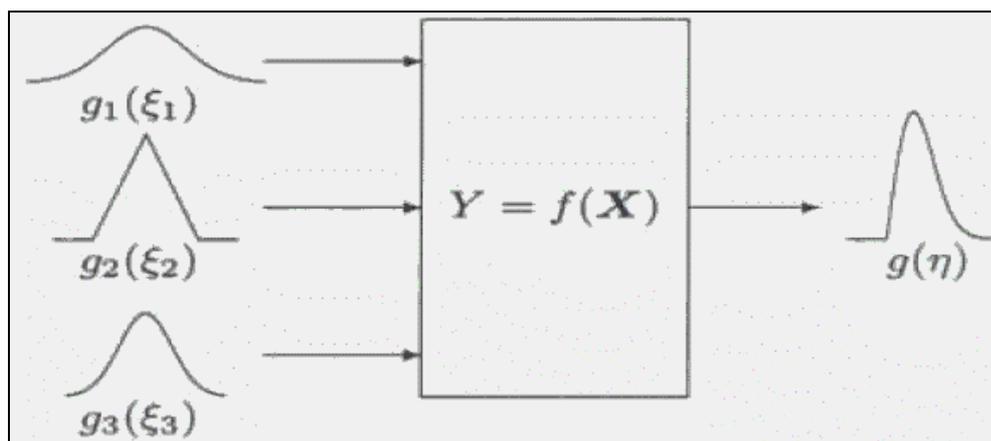


Figura 2 - Ilustração da lei de propagação de distribuições. Fonte: PRIEL 2005.

Na Figura 2 são dadas distribuições através de funções densidade de probabilidade (FDP), para X_i , sendo $i = 1, 2, 3$; distribuições gaussiana, triangular e gaussiana respectivamente. A função densidade de probabilidade $g(\eta)$ atribuída à grandeza de saída Y tem um formato assimétrico (Figura 2), como pode ocorrer para modelos não lineares. Também pode ocorrer assimetria na função densidade de probabilidade da grandeza de saída causada por assimetria das FDP das grandezas de entrada.

De acordo com WIESE (2003), “O Guia para a expressão da incerteza de medição é uma ferramenta apropriada para calcular intervalos que contêm uma certa fração de resultados de medições. Mas para a avaliação das grandezas do campo sonoro a partir de médias de poucos valores medidos, o ISO GUIA deve ser usado com cuidado. A simples avaliação linear pode levar a resultados insatisfatórios. Às vezes a questão recai sobre qual grandeza tem distribuição que mais se assemelha a uma distribuição gaussiana: a representação energética ou logarítmica do resultado³². (No caso onde a representação logarítmica tem distribuição normal, a distribuição dos resultados representados através da grandeza energética seria denotada como log-normal). Esta questão não pode ser respondida de forma generalizada, porque depende das propriedades do campo sonoro medido. **Porém, através da média energética de um número crescente de posições de medição, ambas as representações irão convergir para uma distribuição gaussiana.**”

PRIEL (2005) enfatiza a importância da norma ISO 17025 (2001) na implementação da avaliação e expressão da incerteza em laboratórios de calibração e ensaio. Além disto, afirma que o ISO GUIA e a norma ISO 5725 têm respaldo para serem utilizadas em diferentes abordagens de avaliações de incertezas de medição.

³² Representação energética é função da pressão sonora ao quadrado, enquanto que a representação logarítmica é dada em decibéis.

A norma³³ ISO/IEC 17025 em sua Subseção 5.4.6 que trata da incerteza de medição, se refere à norma³⁴ ISO 5725 e ao ISO GUIA no mesmo nível de importância para que sejam obtidas maiores informações sobre incertezas; ver nota 3 em 5.4.6.3 da norma ISO/IEC 17025. Portanto parece importante para laboratórios de ensaio desenvolver abordagens consistentes baseadas nos conceitos e recomendações do ISO GUIA, porém é possível usar outros métodos além do estabelecido no Capítulo 8 do ISO GUIA.

As quatro abordagens de avaliação de incertezas citadas anteriormente, e classificadas por PRIEL (2005), são esboçadas na Figura 3. Esta classificação é baseada na distinção entre as avaliações de incertezas desenvolvidas por um único laboratório, denominada abordagem *intralaboratorial*³⁵, e as avaliações de incertezas baseadas em estudos colaborativos; abordagem *interlaboratorial*. Estas abordagens têm sido apresentadas em documentos tais como “EA-4/16 – Guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing” (2004) e “Estimer l’incertitude – Mesures & Essais” (PERRUCHET e PRIEL, 2000).

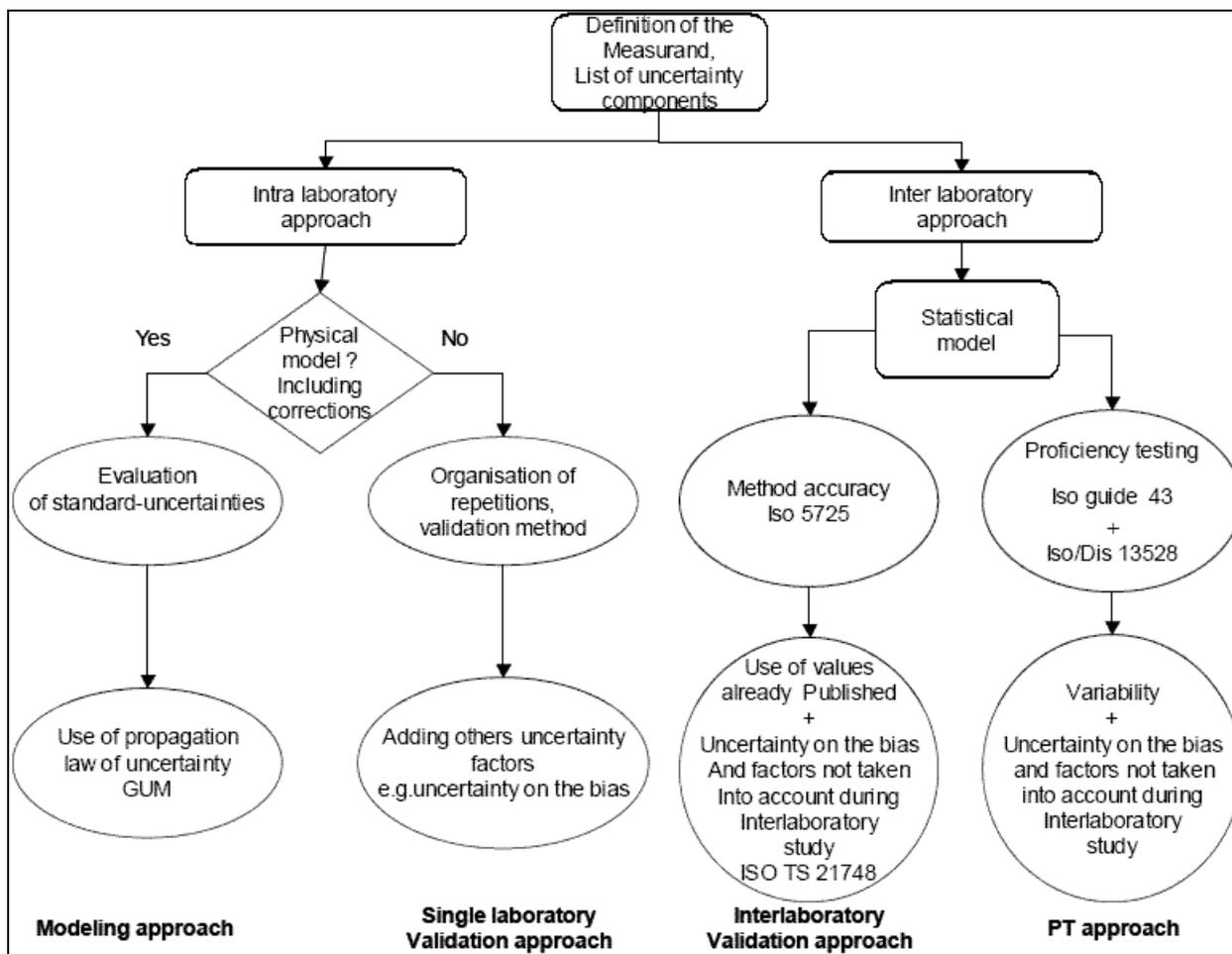


Figura 3 - Diagrama ilustrativo dos métodos de avaliação de incertezas em laboratórios. Fonte: PRIEL 2005.

³³ Versão em português: NBR ISO/IEC 17025 : 2001 “Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”.

³⁴ ISO 5725 : 1994 – Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results.

³⁵ Intra-laboratory approach.

As abordagens podem ser subdivididas em:

- Modelar o processo de medição e usar a lei de propagação de incertezas e abordagem através de validação por um único laboratório³⁶,
- uso dos dados de desempenho do método (ISO 5725) e dados de testes de proficiência (“ISO-GUIA 43”³⁷) para abordagens interlaboratoriais.

Neste trabalho de tese foi usada a abordagem através de modelo matemático do mensurando; *modeling approach*.

2.1.3.1 Abordagem através de modelo matemático

Procedimento de avaliação de incertezas descrito no Capítulo 8 do ISO GUIA (2003). É baseado em modelo matemático formulado para levar em consideração as influências das grandezas de entradas sobre a grandeza de saída (mensurando). Correção (ou correções) é (são) incluída(s) ao modelo para computar os efeitos sistemáticos; tais correções são essenciais para alcançar rastreabilidade às referências estabelecidas, por exemplo, materiais de referência certificados (*CRMs*). O modelo é muitas vezes expressado por meio de equação, por isto é denominado modelo matemático no ISO GUIA. A aplicação da lei de propagação de incertezas permite avaliar os componentes da incerteza combinada a partir das diversas contribuições. PRIEL (2005).

2.1.3.2 Comentários sobre as abordagens de avaliações de incertezas

Em um passado recente, laboratórios de ensaio queixavam-se sobre as dificuldades encontradas na tarefa de avaliar incertezas de medição. Muitos deles estavam relutantes em aplicar a lei de propagação de incertezas, isto devido à aparente complexidade matemática, dentre outros motivos. A definição do mensurando e detalhes do processo de medição também podem ser motivos de dificuldades para a avaliação das incertezas.

As mesmas dificuldades persistem, seja qual for o método usado para avaliar a incerteza do resultado de medição. É essencial definir claramente o mensurando e analisar cuidadosamente o processo de medição com objetivo de identificar os fatores que influenciam o resultado. Estas duas tarefas requerem mais competência técnica em métodos de medição do que habilidades matemáticas; PRIEL (2005).

³⁶ *Single laboratory validation approach.*

³⁷ *ISO-Guide 43.*

2.2 Modelos de cálculos de incertezas em determinações de níveis de potência sonora

FRADIQUE e LEAL (1999) apresentam um artigo cujo título parece ser uma generalização da avaliação de incertezas em acústica; “Cálculo de incertezas em laboratórios de ensaios acústicos”. Porém se trata de uma aplicação de cálculo de incertezas na medição de exposição ao ruído. Nesta aplicação são usados os conceitos estabelecidos no ISO GUIA, através de cálculos de coeficientes de sensibilidades (específicos daquele tipo de medição) e incertezas padrão combinada.

Com relação aos modelos de cálculos de incertezas de determinação de níveis de potência sonora L_W em câmaras reverberantes, foram obtidos dois modelos (de certa forma semelhantes) que tratam do método da comparação com fonte sonora de referência para medir L_W . Um destes modelos foi apresentado por COSTA-FELIX (2000) e outro por (BESSAC e BLANQUART, 2005). O modelo de COSTA-FÉLIX é apresentado em detalhes no Capítulo 6 (e comentado mais adiante), e o modelo de (BESSAC e BLANQUART, 2005) é apresentado e comentado a seguir.

A aplicação prática do modelo de cálculo de incertezas de (BESSAC e BLANQUART, 2005) foi feita em “**Medição de nível de potência sonora de condicionadores de ar em câmara reverberante: Estimativa das incertezas e seu uso em laboratório**”. Na verdade os condicionadores de ar utilizados são chamados *chillers*. Segundo (BESSAC e BLANQUART, 2005), “um laboratório de ensaios dedicado a medições acústicas requer o conhecimento de suas incertezas”. Segundo estes autores:

“Um único decibel pode ter uma forte influência em assuntos comerciais ou programas de certificação, e há interesses consideráveis em jogo. No campo de nível sonoro de aparelhos condicionadores de ar, CETIAT³⁸ tem implementado o “Guia para a expressão da incerteza de medição”, abordado com objetivo de desenvolver uma análise profunda da metodologia de medição e finalmente mostrar os estágios críticos. A determinação de níveis de potência sonora de condicionadores de ar³⁹ é usada, de acordo com ISO 3741 em câmara reverberantes.”

O ISO GUIA (2003) *requer que as grandezas independentes sejam identificadas*, as quais são então incluídas na “lei de propagação de incertezas” e isto mostra a importância das incertezas padrão e coeficientes de sensibilidade para cada frequência. Uma análise permite que os componentes de incerteza sejam classificados, além de ser possível quantificar suas

³⁸ Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques – França.

³⁹ Do original em inglês: *air chilled package units*.

influências sobre os valores de cada banda de terço de oitava, tanto quanto sobre o nível sonoro global.

BESSAC (2005) comentou no *simpósio sobre incerteza de medições acústicas*⁴⁰ que: (1) foram encontrados valores de incerteza expandida de níveis de potência sonora $U(L_w)$ para fontes sonoras de referência que são da ordem de 0,25 dB para diferentes posições de fonte e microfone, e da ordem de 0,16 dB para posição fixa; (2) para fontes de ruídos que apresentam tons puros, espectro com frequências discretas, a incerteza pode aumentar dramaticamente; (3) a generalização da questão da incerteza de medição de níveis de potência sonora é difícil porque há diferenças significativas entre as máquinas sob teste (fontes de ruído); (4) repetir as medições de níveis de pressão sonora L_p tem importância considerável.

A abordagem inicial para incerteza acústica foi baseada em números plausíveis, por exemplo 3 dB, a qual podia ser encontrada em algumas seções de normas internacionais (ISO 3740, etc). Claramente havia uma falta de fundamentação e abordagem científica, mas era uma maneira fácil de dar uma resposta às dúvidas levantadas pelos consumidores. Para estabelecer a incerteza de uma medição específica, entretanto, não é razoável apenas usar valores dados por normas acústicas. Isto sem considerar as características específicas de instalação e operação dos aparelhos ensaiados. (BESSAC e BLANQUART, 2005).

Quando um consumidor solicita a um laboratório para que seja determinado o nível sonoro de um de seus aparelhos, três aspectos têm que ser considerados com relação à incerteza de medição:

1. O primeiro aspecto relacionado com o laboratório propriamente. Qual é a incerteza associada com a medição feita em um aparelho específico, quando um procedimento (e/ou norma) específico⁴¹ é seguido? Se o ensaio tem que ser feito novamente alguns meses depois, em qual intervalo de confiança se pode encontrar o resultado novamente?
2. Segundo aspecto diz respeito ao método. Em que grau de concordância este método, quando aplicado por diversos laboratórios, dá o mesmo resultado? O problema, portanto, é executar ensaios comparativos entre laboratórios em um aparelho exclusivo e único, com objetivo de determinar as divergências causadas pelo método de ensaio (e sua interpretação) em diferentes laboratórios.
3. Em terceiro lugar, quando um fabricante envia um aparelho para ser testado, está implícito que aquele material é representativo com relação à linha de produção. De qualquer forma, o processo de fabricação pode também causar variação no desempenho acústico. Esta questão deve ser quantificada pelo

⁴⁰ “Symposium uncertainty-noise Le Mans” *Managing uncertainties in noise measurements and predictions: a new challenge for acousticians*.

⁴¹ Do original em inglês: *specific test code*.

fabricante, através de estimativa da dispersão de características de desempenho acústico da sua produção.

(BESSAC e BLANQUART, 2005) utilizaram a norma europeia específica para ensaios de determinação de níveis de potência sonora de *chillers*⁴² denominada XP ENV 12102, norma que estabelece os pontos de operação do aparelho e se refere às normas acústicas para as questões de medição do nível sonoro.

Com base na “lei de propagação de incertezas”, (BESSAC e BLANQUART, 2005) elaboraram um modelo de cálculo de incertezas que é apresentado através das Equações 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9. Este modelo é específico para a determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método da comparação com fonte sonora de referência.

$$L_W^{ac} = L_W^{RSS} - (L_p^{RSS} - L_p^{ac}) \quad (2.6)$$

$$L_p^{ac} = 10 \log \left(10^{L_p^{ac_measured}/10} - 10^{L_p^{bg_noise}/10} \right) \quad (2.7)$$

$$u_c^2(L_W^{ac}) = \left(\frac{\partial L_W^{ac}}{\partial L_p^{ac_meas.}} \right)^2 u^2(L_p^{ac_meas.}) + \left(\frac{\partial L_W^{ac}}{\partial L_p^{RSS}} \right)^2 u^2(L_p^{RSS}) + \left(\frac{\partial L_W^{ac}}{\partial L_p^{bg_noise}} \right)^2 u^2(L_p^{bg_noise}) + \left(\frac{\partial L_W^{ac}}{\partial L_W^{RSS}} \right)^2 u^2(L_W^{RSS}) \quad (2.8)$$

$$u_c^2(L_W^{ac}) = \left(10^{0,1(L_p^{ac_meas.} - L_p^{ac})} \right)^2 u^2(L_p^{ac_meas.}) + u^2(L_p^{RSS}) + \left(10^{0,1(L_p^{bg_noise} - L_p^{ac})} \right)^2 u^2(L_p^{bg_noise}) + u^2(L_W^{RSS}) \quad (2.9)$$

onde: L_W^{ac} é o nível de potência sonora do condicionador de ar, *air conditioner*; a ser determinado;

L_W^{RSS} é o nível de potência sonora da fonte sonora de referência;

L_p^{RSS} é o nível de pressão sonora medido com fonte sonora de referência na câmara reverberante;

L_p^{ac} é o nível de pressão sonora corrigido em função do ruído de fundo, e corresponde ao nível de pressão sonora gerado pelo condicionador de ar na câmara reverberante;

$L_p^{ac_meas.}$ é o nível de pressão sonora efetivamente medido na câmara reverberante com o condicionador de ar em funcionamento; incluindo o ruído de fundo inerente a esta medição.

(BESSAC e BLANQUART, 2005) comentam sobre a influência das bandas de terço de oitava sobre a incerteza do nível global de potência sonora. Basicamente o efeito é o mesmo que ocorre nas medições de níveis de pressão sonora, nas quais os níveis mais elevados

⁴² Equipamento que refrigera água, em um circuito condicionador de ar.

(com mais energia) predominam na questão das contribuições de incertezas do valor de nível de pressão sonora global, WITTSTOCK (2003).

“O coeficiente de sensibilidade é proporcional à potência da banda de frequência considerada dividida pela potência total. As incertezas associadas com as bandas de frequência dominantes irão influenciar fortemente a incerteza do nível global.” (BESSAC e BLANQUART, 2005)

“A incerteza de níveis de pressão sonora globais em dB(A) dependem da distribuição espectral do som a ser medido, isto porque o coeficiente de sensibilidade do i-ésimo componente de frequência é simplesmente a contribuição energética deste componente para o valor global em dB(A).” WITTSTOCK (2003).

2.2.1 Influências das posições de fonte de ruído na incerteza dos níveis de potência sonora

Nos ensaios realizados por (BESSAC e BLANQUART, 2005) e com base em cálculos de incertezas segundo método estabelecido no ISO GUIA (2003), foi demonstrada forte influência das posições de microfones e da fonte sonora de referência (RSS)⁴³, predominantemente em baixas frequências. O efeito pode ser observado nos resultados apresentados através do gráfico da Figura 4.

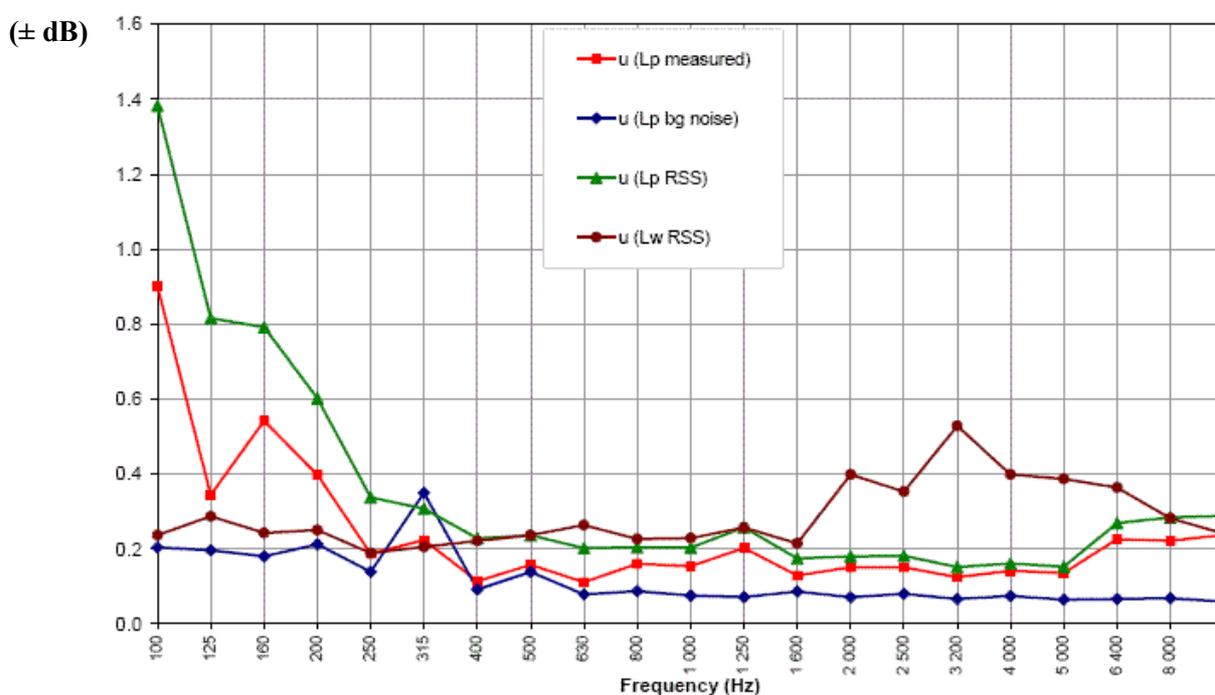


Figura 4 - Incertezas padrão de cada variável independente; em medições de fonte sonora de referência. Incertezas padrão dos Lp medidos, dos Lp de ruído de fundo, dos Lp de Lw da fonte sonora de referência (RSS). Fonte: BESSAC e BLANQUART, 2005

(NABUCO DE ARAUJO, 1998) desenvolveu um conjunto de medições experimentais no INMETRO com um total de quarenta liquidificadores, de oito modelos

⁴³ Reference sound source.

diferentes sendo cinco unidades de cada modelo; de três fabricantes distintos. Foram realizados ensaios de repetitividade com três dos liquidificadores, de três a sete medições, dentre outros ensaios. Estes ensaios foram baseados na norma⁴⁴ ISO 3743-1, utilizando o método da comparação com fonte sonora de referência (RSS). Com relação aos desvios padrão estabelecidos na norma, quando os valores ultrapassam determinado valor é solicitado que seja feito ensaio em mais que uma posição de fonte de ruído. Neste caso (NABUCO DE ARAUJO, 1998) relata que ao utilizar duas posições de fonte de ruído (liquidificador) dentro da câmara reverberante, o desvio padrão do conjunto de resultados obtidos pode aumentar.

“Os demais ensaios apresentaram resultados interessantes em relação ao número de posições de fonte ensaiada a ser utilizado. Embora apenas 4 dos 40 liquidificadores tenham resultado em desvios padrão espacial de níveis de pressão sonora L_p na posição 1 acima de 2,5 dB (com número de posições de microfone igual a 6), o que obrigaria o uso de duas posições do liquidificador (segundo ISO 3743-1 : 1994, p.7), houve casos em que com o uso de duas posições o desvio padrão aumentou.”

Isto demonstra a variabilidade do campo sonoro em função das posições de fonte de ruído escolhidas na câmara reverberante utilizada. As mudanças de posições de microfones semelhantemente influenciam os desvios padrão dos resultados obtidos experimentalmente.

Nos ensaios com uma fonte sonora padrão de referência de (BESSAC e BLANQUART, 2005) relacionados com as incertezas dadas no gráfico da Figura 4, foram calculadas as incertezas associadas aos níveis de potência sonora globais em dB e dB(A) que resultaram em 0,9 dB e 0,2 dB(A), respectivamente. Porém não fica claro que fonte sonora (fonte de ruído) foi utilizada para obter estes valores experimentais.

Em aplicações dos cálculos de incertezas com *chillers* notou-se elevados valores de incertezas nas bandas de 315 e 400 Hz e em altas frequências, ver gráfico da Figura 5. Isto principalmente devido à mudança da localização da fonte de ruído (*chiller*) dentro da câmara reverberante. Além disto, as análises indicam que as instabilidades do aparelho influenciam principalmente a banda de 315 Hz. Foram usados dois *chillers* encontrados no mercado (França).

No gráfico da Figura 6 são apresentados os valores de incertezas⁴⁵ dos *chillers 1 e 2* ensaiados por (BESSAC e BLANQUART, 2005). O segundo *chiller* apresentou um comportamento muito instável em função do tempo. Isto foi considerado uma questão relacionada com ligeiras mudanças no ponto de operação daquele equipamento especificamente. O **desvio padrão** para este tipo de situação torna-se alto, e pode ficar mais elevado em função da mudança de posição do aparelho dentro da câmara reverberante.

⁴⁴ ISO 3743-1 (1994) – *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources – Engineering methods for small, movable sources in reverberation fields – Part 1: Comparison method for hard-walled test rooms.*

⁴⁵ Estimados com base nos níveis de potência sonora do *chiller 1*.

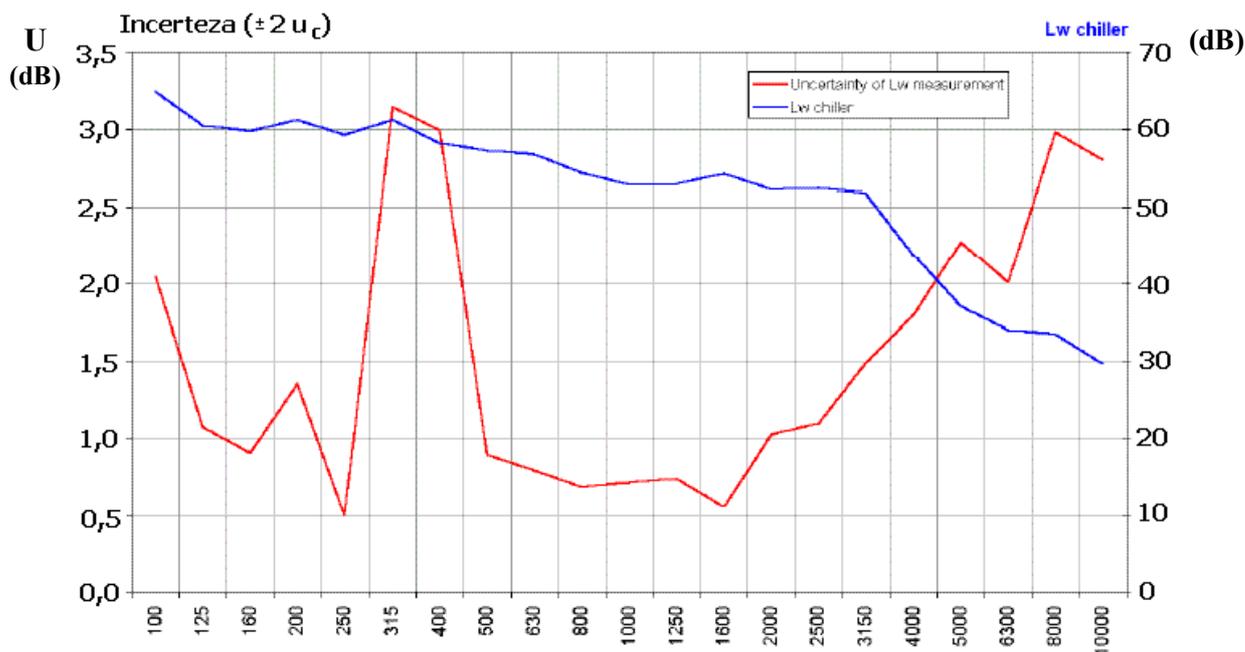


Figura 5 - Níveis de potência sonora do “chiller 1” (unidade condicionadora de ar), e suas incertezas estimadas; gráfico com duas coordenadas para Y. Normas XP ENV 12102 e ISO 3741. Fonte: BESSAC e BLANQUART, 2005.

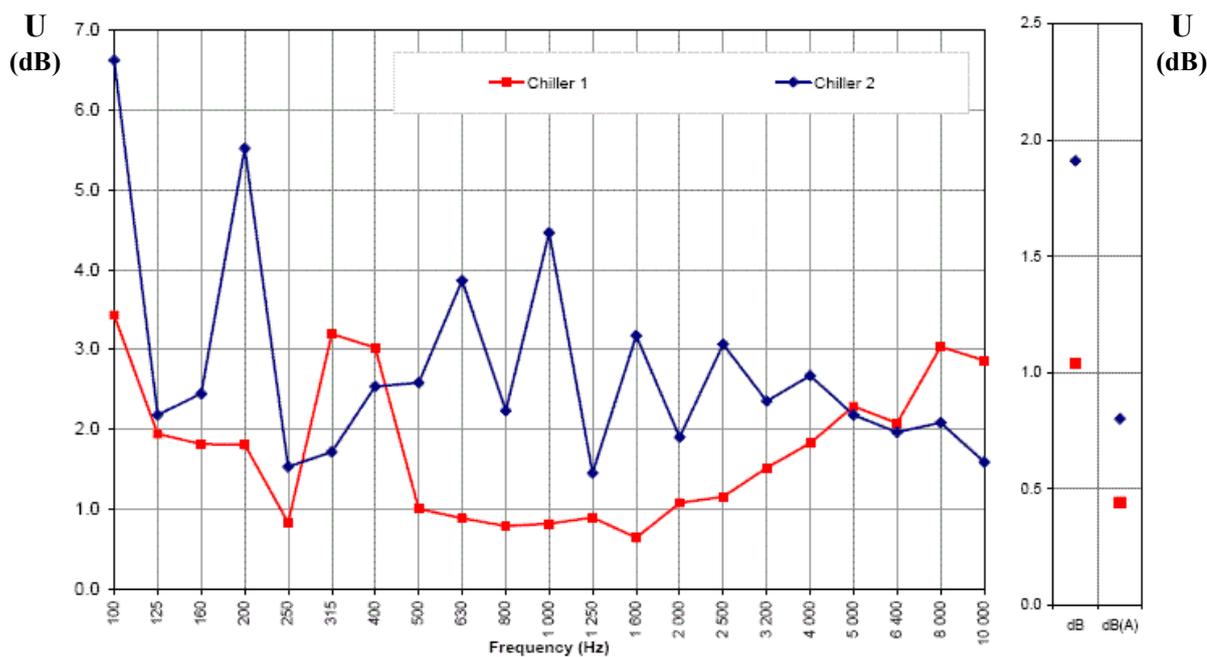


Figura 6 - Incertezas expandidas estimadas no CETIAT (França) para aparelhos condicionadores de ar (chillers) em câmara reverberante. Normas XP ENV 12102 e ISO 3741. Fonte: BESSAC e BLANQUART 2005.

Os dados de incertezas calculados por (BESSAC e BLANQUART, 2005) que são apresentados na Tabela 2.6 mostram que a localização dos microfones e a localização da fonte de ruído têm forte influência sobre os resultados das estimativas de incertezas. As conseqüências da mudança de posição da respectiva fonte de ruído são consideravelmente maiores nas estimativas de incerteza em dB; e menos significativas em dB(A). De acordo com (BESSAC e BLANQUART, 2005), “isto é realmente lógico porque a influência da localização é sentida

principalmente em baixas frequências por *razões modais*⁴⁶. E, portanto, o impacto em dB(A) é menos significativo”. Isto pode ser observado também através dos dados apresentados no gráfico da Figura 7, sendo que ao se usar mais de uma posição de fonte sonora de referência (RSS) os desvios dos L_p medidos tendem a aumentar, consequentemente as incertezas estimadas para L_W aumentam, principalmente em baixas frequências.

Tabela 2.6 - Influência do parâmetro “posição de microfones e de fonte de ruído / fonte sonora padrão de referência”, (cálculos baseados no mesmo espectro de níveis de potência sonora). Fonte: BESSAC e BLANQUART 2005.

Fonte de ruído	Posição	Incerteza dB	Incerteza dB(A)
Fonte sonora de referência	Não fixada	0,94	0,23
	Fixada	0,25	0,18
Chiller 1	Não fixada	1,04	0,44
	Fixada	0,48	0,42
Chiller 2	Não fixada	1,91	0,80
	Fixada	0,95	0,79

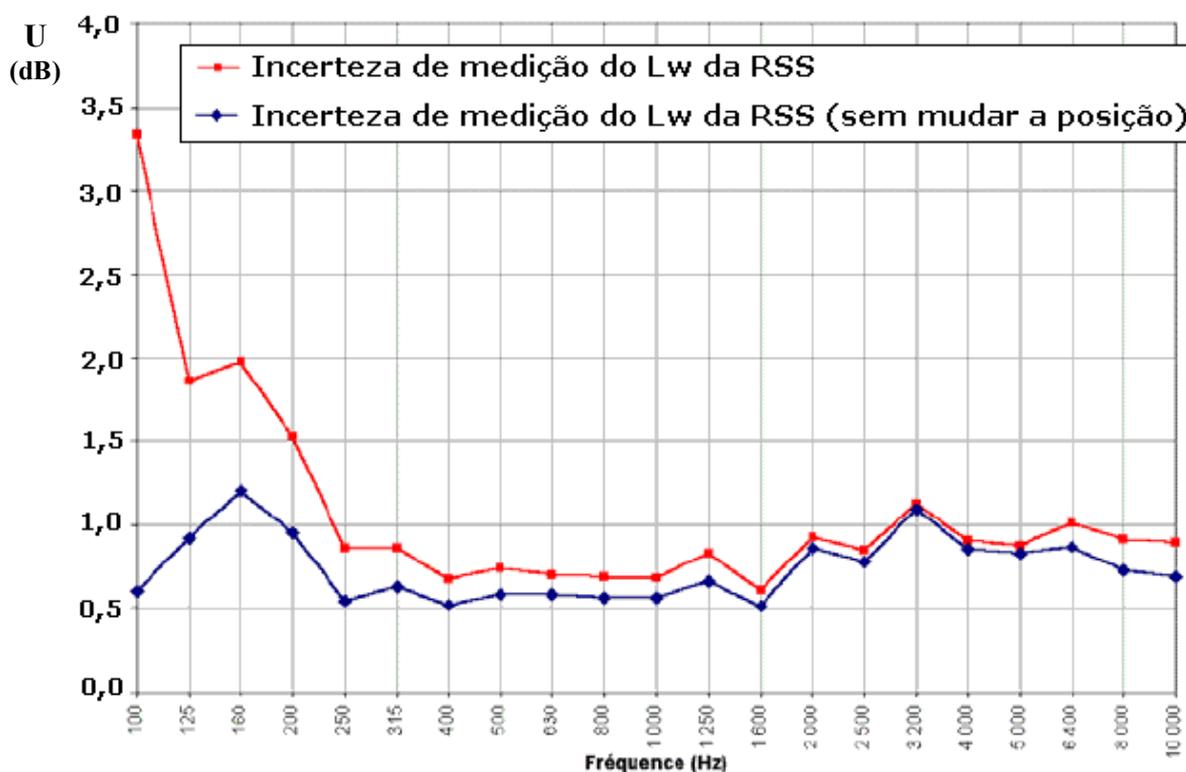


Figura 7 - Influência do parâmetro “posição de fonte sonora”, utilizando fonte sonora padrão de referência (“RSS – reference sound source”). CETIAT (França). Fonte: BESSAC e BLANQUART 2005.

“De qualquer maneira, as “campanhas de comparações interlaboratoriais” implicam que cada laboratório tem definidas as suas próprias incertezas de antemão, porém isto não é uma realidade universal.” (BESSAC e BLANQUART, 2005) de forma conclusiva sobre o

⁴⁶ Aparentemente se referindo a *baixa densidade modal em baixas frequências* existente no caso de excitação acústica dentro da câmara reverberante utilizada.

tema de incerteza, preconizam que os laboratórios devem se esforçar continuamente no sentido de organizarem comparações interlaboratoriais.

As necessidades de conhecer as incertezas para avaliar um processo de intercomparação, e fazer intercomparações para investigar a real validade das incertezas estimadas são comentadas por BLANQUART (2005). Ele procura explicar as seguintes questões: “Por que e como os metrologistas organizam comparações interlaboratoriais?”

“Em laboratórios de ensaios, são usados dois métodos para estimar incertezas de medição. O primeiro é descrito no “Guia para a expressão da incerteza de medição” (ISO GUIA ou ISO GUM). Neste método, os diferentes componentes de incertezas são individualmente estimados e sua combinação, baseada na lei de propagação de incertezas, leva a (estimativa da) incerteza de medição. A segunda maneira é a abordagem estatística, de forma que a incerteza é estimada através da dispersão de resultados experimentais sob diferentes, e diversas, condições; por exemplo, em comparações interlaboratoriais. Estes dois métodos, quando aplicados ao mesmo processo de medição, devem levar a resultados similares. Todavia, por questões de custo e tempo, a comparação entre os dois métodos raramente é feita em laboratórios de ensaios.”

*“Há no mínimo uma área (um campo) baseada na comparação dos dois métodos: a manutenção e melhoramento de padrões em laboratórios metrológicos nacionais. Nestes laboratórios, a comparação entre padrões nacionais é necessária para melhorar a confiabilidade dos padrões a nível mundial. A organização destas comparações interlaboratoriais e suas regras específicas é uma das principais atividades dos laboratórios nacionais. Além disso, se estas comparações produzem resultados importantes para os metrologistas, porém elas **não** dão qualquer informação para melhorar o desenvolvimento de padrões em cada laboratório. Portanto, estimando-se incertezas de acordo com o método do ISO GUIA é a única maneira de melhorar a realização prática dos padrões.”*

Assim nota-se que BLANQUART (2005) defende o uso do ISO GUIA para avaliações de incertezas atribuindo-lhe vantagem de ser útil no aprimoramento de padrões metrológicos. De acordo com COSTA-FÉLIX (2000), há de se diferenciar dois conceitos, o de incerteza do método de medição e o de incerteza da medição. Além disto, cada laboratório deve dominar o procedimento de avaliação de incertezas, apesar das características específicas de seus ensaios.

*“No entanto é praxe dizer que determinado método de medição apresenta uma incerteza associada. Essa incerteza **não** pode ser confundida com a incerteza resultante das medições realizadas segundo este método. Costuma-se dizer que a incerteza do método de medição é aquela que tipicamente se obtém em uma medição se a instrumentação empregada tiver certas características específicas, se o mensurando apresentar certas características típicas das do tipo ao qual ele pertença (como estabilidade e valores da grandeza medida / calculada aproximadamente semelhantes), se for seguido o método integralmente e se condições complementares (tais como as condições climáticas, estabilidade da rede elétrica etc) estiverem dentro de determinados valores. Vale ressaltar que a incerteza de uma medição pode ser tanto maior quanto menor do que a incerteza de seu método, posto que depende também do próprio mensurando, além da instrumentação, ambiente de ensaio / calibração etc. Cada laboratório deve calcular as incertezas dos métodos de medição que emprega a partir de sua experiência particular.”*

As normas utilizadas por COSTA-FÉLIX (2000) para desenvolver as medições e o seu modelo de cálculo de incertezas foram ISO/FDIS 3741 (1999) e ISO 3743-1 (1994). De acordo com COSTA-FÉLIX (2000), estas normas consideram apenas os *desvios padrão de reprodutibilidade*, um dos componentes da incerteza do método de medição. E se pode considerar que estes desvios são independentes da fonte sonora, pois foram obtidos com fonte que atende determinadas características espectrais.

“Mesmo que se aceite a hipótese de que o desvio padrão de reprodutibilidade de uma fonte sonora genérica é geralmente maior do que o desvio padrão de repetitividade para uma fonte específica, nenhum dos dois pode ser nunca confundido com a incerteza de uma medição em particular. A incerteza do método de medição pode depender também do desvio padrão de repetitividade, o que só pode ser avaliado se for feito um estudo criterioso por parte do laboratório, mas a incerteza associada a cada medição realizada deve ser calculada a partir do disposto no ISO GUM.”

O modelo de cálculo de incertezas apresentado por COSTA-FÉLIX (2000) é comentado em detalhes no Capítulo 6, Subseção 6.2, e é válido para o método da comparação com fonte sonora de referência, além de não considerar a incerteza que eventualmente pode ser causada pelo ruído de fundo. Segundo COSTA-FÉLIX, em geral, não há necessidade de correção para o ruído de fundo, sendo que a diferença entre os valores de níveis de pressão sonora L_p medidos e o ruído de fundo geralmente é superior a 15 dB.

COSTA-FÉLIX (2000) aplicou o seu modelo de cálculo de incertezas em resultados de ensaios de potência sonora (em câmara reverberante, método da comparação) com liquidificadores realizados no INMETRO em 1999. As incertezas dos ensaios então foram estimadas na faixa de 0,3 a 0,5 dB(A). Porém a consistência fica prejudicada pelo fato de ter usado vários valores arbitrados (atribuídos às grandezas de entrada e/ou fontes de incertezas) no cálculo das incertezas globais em dB(A).

2.2.2 Intercomparação laboratorial de potência sonora

Entre os anos de 1992 e 1993 foi conduzida uma intercomparação laboratorial para determinação dos níveis de potência sonora de fontes sonoras de referência. Esta intercomparação se deu entre sete laboratórios na Europa e foi dirigida por VORLÄNDER (1993) no PTB da Alemanha. Os ensaios foram realizados com fontes de referência em câmaras reverberantes e semi-anecóicas. As médias finais da intercomparação, fase II executada no período de novembro de 1992 a outubro de 1993, são dadas na Tabela 2.8, juntamente com as estimativas de incertezas obtidas na época. Nota-se que as incertezas

apresentadas por VORLÄNDER (1993) foram arredondadas para os valores 0,05 dB mais próximos (“resolução” da incerteza apresentada).

Uma questão importante, também relacionada com incerteza de medição, abordada nas investigações deste trabalho de tese é a deriva do calibrador de nível sonoro. Ou de um modo geral a deriva que pode eventualmente ocorrer na instrumentação de medição. VORLÄNDER (1993) afirma que foi tomado cuidado para que desvios sistemáticos estivessem dentro de determinada tolerância durante todo o período da intercomparação; e a variações **não** ultrapassaram $\pm 0,1$ dB:

“Desvios sistemáticos podem ocorrer se as fontes sonoras e o equipamento de medição não estiverem estáveis. No caso da medição executada no PTB (Alemanha) isto foi verificado, para que o mesmo não ocorresse. A estabilidade de todo o equipamento utilizado e das fontes sonoras esteve dentro de $\pm 0,1$ dB durante o período das medições; na fase II de novembro de 1992 a outubro de 1993.”

Para comparação entre as incertezas relativas às medições em câmaras semi-aneecóicas e reverberantes, os resultados da fase II da intercomparação dirigida por VORLÄNDER (PTB, 1993) foram avaliados. O desvio padrão σ e o “limite de reprodutibilidade” R foram calculados, arredondados na casa de 0,1 dB, e são apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Desvios padrão, σ , e “limite de reprodutibilidade”, R , de calibrações de fontes sonoras de referência (modelo BK 4204). Dados calculados a partir da intercomparação de potência sonora na Europa em 1992 e 1993. FONTE: VORLÄNDER (PTB, 1993).

Frequência central da banda de oitava (Hz)	Frequência central da banda de terço de oitava (Hz)	σ e R de medições sobre plano refletor (piso) em câmara semi-aneecóica (dB)	σ e R de medições com fonte sonora no piso de câmara reverberante (dB)
63	50 a 80	$\pm 2,0$; 5,6	$\pm 2,5$; 7,0
125	100 a 160	$\pm 0,8$; 2,2	$\pm 1,0$; 2,8
250 a 8000	200 a 10000	$\pm 0,3$; 0,8	$\pm 0,3$; 0,8
16000	12500 a 20000	$\pm 0,3$; 0,8	$\pm 0,4$; 1,2
Em dB		$\pm 0,3$; 0,8	$\pm 0,3$; 0,8
Em dB(A)		$\pm 0,3$; 0,8	$\pm 0,1$; 0,2

VORLÄNDER (1993) explica as condições em que foram calculados os parâmetros apresentados na Tabela 2.7.

“O limite de reprodutibilidade⁴⁷ de acordo com⁴⁸ ISO 5725 é o valor esperado da diferença absoluta entre duas medições sob condições de reprodutibilidade, usualmente com um nível de probabilidade⁴⁹ de 95 %. Condições de reprodutibilidade são: o mesmo objeto de teste; mas diferentes laboratórios, equipamentos, operadores e tempos de observação.”

⁴⁷ Do original em inglês: *reproducibility limit*.

⁴⁸ ISO 5725 (1986) foi cancelada e substituída por seis partes da nova norma ISO 5725 (1994).

⁴⁹ Ou: *nível de confiança*.

Os resultados obtidos por VORLÄNDER (1993) para as fontes sonoras padrão de referência, modelo BK 4204, denominadas “fonte 1” e “fonte 4”, são apresentados na Tabela 2.8. De fato, os resultados da Tabela 2.8 se referem somente aos ensaios em câmaras reverberantes, e os resultados obtidos em câmaras semi-aneecóicas (na mesma intercomparação laboratorial) divergem ligeiramente dos apresentados nas bandas de frequências de 50 a 100 Hz apenas; baixas frequências.

Tabela 2.8 - Média final dos resultados da intercomparação laboratorial de potência sonora com fontes sonoras modelo BK 4204. Somente resultados para câmaras reverberantes. Intercomparação dirigida por VORLÄNDER em 1992 e 1993.

Frequência Hz	L_{WF} Fonte 1 dB	$U(L_{Wi})$ dB	L_{WF} Fonte 4 dB	$U(L_{Wi})$ dB
50	74,20	2,00	73,25	1,35
63	72,25	1,30	72,60	1,25
80	74,30	0,85	74,25	0,85
100	74,90	0,55	74,90	0,55
125	76,05	0,60	76,05	0,60
160	76,20	0,55	76,25	0,50
200	76,35	0,30	76,40	0,30
250	76,35	0,40	76,40	0,40
315	76,30	0,20	76,40	0,20
400	76,40	0,15	76,55	0,15
500	76,50	0,20	76,70	0,15
630	77,05	0,20	77,15	0,15
800	78,95	0,15	79,00	0,15
1000	79,90	0,20	79,80	0,15
1250	81,40	0,20	81,40	0,15
1600	81,90	0,15	81,85	0,15
2000	81,30	0,10	81,25	0,10
2500	79,60	0,15	79,55	0,10
3150	79,25	0,15	79,25	0,15
4000	79,00	0,15	79,05	0,10
5000	78,20	0,15	78,25	0,15
6300	76,95	0,20	77,05	0,15
8000	75,40	0,15	75,55	0,10
10000	73,20	0,15	73,30	0,10
12500	71,25	0,20	71,35	0,15
16000	68,55	0,20	68,60	0,20
20000	66,75	0,30	66,75	0,25
L_{WA} dB(A)	91,05	0,15	91,05	0,15
L_W dB	92,00	0,20	92,00	0,15

2.3 Estimativas de incertezas padrão e desvio padrão experimentais

Com relação a medições de tempos de reverberação T_{rev} também deve haver estimativas de incertezas. “De acordo com o guia internacional⁵⁰ que trata deste tema, incerteza de medição é um parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores que são atribuídos à medição. A quantidade utilizada para expressá-la deve ser diretamente derivada dos componentes que contribuem para esta dispersão. A incerteza de um resultado de medição pode ser representada na forma de desvio padrão amostral” KORTCHMAR (1994). A equação dada por KORTCHMAR para o “desvio padrão amostral” é basicamente a mesma dada pelo VIM (Vocabulário de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia), no seu item 3.8; ver Equação 2.10. A seguir são dadas as definições, segundo o VIM, do desvio padrão e da incerteza de medição. Enfatizando que nos cálculos relativos às investigações experimentais nesta tese foram utilizados, em geral, os *desvios padrão experimentais* ao invés de utilizar os *desvios padrão experimentais da média*. Este último é considerado pelo ISO GUIA (2003) como estimativa adequada de incertezas do Tipo A. Porém, não proíbe que sejam utilizados outros meios para estimar as incertezas (das grandezas de entrada).

“3.8 - Desvio padrão experimental [experimental standard deviation / écart-type expérimental, m]

Para uma série de “n” medições de um mesmo mensurando, a grandeza “s”, que caracteriza a dispersão dos resultados é dada pela fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.10)$$

x_i representa o resultado da “iésima” medição e \bar{x} representa a média aritmética dos “n” resultados considerados.

Observações:

1) Considerando uma série de “n” valores como uma amostra de uma distribuição, \bar{x} é uma estimativa não tendenciosa da média μ e s^2 é uma estimativa não tendenciosa da variância σ^2 , desta distribuição.

2) A expressão s/\sqrt{n} é uma estimativa do desvio padrão da distribuição de \bar{x} e é denominada **desvio padrão experimental da média**.

3) Desvio padrão experimental da média é algumas vezes denominado incorretamente **erro padrão da média**.”

“3.9 - Incerteza de medição [uncertainty of measurement / incertitude de mesure, f]

⁵⁰ ISO/IEC/OIML/BIPM/1992 (E), Guide to the expression of uncertainty in measurement.

Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando.

Observações:

- 1) O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio padrão (ou um múltiplo dele), ou a metade de um intervalo correspondente a um nível de confiança estabelecido;
- 2) A incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. *Alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e podem ser caracterizados por **desvios padrão experimentais**. Os outros componentes, que também podem ser caracterizados por **desvios padrão**, são avaliados por meio de distribuição de probabilidade assumidas baseadas na experiência ou em outras informações;*
- 3) Entende-se que o resultado da medição é a melhor estimativa do valor do mensurando e que todos os componentes da incerteza, incluindo aqueles resultantes dos efeitos sistemáticos, como os componentes associados com correções e padrões de referência, contribuem para a dispersão.

Esta definição foi extraída do “*Guia para expressão de incerteza de medição*”, no qual sua fundamentação é detalhada (ver em particular, 2.2.4 e o anexo D(10)).

O objetivo destas abordagens sobre as incertezas padrão é tentar comprovar que **não** somente os *desvios padrão experimentais da média* podem ser utilizados como estimativas de incerteza do Tipo A, mas também é possível usar *desvios padrão experimentais* para quantificar incertezas.

Segundo o ISO GUIA (2003), nas Subseções 2.2.3 e 3.4.8, o trabalho científico de avaliação do processo de medição e respectiva incerteza é tarefa atribuída ao profissional, e o ISO GUIA não substitui as habilidades e conhecimento técnico do mesmo.

“(2.2.3) A definição formal do termo “incerteza de medição” desenvolvida para ser usada neste *Guia* e na edição do VIM (VIM definição 3.9) é a seguinte:

“incerteza (de medição): parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.”

*“(NOTA 2) A incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados de séries de medições e podem ser caracterizados por **desvios padrão experimentais**. Os outros componentes, que também podem ser caracterizados por **desvios padrão**, são avaliados por meio de distribuições de probabilidade supostas, baseadas na experiência ou em outras informações.”*

“(3.4.8) Embora este *Guia* proporcione uma metodologia para avaliar incertezas, ele **não** pode substituir o raciocínio crítico, a honestidade intelectual e a habilidade profissional. A avaliação de incerteza não é uma tarefa de rotina nem uma tarefa puramente matemática; ela depende de conhecimento detalhado da natureza do mensurando e da medição. A qualidade e utilidade da incerteza indicada para o resultado de uma medição, dependem, portanto, e em uma

análise, da compreensão, análise crítica e integridade daqueles que contribuem para o estabelecimento de seu valor.”

O “Guia de avaliação de incertezas para fabricantes”⁵¹ do *DTI – Department of Trade and Industry* do Reino Unido cita três parâmetros que julga necessário para avaliar incertezas, dois deles são baseados em **desvios padrão**, e o terceiro é a soma quadrática dos dois primeiros: *standard deviation of repeatability uncertainty* (incerteza do desvio padrão de repetitividade), *standard deviation of production uncertainty* (incerteza do desvio padrão de produção) e *total standard deviation* (desvio padrão total).

(EBBING e MALING, 1973) obtiveram resultados de qualificação de câmara reverberante através de desvios padrão, seguindo a norma ANS S1.21. Foram encontrados desvios padrão da ordem de 2 dB. Diferentemente dos resultados obtidos por (NABUCO DE ARAUJO, 1998) e (BESSAC e BLANQUART, 2005), no gráfico da Figura 8 (EBBING e MALING, 1973) os desvios padrão aparentam diminuir ao se usar duas posições de fonte; apesar da má qualidade do gráfico. De fato, a faixa de frequências deste teste de qualificação foi bastante restrita, cerca de 100 Hz a 1200 Hz.

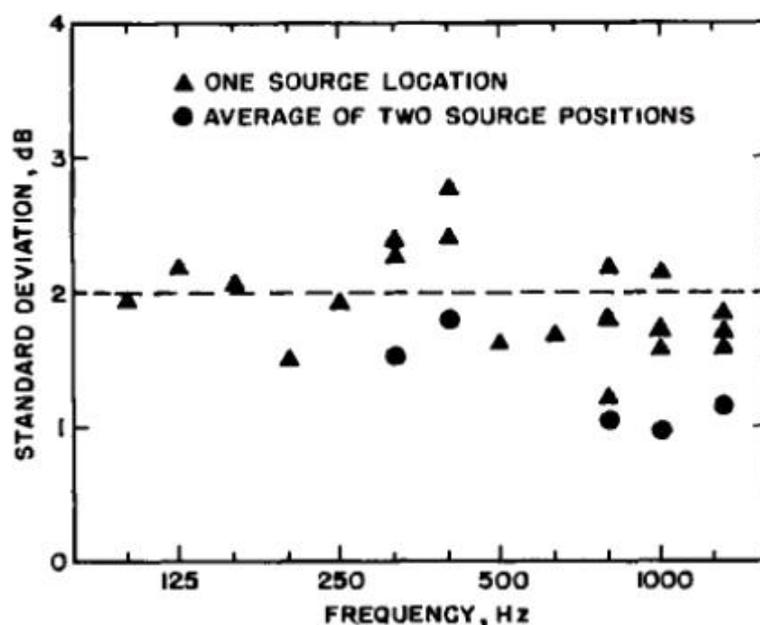


Figura 8 - Desvios padrão de resultados experimentais obtidos por (EBBING e MALING, 1973). Qualificação de câmara reverberante; seis posições de microfones, uma e duas posições de fonte sonora. Com base em norma ANS S1.21. Fonte: JASA 54(4), p.947, 1973.

Neste caso (EBBING e MALING, 1973) afirmaram que os valores de desvios padrão são independentes da frequência, e que são resultados da amostragem em diferentes posições de microfones utilizados (seis posições distintas). De qualquer forma, este teste de qualificação se refere às fontes sonoras com forte presença de tons discretos de frequências, e foi

⁵¹ *Guide for Manufacturers to the Evaluation of Uncertainties*. Primeira edição julho de 2000.

executado com tons puros (frequência discreta); diferente das situações que envolvem fontes sonoras de banda larga (semelhantes ao ruído branco).

O Guia Eurachem⁵² (Quantificação da incerteza nas medições analíticas) cita tanto o desvio padrão experimental da média quanto o desvio padrão como sendo úteis na avaliação de incertezas. No Capítulo 8 do Guia Eurachem há comentários sobre incerteza padrão e um exemplo que utiliza o desvio padrão em uma avaliação específica de incerteza:

“8.1.1. Antes da combinação, todas as contribuições das incertezas devem ser expressas como incertezas-padrão, isto é, desvios-padrão. Isto pode envolver conversão de uma outra forma de medida da dispersão. As regras a seguir dão alguma orientação para converter uma componente da incerteza em desvio-padrão.”

“8.1.2. Quando a incerteza tenha sido avaliada experimentalmente a partir da dispersão de medições repetidas, pode ser expressa como desvio-padrão. Para a contribuição para a incerteza em medições singulares, a incerteza-padrão é simplesmente o desvio-padrão observado; para médias de resultados, usa-se a incerteza-padrão da média.”

“8.1.3. Quando uma estimativa da incerteza é derivada de resultados e informação anterior, ela pode já ser expressa como desvio-padrão. Contudo, quando se apresenta um intervalo de confiança com um nível de confiança, (na forma de $\pm a$ a $p\%$) então, para calcular o desvio-padrão, divide-se o valor a pela percentagem de pontos da distribuição Normal, a esse nível de confiança.”

“Em 8.3.1 do Guia Eurachem

EXEMPLO:

Uma incerteza padrão combinada para uma operação de pesagem é formada de contribuições $u_{cal}=0,01$ mg resultantes da incerteza de calibração e $s_{obs}=0,08$ mg baseado no desvio padrão de cinco observações repetidas. A incerteza padrão combinada u_c é igual a $\sqrt{0,01^2 + 0,08^2} = 0,081$ mg, claramente dominada pela contribuição da repetibilidade s_{obs} , que é baseada em cinco observações, dando $5-1=4$ graus de liberdade. K é baseado no t de Student. O valor two-tailed de t para quatro graus de liberdade e 95% de confiança é, a partir das tabelas, 2,8; k é, portanto igual a 2,8 e a incerteza expandida $U=2,8 \times 0,081=0,23$ mg.”

2.4 Desempenho de câmaras reverberantes

No contexto deste trabalho de tese os resultados experimentais (com fonte sonora modelo BK 4204) mostraram que as câmaras reverberantes retangulares (LVA-UFSC) e câmaras reverberantes com paredes inclinadas (formato irregular) têm desempenhos semelhantes.

⁵² Versão em português do GUIA EURACHEM/CITAC, traduzida e adaptada da segunda edição, 2000

Todavia, a variação espacial dos níveis de pressão sonora é uma característica fundamental na investigação do comportamento do campo sonoro em câmaras reverberantes, e conseqüentemente é muito importante na questão de avaliações de incertezas de medições acústicas em ambiente reverberante.

De acordo com (NABUCO DE ARAUJO, 2002), não se deve esperar que câmaras reverberantes com formatos irregulares (“não retangulares”) tenham desempenho consideravelmente superior às câmaras reverberantes retangulares:

*“Alguns especialistas não vêem vantagens significativas em se construir câmaras com paredes não paralelas. Apud SCHULTZ (1971)⁵³ observa de forma bem humorada que salas com geometria irregulares servem mais a dificultar possíveis cálculos dos modos acústicos da sala que propriamente melhorar o seu grau de difusão sonora. Sobre o mesmo assunto, DAMMIG (1991)⁵⁴ investigou através de um software de raios acústicos o comportamento do campo sonoro em cinco salas reverberantes com formas e volumes diferentes e concluiu que as salas de geometria irregular **não** revelam nenhuma superioridade significativa sobre salas retangulares.”*

Com relação às medições no campo sonoro difuso aparentemente não há muito que se possa fazer quanto ao posicionamento dos microfones dentro da câmara reverberante, além das distâncias limites estabelecidas em norma (ISO 3741, por exemplo). De acordo com VORLÄNDER (2005), no caso de determinações de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto, **não** é possível aprimorar os resultados das medições ao se usar as *mesmas posições de microfones* para medir os tempos de reverberação T_{rev} e os níveis de pressão sonora L_p . Ou seja, as posições de microfone(s) dentro da câmara reverberante podem ser totalmente aleatórias com relação às medições dos L_p e dos T_{rev} , de forma que os níveis de potência sonora L_W resultantes não serão influenciados por isto. Portanto, espera-se que as incertezas dos L_W sejam da mesma ordem de grandeza ao se associar as posições de microfones usadas para medir tanto L_p quanto T_{rev} .

2.5 Fontes sonoras

“A estabilidade da fonte de ruído sob teste influencia o resultado da medição dos níveis de pressão sonora em câmara semi-aneecóica. A magnitude do efeito depende da natureza da fonte sonora. Condições de montagem e operação a ser usadas durante o ensaio devem ser

⁵³ SCHULTZ, T. J., 1971, **Diffusion in reverberation rooms**, Journal of Sound and Vibration, v.16, n.1, (Dec), pp. 17-28.

⁵⁴ DAMMIG, P., 1991, **Model investigation into sound fields in reverberation rooms**, Acustica, v.75, pp. 105-120.

fixadas, o que geralmente é feito através de norma específica de determinado maquinário. Incertezas reportadas para estes efeitos podem facilmente alcançar valores até 1 dB ou mais.” Para o caso das medições de L_p em ambiente de campo livre (câmara semi-aneecóica) realizadas por WITTSTOCK (2003), a estabilidade da fonte sonora aerodinâmica padrão de referência é quantificada de uma incerteza padrão denominada $u(K_{stab}) = 0,05$ dB. Uma estimativa que foi considerada relativamente pequena e realista para este tipo de fonte sonora, WITTSTOCK (2003).

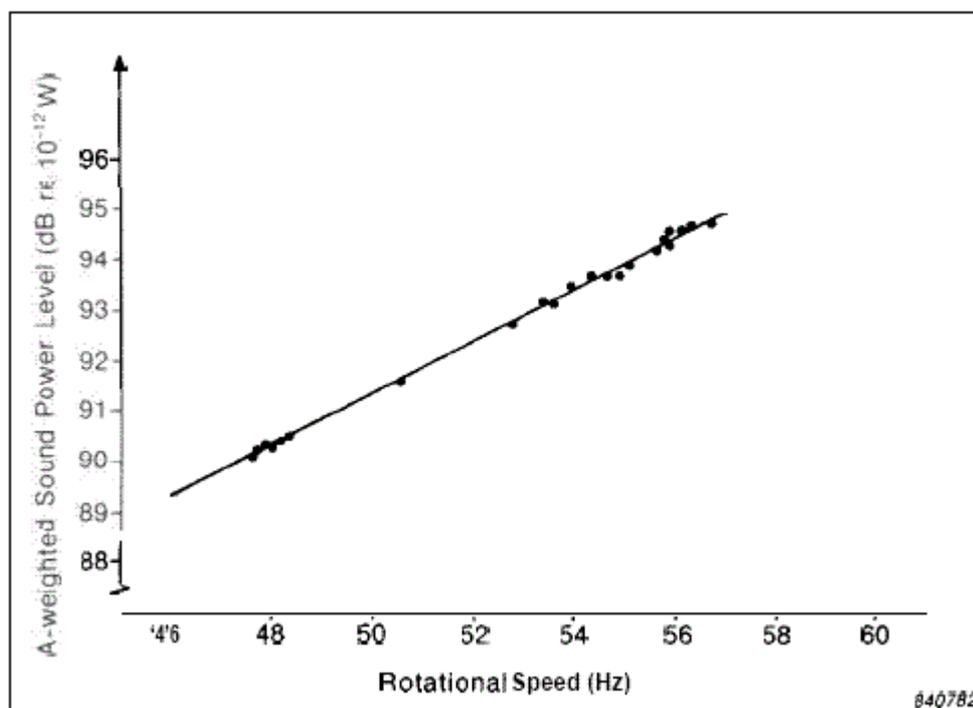


Figura 9 - Influência da velocidade de rotação de fonte sonora de referência aerodinâmica modelo BK 4204 sobre o nível de potência sonora emitido pela fonte sonora. FONTE: Brüel & Kjær.

Com relação a fontes sonoras padrão de referência, uma importante influência é a alimentação proveniente da rede elétrica, dentre outros fatores (ou grandezas) de influência. De acordo com o “*application notes*” BRÜEL & KJÆR, há uma relação empírica linear quantificada em 0,5 dB/Hz no caso de fontes sonoras modelo BK 4204. A velocidade rotacional de fonte sonora de referência varia em função da alimentação da rede elétrica, e conseqüentemente o nível de potência sonora emitido varia em função da variação da velocidade rotacional. Ver Figura 9.

A velocidade de rotação da fonte BK 4204 do LVA-UFSC foi de aproximadamente 53,3 Hz (3200 rpm) durante os ensaios realizados no LVA-UFSC e no LAENA-INMETRO em 2005.

De acordo com (NABUCO DE ARAUJO, 2005), com relação à calibração de fontes sonora de referência, segundo primeira edição da norma ISO 6926 (1990) as fontes

sonoras de referência só poderiam ser calibradas em câmaras semi-aneecóicas. Porém esta situação mudou a partir de resultados obtidos através de um programa de intercomparação em calibração de fontes de referência realizado na Europa, e que envolveu sete laboratórios com câmaras semi-aneecóicas e reverberantes. A partir de então foi desenvolvida uma proposta de modificação da norma, a qual foi submetida a votação. E em consequência disto a segunda edição da norma⁵⁵ ISO 6926 (1999) permite que as fonte sonoras de referência sejam calibradas em câmaras reverberantes, desde que estejam dentro de determinadas especificações (NABUCO DE ARAUJO, 2005).

“Devido aos bons resultados obtidos na intercomparação promovida na Europa (conduzida por VORLÄNDER, 1993), as câmaras reverberantes estão incluídas na norma ISO 6926. Para diminuir a faixa de incerteza das medições em câmaras reverberantes foram recomendados alguns procedimentos diferentes dos encontrados na norma ISO 3741 de 1988 (segunda edição da norma, que foi substituída pela terceira edição em 1999) para a determinação dos níveis de potência em câmara reverberante.” (NABUCO DE ARAUJO, 2005).

⁵⁵ ISO 6926 : 1999 – *Acoustics – Requirements for the performance and calibration of reference sound sources used for the determination of sound power levels.*

Capítulo 3

Determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes

O equacionamento que descreve os fenômenos acústicos em ambientes reverberantes fechados são apresentados em livros de engenharia acústica, tais como GERGES (2000)⁵⁶ e FAHY (2001)⁵⁷, que contêm as formulações de cálculo da energia acústica em ambientes reverberantes. FAHY (2001) apresenta um modelo de analogia hidráulica para explicar o fenômeno acústico de absorção sonora em câmaras reverberantes. Sendo que em ambos, a partir de determinado momento o estado de equilíbrio é atingido. Ver Figura 10.

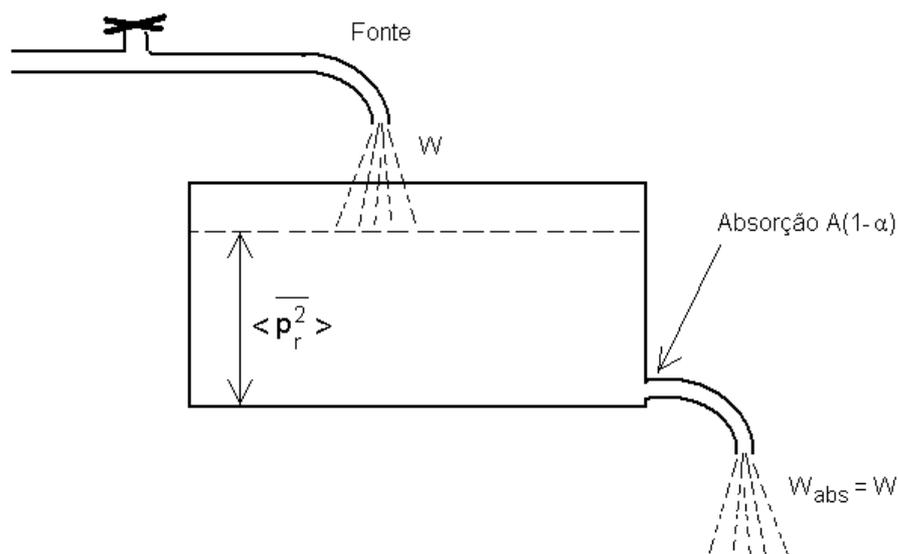


Figura 10 - Analogia hidráulica da estabilização do nível de energia acústica em câmara reverberante excitada por uma fonte sonora. Adaptado de FAHY (2001).

⁵⁶ Ver Capítulo 7 da referência.

⁵⁷ Ver Capítulo 9, Subseção 9.12 da referência.

Na Figura 10, $\langle p_r^2 \rangle$ representa a pressão sonora média quadrática no espaço, dentro da câmara reverberante, que é relativo à energia acústica acumulada dentro da câmara. A potência de entrada (excitação) e a potência de saída (absorção) são iguais a partir do momento que o sistema atinge estabilidade do parâmetro $\langle p_r^2 \rangle$. Ou seja, $W = W_{abs}$.

Para a determinação de níveis de potência sonora pelo método direto é necessário medir essencialmente pelo menos dois parâmetros: os níveis de pressão sonora (relativos à $\langle p_r^2 \rangle$ na analogia mostrada anteriormente) e os tempos de reverberação (que são relacionados com a idéia de absorção sonora das paredes da câmara; dada por $A(1-\alpha)$ na analogia anterior). Na Figura 11 pode-se observar os níveis de pressão sonora (NPS ou L_p) que foram medidos próximos a uma fonte de ruído (condicionador de ar), os valores são dados em bandas de terço de oitava (e valores globais a direita do gráfico), em dB e em dB(A).

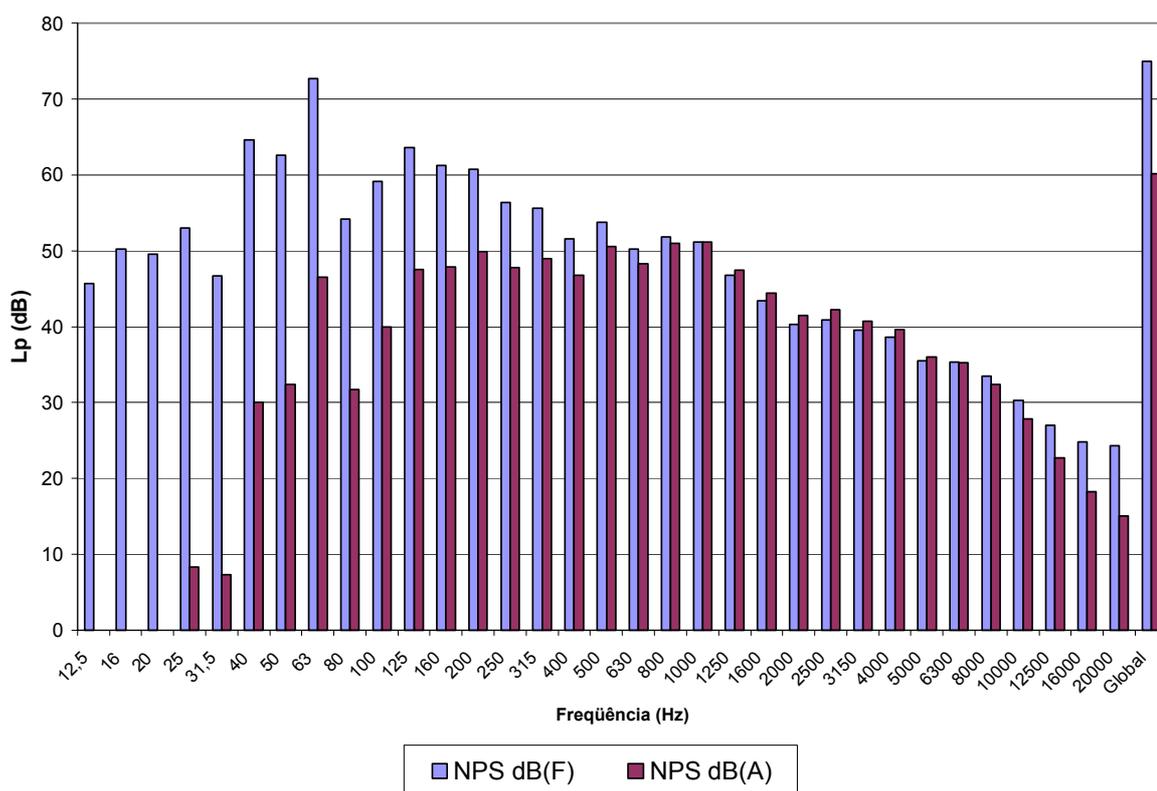


Figura 11 - Níveis de pressão sonora (NPS ou L_p) medidos em bandas de terço de oitava de 12,5 Hz a 20 kHz com microfone de uma polegada. Níveis com ponderação A em dB(A), e sem ponderação em dB. Próximo a um condicionador de ar no LVA-UFSC. Analisador de sinais Larson Davis 824.

As medições dos tempos de reverberação são necessárias para a determinação dos níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto. Além do volume e área de superfícies da câmara; dentre outros parâmetros. Um exemplo de medição de tempo de

reverberação, especificamente na banda de 200 Hz é dado na Figura 12, onde é utilizado o método de interrupção de ruído para obtenção da curva de decaimento. De fato, a curva de decaimento mostrada no gráfico da Figura 12 é a média de cinco curvas de decaimento obtidas experimentalmente.

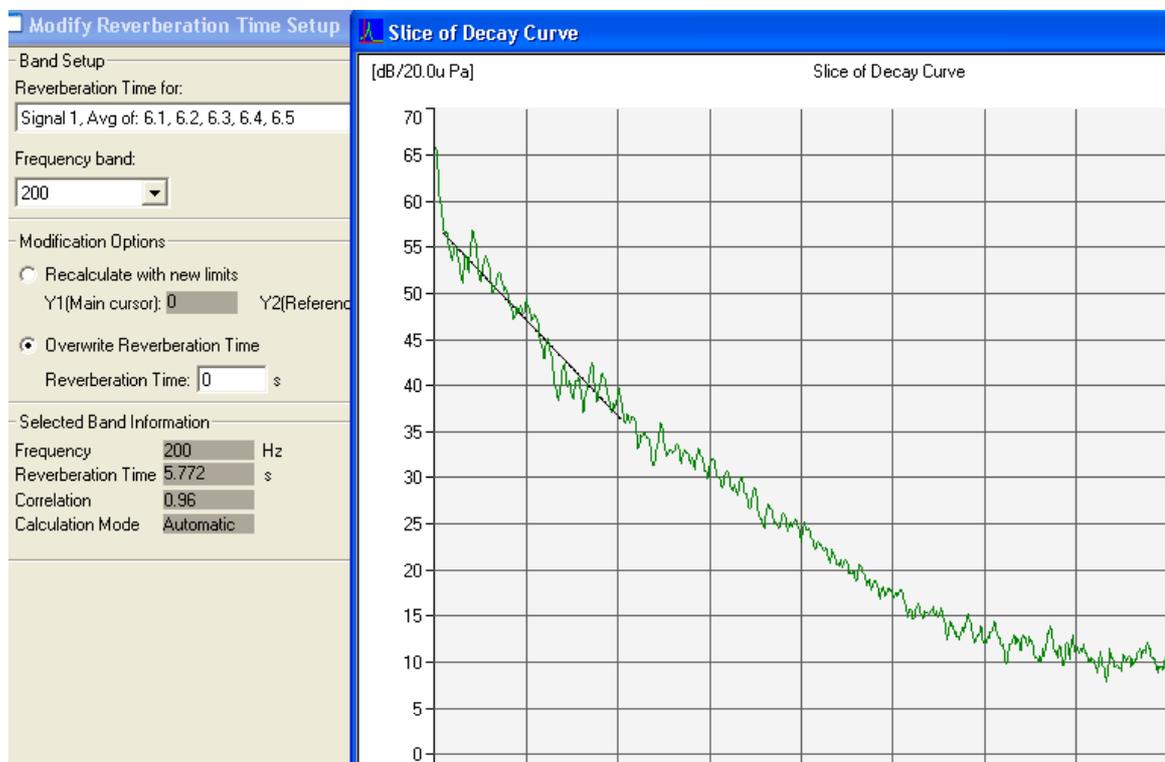


Figura 12 - Curva de decaimento medida com auxílio do analisador de sinais Pulse 3560-C e software Pulse Labshop de Brüel & Kjær.

3.1 Necessidade de correções atualmente aplicadas no cálculo de níveis de potência sonora

De acordo com MALING (1967), “mesmo para fontes sonoras banda larga, o valor de potência sonora determinado em câmara semi-anecóica é diferente daquele obtido em câmara reverberante para a mesma fonte sonora”. Esta conclusão é baseada em dados experimentais, tais como os mostrados no gráfico da Figura 13, onde independentemente do método de ensaio os resultados deveriam coincidir, pois a potência sonora de uma fonte é independente da sala, ou tipo de câmara onde estiver instalada (GERGES, 2000).

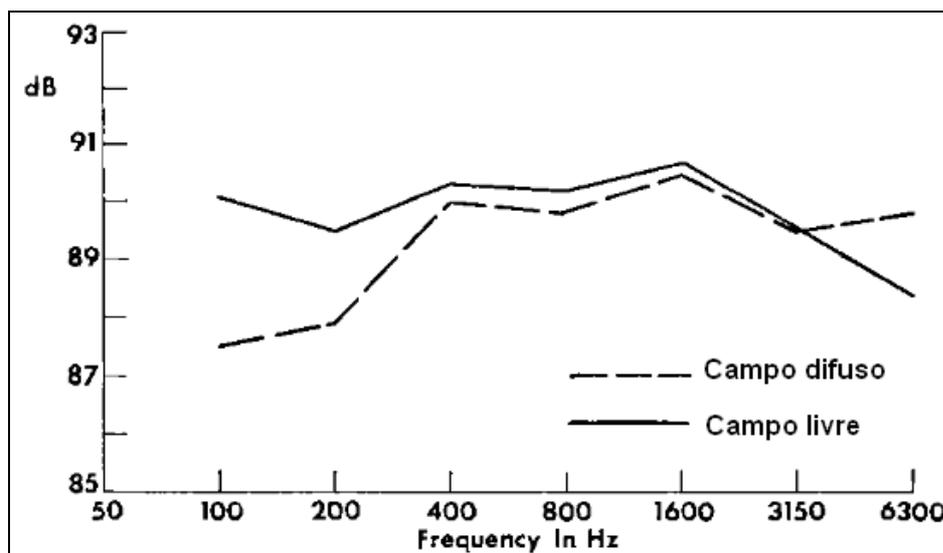


Figura 13 - Comparações dos níveis de potência sonora irradiados por uma fonte sonora, em câmara reverberante e em campo livre. Fonte: MALING, G. (JASA, 1967, p.860).

Segundo (NABUCO DE ARAUJO, 2004), a *correção de Waterhouse* é usada no cálculo de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto para compensar a energia acústica próxima às paredes da câmara; local onde não se deve medir a pressão sonora devido às exigências da norma ISO 3741.

“A motivação para descobrir uma correção para a potência sonora medida em câmara reverberante veio do fato de os valores experimentais encontrados nas medições em câmaras (semi)anecóicas e reverberantes serem diferentes. Teoricamente, quando se calcula a potência emitida por um monopolo em câmara anecóica, campo completamente livre, e em campo completamente difuso (nesse caso colocando a fonte e os microfones em todas, todas mesmo, posições na câmara), o valor médio da potência encontrado deveria ser igual em ambas as câmaras.”

Acontece que na prática não se coloca nem a fonte nem os microfones numa região próxima a $\lambda/2$ de todas as superfícies da câmara reverberante. Então achamos que, como a potência é proporcional ao valor médio da pressão sonora média quadrática (espaço e tempo) na câmara, e normalmente próximo aos contornos da câmara essa pressão é maior que no meio da câmara, os valores têm mesmo que resultar menores do que em campo livre ou livre sobre um plano refletor.”

A necessidade de correções está relacionada com as diferenças entre os resultados de medições executadas em câmaras semi-anecóicas e em câmaras reverberantes, especialmente em baixas frequências.

“A norma ISO 3741 que trata da medição de potência sonora em câmara reverberante (método chamado de precisão, embora essa palavra já não seja utilizada em português metrológico) recomenda a correção de Waterhouse.” (NABUCO DE ARAUJO, 2004).

3.2 Equações utilizadas para os cálculos de níveis de potência sonora

De modo geral, as equações usadas na determinação de níveis de potência sonora⁵⁸ são baseadas na *formulação de Sabine*, ver Equação 3.12 e seu comentário. Além dos termos básicos relacionados esta formulação, há correções que foram sendo implementadas com o passar dos anos e ainda continuam sendo assunto de revisão de norma (ISO/DIS 3741, 2006). A seguir são apresentadas as equações de determinação de níveis de potência sonora, com suas variações (especialmente nas correções): as que foram utilizadas antigamente, a que está em vigor, e a do projeto de revisão de norma⁵⁹.

A equação da norma ISO 3741 (segunda edição) de 1988; na sua Subseção 8.2.2 é dada através da Equação 3.1:

$$L_W = L_p - 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right) + 10 \log\left(\frac{V}{V_0}\right) + 10 \log\left(1 + \frac{S\lambda}{8V}\right) - 10 \log\left(\frac{B}{1000}\right) - 14 \quad (3.1)$$

onde $T_0 = 1$ s, $V_0 = 1$ m³, e B é dado em milibar.

As equações usadas por VORLÄNDER (PTB, 1993) foram praticamente as mesmas da norma de 1988. As Equações 3.2, 3.3 e 3.4 foram usadas na intercomparação realizada na Europa em 1992 e 1993 para calcular os níveis de potência sonora de fontes sonoras de referência.

$$L_W = \overline{L_{P_{corr}}} - 10 \log(T) + 10 \log(V) - 10 \log\left(\frac{B}{1000}\right) + K_W + K_{mic} + K_{filter} - 14 \quad (3.2)$$

$$\overline{L_{P_{corr}}} = 10 \log\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(10^{0,1 \cdot L_i} - 10^{0,1 \cdot L_{i,bg}}\right)\right] \quad (3.3)$$

$$K_W = 10 \log\left(1 + \frac{S \cdot (331,4 + 0,6 \cdot t)}{8 \cdot V \cdot f}\right) \quad (3.4)$$

onde: L_i é o nível de pressão sonora medido; $L_{i,bg}$ é o nível de ruído de fundo; T é o tempo de reverberação em segundos; V é o volume da câmara reverberante em m³; B é a pressão atmosférica em hPa; K_{mic} é a correção de microfone para campo sonoro difuso; K_{filter} é a correção atribuída a um “filtro ideal passa-banda”; K_W é a correção de Waterhouse; S é a área total da

⁵⁸ Determinações de potência sonora podem ser feitas através de câmaras semi-aneóica, por exemplo, que não utilizam a formulação de Sabine.

⁵⁹ A norma ISO 3743-1, por exemplo, também utiliza medições em ambiente reverberante.

superfície (interna) da câmara reverberante em m^2 ; t é a temperatura em $^{\circ}C$, e f é a frequência em Hz. Os parâmetros K_{mic} e K_{filter} não foram especificados por VORLÄNDER (PTB, 1993).

A Equação 3.5 dada por GERGES (2000) é basicamente a mesma utilizada por VORLÄNDER (PTB, 1993) e pela norma ISO 3741:1998. Porém não utiliza as correções de temperatura e pressão barométrica. Além usar símbolos NWS para nível de potência sonora, e NPS para nível de pressão sonora (média no tempo e no espaço):

$$NWS = NPS + 10 \log V - 10 \log T - 14 + 10 \log \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) \quad (3.5)$$

Os níveis de potência sonora devem ser corrigidos em função da absorção sonora do ar, da correção de Waterhouse, e da pressão atmosférica. A Equação 3.6 representa o cálculo da potência sonora de acordo com a norma ISO 3741 de 1999, que difere da fórmula da norma de 1988 devido à adição do termo $4,34 A/S$, o qual contempla a absorção sonora do ar; este último proposto por (VORLÄNDER, 1995). Também há diferenças nas correções de temperatura e pressão barométrica. Esta equação foi usada nas investigações experimentais desta tese, e é considerada em vigor atualmente:

$$L_w = \bar{L}_p + \left\{ 10 \log \frac{A}{A_0} + 4,34 \frac{A}{S} + 10 \log \left(1 + \frac{S \cdot c}{8 \cdot V \cdot f} \right) - 25 \log \left[\frac{427}{400} \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}} \cdot \frac{B}{B_0} \right] - 6 \right\} \text{ em dB} \quad (3.6)$$

$$A = \frac{55,26}{c} \left(\frac{V}{T_{rev}} \right) \quad (3.7)$$

onde:

L_w	é o nível de potência sonora calculado para a fonte sonora sob teste (dB)
\bar{L}_p	é a média da pressão sonora na câmara (dB)
A	é a área equivalente de absorção da câmara (m^2)
A_0	= $1 m^2$
S	é a área de superfície total da câmara reverberante (m^2)
V	é o volume da câmara (m^3)
f	é a frequência central da banda medida (Hz)
c	é a velocidade do som na temperatura θ $c = 20,05 \sqrt{273 + \theta} \text{ m/s}$
θ	é a temperatura ($^{\circ}C$)
B	é a pressão atmosférica (Pa)
B_0	= $1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$

Ao observar as Equações 3.9 e 3.6, que calculam o nível de potência sonora da fonte pelo método direto, pode-se notar que os três primeiros termos, esquerda para direita, são praticamente iguais, os outros em 3.6 são as correções devido à absorção sonora do ar, correção de Waterhouse, da pressão barométrica (atmosférica) e da temperatura θ .

$$NWS = NPS + 10 \log \left(\frac{A}{4} \right) \quad \text{ou} \quad L_W = L_p + 10 \log \left(\frac{A}{4} \right) \quad (3.8)$$

$$L_W = L_p + 10 \log(A) - 6,02 \cong L_p + 10 \log(A) - 6 \quad (3.9)$$

Também é possível demonstrar a equivalência entre as equações usadas nas normas ISO 3741 de 1988 e de 1999. A partir da fórmula de potência sonora da norma ISO 3741 de 1988:

$$L_W = L_p - 10 \log \frac{T}{T_0} + 10 \log \frac{V}{V_0} + 10 \log \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 10 \log \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad (3.10)$$

$$L_W = L_p + 10 \log \left[\frac{V}{V_0} \frac{T_0}{T} \right] + 10 \log \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 10 \log \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad (3.11)$$

A partir de 3.7, considerando a velocidade do som no ar de aproximadamente 343 m/s e sendo o tempo de reverberação $T (= T_{rev})$, encontra-se a expressão 3.12, ver também a Equação 3.13:

$$A = \frac{0,16V}{T} \quad (3.12)$$

Segundo FAHY (2001), a relação da através da Equação 3.12 “foi deduzida por W. C. Sabine no início do século 20”; por isto pode-se dizer que a formulação apresentada nas versões da norma ISO 3741 é baseada na “formulação de Sabine”.

$$T_{rev} = \frac{55,2 V}{A c} = \frac{0,161 V}{A} \quad (3.13)$$

Multiplicando-se o argumento do log do segundo termo do lado direito da equação por 0,16 (no numerador e denominador) e ainda, colocando os valores de referência para T e V, obtém-se:

$$L_W = L_p + 10 \log \left[\frac{V}{1} \frac{1}{T} \frac{0,16}{0,16} \right] + 10 \log \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 10 \log \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad (3.14)$$

$$L_W = L_p + 10 \lg \left[\frac{1}{0,16} \frac{0,16V}{T} \right] + 10 \lg \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 10 \lg \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad (3.15)$$

$$L_W = L_p + 10 \lg \left[\frac{A}{A_0} \right] - 10 \lg(0,16) + 10 \lg \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 10 \lg \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad (3.16)$$

$$L_W = L_p + 10 \lg \left[\frac{A}{A_0} \right] + 8 + 10 \lg \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 10 \lg \left(\frac{B}{1000} \right) - 14 \quad (3.17)$$

Neste último passo da transformação, ainda segundo ISO 3741 de 1988:

$$L_W = L_p + 10 \lg \left[\frac{A}{A_0} \right] + 10 \lg \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 10 \lg \left(\frac{B}{1000} \right) - 6 \quad (3.18)$$

O equacionamento proposto pelo projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 em 2006, na sua Subseção 9.1.4, aponta novamente para mudanças nas correções relativas à temperatura e pressão barométrica; ver Equações 3.19, 3.20 e 3.21. Os valores atribuídos a θ_0 e θ_1 são dados no projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741:2006.

$$L_W = \overline{L_{p(ST)}} + \left\{ 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) + 4,34 \frac{A}{S} + 10 \log \left(1 + \frac{S \cdot c}{8V \cdot f} \right) + C_1 + C_2 - 6 \right\} \text{ em dB} \quad (3.19)$$

$$C_1 = -10 \log \left(\frac{B}{B_0} \right) + 5 \log \left(\frac{273,15 + \theta}{\theta_0} \right) \text{ em dB} \quad (3.20)$$

$$C_2 = -10 \log \left(\frac{B}{B_0} \right) + 15 \log \left(\frac{273,15 + \theta}{\theta_1} \right) \text{ em dB} \quad (3.21)$$

Pode-se concluir que as correções na formulação para os cálculos dos níveis de potência sonora são de valores *de pequena magnitude*, mas no caso de calibração de fontes sonora de referência as correções podem significar diferenças consideráveis nos resultados, por exemplo.

Os demais tópicos pertinentes às medições de potência sonora são apresentados nos capítulos dedicados aos resultados experimentais nesta tese. De forma a contemplar a metodologia experimental desenvolvida durante as medições.

Capítulo 4

Ensaaios de determinação de potência sonora com fonte sonora BK 4204 do LVA-UFSC

Com o objetivo de investigar as incertezas de determinações de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto foram feitos alguns ensaios com fonte sonora modelo BK 4204 em câmaras reverberantes do LVA-UFSC⁶⁰ e um ensaio em câmara reverberante do LAENA-INMETRO⁶¹. A fonte sonora usada nos ensaios é propriedade do LVA-UFSC, e o ensaio feito no LAENA-INMETRO teve grande importância no sentido de comparação laboratorial com um laboratório de referência nacional, além de ser laboratório metrológico reconhecido internacionalmente. Portanto, a fonte sonora BK 4204 foi um artefato de comparação laboratorial, além de ser objeto das investigações de parâmetros relacionados com incertezas de medição.

Neste capítulo são apresentados alguns detalhes pertinentes aos cálculos de determinação de potência sonora e cálculos de incertezas, além de comparações entre os resultados encontrados. Os cálculos de incertezas foram desenvolvidos como uma abordagem mista, incluindo estimativas de incertezas “Tipo A” e “Tipo B”. Isto seguindo os preceitos encontrados no *Guia para a expressão da incerteza de medição*, também chamado ISO GUM, ou ISO GUIA. Foi enfatizado o estudo das contribuições de fontes de incertezas através de gráficos que apresentam as estimativas de incertezas elevadas ao quadrado por bandas de terço de oitavas e contribuição de incerteza para o nível de potência sonora global.

⁶⁰ Laboratório de Vibrações e Acústica – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina.

⁶¹ Laboratório de Ensaios Acústicos – Divisão de Acústica e Vibrações – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.

As normas internacionais mais relevantes para os procedimentos tratados neste capítulo são: ISO 3741 – *Acústica – Determinação de níveis de potência sonora de fontes de ruído usando pressão sonora – Métodos de precisão para câmaras reverberantes*⁶², ISO 354 – *Acústica – Medição de absorção sonora em câmara reverberante*⁶³, ISO 6926 – *Requisitos de desempenho e calibração de fontes sonoras de referência usadas para a determinação de níveis de potência sonora*⁶⁴. Ao final deste capítulo é apresentada uma análise geral dos resultados obtidos através de ensaios com a fonte BK 4204. São quinze resultados de níveis globais de potência sonora, sendo que um deles foi obtido do certificado do fabricante, dois foram obtidos em ensaios no LVA em 2001, e os demais são resultados de ensaios feitos em 2005 no LVA-UFSC e no LAENA-IMETRO.

4.1 Medições com fonte sonora BK 4204 no LVA-UFSC

Foram realizados sete ensaios de determinação de níveis de potência sonora com a fonte sonora BK 4204 no LVA-UFSC que são apresentados em detalhes neste capítulo. Seis ensaios foram realizados nas câmaras reverberantes e um ensaio em câmara semi-anecóica. Este último foi interessante no sentido de ter uma comparação com um método cujo princípio de medição é totalmente diferente daquele usado em câmaras reverberantes, além de ser um método usado pelo fabricante da fonte sonora para fazer a calibração das mesmas. Também são apresentados resultados de ensaio antigo feito no LVA com a mesma fonte BK 4204, além de resultados da calibração de fábrica obtidos do certificado original do fabricante; Brüel & Kjær.

As baterias de ensaios feitas no LVA que são reportadas mais detalhadamente foram realizadas em fevereiro, julho, agosto e novembro de 2005. Também é reportado o resultado de um ensaio feito em 2001 na câmara reverberante de 145 m³, mas sem detalhes dos cálculos e correções que foram feitos na época.

⁶² Do original em inglês: ISO 3741:1999 – Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation rooms.

⁶³ Do original: ISO 354 – Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room.

⁶⁴ Do original: ISO 6926:1999 – Acoustics – Requirements for the performance and calibration of reference sound sources used for the determination of sound power levels.

4.1.1 Equipamentos e métodos de medição utilizados no LVA-UFSC

Um dos principais objetos das investigações metrológicas realizadas, a fonte sonora aerodinâmica Brüel & Kjær Type 4204, ou BK 4204, tem características de desempenho de acordo com a norma ISO 6926, que diz respeito a fontes sonoras de referência (*RSS – Reference sound source*) e aos requisitos de desempenho e calibração das mesmas. Este tipo de fonte sonora é comumente usado para ensaios de determinação de níveis de potência sonora pelo método da comparação, ou seja, a fonte sonora de referência neste caso será o padrão metrológico e outra fonte sonora qualquer⁶⁵ terá seus níveis de potência sonora determinados por método de comparação. Devido às suas características metrológicas, as fontes sonoras modelo BK 4204, dentre outras, podem ser usadas como artefatos de comparações laboratoriais de potência sonora. Nos ensaios cujos resultados são descritos e analisados nas subseções a seguir foi usado o método direto de determinação de níveis de potência sonora. De fato, a fonte sonora BK4204 do LVA não possui um certificado de calibração atual, porém isto não impede que a fonte seja usada para ensaios de comparação como foi feito entre o LVA e o LAENA-INMETRO.

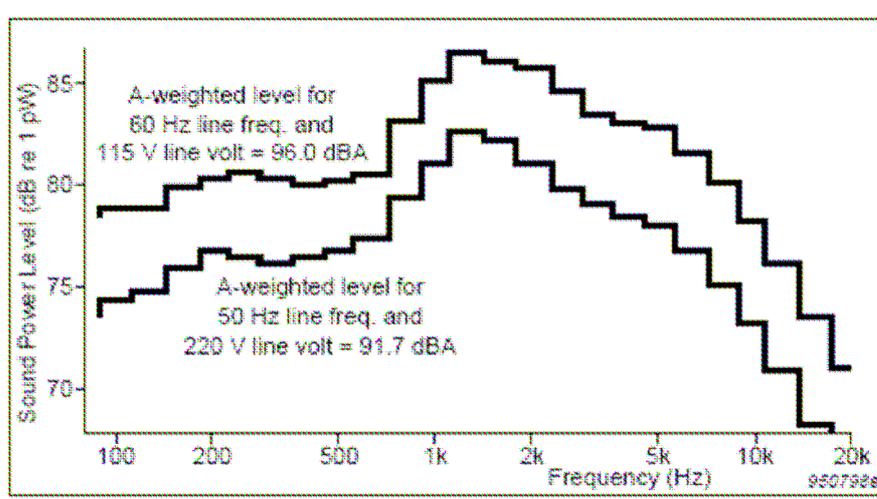


Figura 14 - Espectros de níveis de potência sonora típicos de fontes sonoras modelo BK 4204. FONTE: Brüel & Kjær.

Uma das principais características da fonte sonora que foi investigada experimentalmente neste trabalho é o espectro sonoro de potência; níveis de potência sonora por bandas de terço de oitavas. Na Figura 14 é mostrado um gráfico fornecido pelo fabricante da fonte sonora (Brüel & Kjær) com duas curvas típicas de níveis de potência sonora de fonte modelo BK 4204, em dB. Neste caso, a alimentação da rede elétrica com tensões e frequências

⁶⁵ Fontes sonoras que possam estar (ou ser instaladas) na câmara acústica para ensaio pelo método da comparação com fonte sonora de referência.

de: 115 volts / 60 Hz e 220 volts / 50 Hz foi utilizada para gerar o gráfico da Figura 14. Nos ensaios feitos com a fonte BK 4204 do LVA a alimentação da rede elétrica foi exclusivamente 220 volts / 60 Hz.

Os seguintes equipamentos foram usados nas medições:

- fontes sonoras eletroacústicas BK 4205 e BK 4241 (“dodecaedro”), marca Brüel & Kjær;
- microfones de medição de meia polegada pré-polarizados marca GRAS modelo 40AE (ver Figura 18);
- pré-amplificadores de medição GRAS 26CA;
- analisador dinâmico de sinais PULSE 3560-C (ver Figura 16) marca Brüel & Kjær;
- calibrador de nível sonoro Larson Davis modelo CAL250 (250 Hz, 114 dB nominais);
- calibradores de nível sonoro GRAS modelo 42AB (1000 Hz, 114 dB nominais);
- microcomputador portátil.

Na Figura 15 é apresentado um diagrama de etapas de medição necessárias para a determinação de níveis de potência sonora (L_w) pelo método direto em câmaras reverberantes. Neste caso a fonte sob teste é a fonte sonora BK 4204, mas nas outras medições foram utilizadas outras fontes de ruído, tais como liquidificador e secador de cabelo, por exemplo.

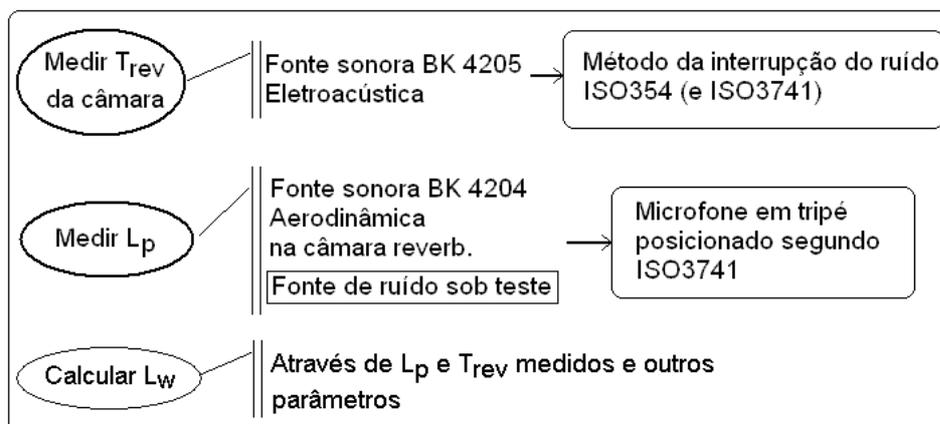


Figura 15 – Diagrama simplificado do procedimento de determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto.

Foi usado microcomputador portátil para comunicar-se com o módulo do analisador de sinais Pulse através de cabo de rede local (LAN). Isto em uma configuração chamada single front-end que é equipada com apenas um analisador de sinais; ver Figura 16.

Para efetuar as medições de tempos de reverberação pelo método de interrupção do ruído foram usadas fontes sonoras eletroacústicas *Type 4241* “dodecaedro” e *Type 4205* de Brüel & Kjær, ver figuras 27 (d) e 17, respectivamente. Para implementar a excitação da fonte sonora dodecaedro foi necessário um amplificador de potência e o sinal de ruído foi gerado através do analisador de sinais BK PULSE. Uma vantagem foi a automatização da interrupção do ruído através de software Pulse Labshop, sendo que o tempo de excitação sonora da câmara reverberante e o momento da interrupção do ruído poderiam ser configurados pelo operador via software, ao invés de ser operado manualmente. Em medições de tempos de reverberação feitas segundo a norma internacional⁶⁶ ISO 354, quando a faixa de frequências de interesse envolve bandas abaixo de 300 Hz são requeridas duas posições de fonte sonora eletroacústica no mínimo. Além disto, é solicitado que as medições sejam feitas em três posições de microfone(s), no mínimo, e que sejam distantes $\lambda/2$ umas das outras; sendo $\lambda/2$ equivalente a meio comprimento de onda da frequência central da banda de menor frequência de interesse. Outra exigência refere-se ao número de decaimentos individuais que devem ser no mínimo doze quando as bandas de 100 a 250 Hz estão na faixa de interesse. As distâncias entre microfone(s) e paredes da câmara reverberante devem ser de no mínimo 1 m e distâncias entre microfone(s) e fonte sonora mínima de 2 m.

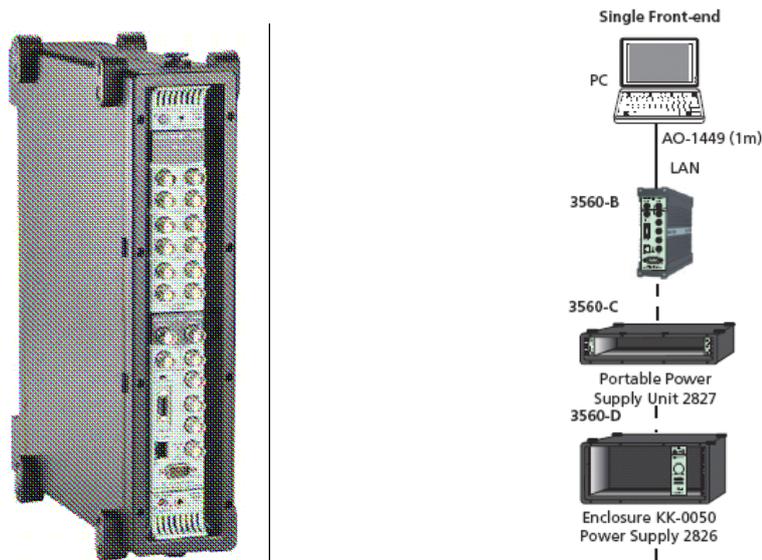


Figura 16 - Analisador dinâmico de sinais Pulse 3560-C e diagrama de possibilidades de conexão a um microcomputador (PC) através de cabo de rede local; LAN (Local Area Network). Foram usados apenas o módulo 3560-C (foto à esquerda) e microcomputador. FONTE: Brüel & Kjær.

⁶⁶ Versão 1985.

Segundo a norma internacional ISO 3741, na sua Subseção 8.4.1, os tempos de reverberação, T_{rev} , a ser usados nos cálculos de determinação de níveis de potência sonora devem ser medidos de acordo com a norma ISO 354, porém se deve usar os primeiros 10 dB ou 15 dB de decaimento denominados T_{10} e T_{15} , respectivamente.



Figura 17 - Foto de fonte sonora eletroacústica BK 4205 e seu sistema com alto-falante HP1001.
FONTE: Brüel & Kjær.

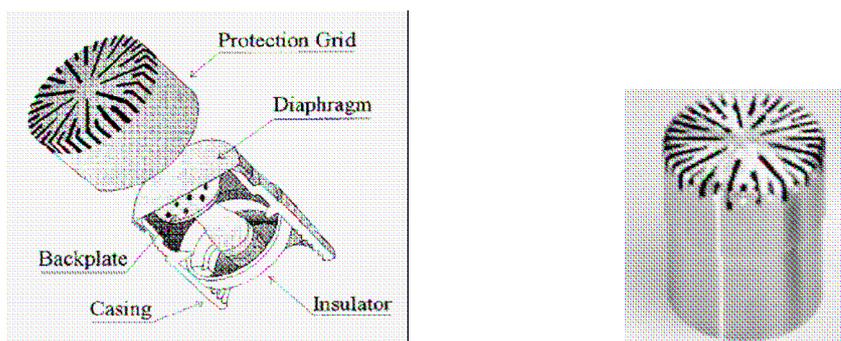


Figura 18 - À esquerda: Elementos básicos de um microfone de medição capacitivo: grade de proteção (protection grid), membrana metálica (diaphragm), placa traseira (backplate), invólucro (casing) e isolador elétrico (insulator). À direita: Foto de microfone capacitivo de meia polegada de diâmetro
FONTES: Per Rasmussen, **Acoustic Measurement**, CRC Press LLC, 2000. E catálogo G.R.A.S. Sound & Vibration.

Com relação ao ensaio em câmara semi-aneecóica, os níveis de pressão sonora, L_p , foram medidos em vinte posições durante trinta segundos no mínimo em cada posição. Ângulo de incidência das ondas sonoras no microfone foi de zero grau; microfone de campo livre GRAS 40AE. Foram aplicadas correções obtidas a partir das curvas de respostas em frequência em campo sonoro livre do certificado do fabricante dos microfones. As Equações 4.1, 4.2 e 4.3 são dadas na norma internacional ISO 3745 e foram usadas para calcular os níveis de potência sonora referentes ao ensaio em câmara semi-aneecóica.

$$\overline{L_p} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{0,1 L_{pi}} \right] \quad (4.1)$$

$$L_w = \overline{L_p} - 10 \log_{10} (2\pi \cdot r^2) + C \quad (4.2)$$

$$C = -10 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{293}{273 + \theta}} \cdot \frac{B}{1000} \right) \quad (4.3)$$

onde θ é a temperatura em graus Celsius, B é a pressão atmosférica em milibar, e r é a distância entre o microfone de medição e o ponto central no piso abaixo da fonte sonora⁶⁷. A distância r foi estabelecida em 1,50 m. Na Equação 4.1, L_{pi} representa o nível de pressão sonora medido na i -ésima posição de microfone. $\overline{L_p}$ é o nível de pressão sonora médio, N é o número de posições de microfone em torno da fonte sonora, foram medidos os L_p em $N = 20$ posições. Na Equação 4.2, L_w é o nível de potência sonora calculado, relativo a ensaios em câmaras semi-aneecóicas. O símbolo C representa a correção do nível de potência sonora em função da temperatura e da pressão atmosférica no local do ensaio.

Para os cálculos de determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto foi utilizada a Equação 4.4. Os primeiros termos são baseados na formulação de Sabine, o fator de correção $4,34 \cdot A/S$ é relacionado à absorção sonora do ar⁶⁸, os outros fatores de correção são “de Waterhouse” e correção referente à temperatura ambiente e à pressão atmosférica. A Equação 4.4 é dada pela norma ISO 3741:1999. Na aplicação deste método todas as posições de microfone(s) foram aleatórias dentro das câmaras reverberantes e nos limites de distâncias requeridos em norma; nenhuma posição de microfone foi repetida em qualquer dos ensaios de medição dos níveis de pressão sonora L_p .

$$L_w = \overline{L_p} + \left\{ 10 \log \frac{A}{A_0} + 4,34 \frac{A}{S} + 10 \log \left(1 + \frac{S \cdot c}{8 \cdot V \cdot f} \right) - 25 \log \left[\frac{427}{400} \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}} \cdot \frac{B}{B_0} \right] - 6 \right\} \text{ dB} \quad (4.4)$$

onde:

- L_w é o nível de potência sonora da fonte sonora sob teste (dB)
- $\overline{L_p}$ é o nível de pressão sonora médio proveniente das medições na câmara reverberante (dB)
- A é a área equivalente de absorção sonora da câmara reverberante (m^2), dada na Equação 4.5

⁶⁷ Considerado o ponto central abaixo da fonte sonora como sendo, aproximadamente, o centro acústico da fonte sonora sob teste; sobre o plano refletor.

⁶⁸ Fator de correção $4,34 \cdot A/S$ pesquisado por M. Vorländer (1995). (Acustica, vol. 81, 1995, p.332-343).

A_0	$= 1 \text{ m}^2$
S	é a área de superfície interna total da câmara reverberante (m^2)
V	é o volume da câmara reverberante (m^3)
f	é a frequência central de cada banda medida (Hz)
c	é a velocidade do som na temperatura ambiente θ $c = 20,05 \sqrt{273 + \theta} \text{ m/s}$
θ	é a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$)
B	é a pressão atmosférica (Pa)
B_0	$= 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$

$$A = \frac{55,26}{c} \left(\frac{V}{T_{rev}} \right) \quad (4.5)$$

onde T_{rev} é o tempo de reverberação da câmara reverberante, em cada banda de terço de oitava, em segundos. As medições de temperatura foram feitas com termo-higrômetro Minipa, modelo MT-242. As estimativas de pressão atmosférica foram obtidas através de boletins nos sites da Internet de órgãos de pesquisas meteorológicas, tais como o INPE. A velocidade de rotação da fonte sonora BK 4204 foi estimada através de sensor óptico acoplado à placa de aquisição de sinais de computador, no LVA-UFSC. Foram obtidos valores da ordem de 3173 a 3190 rpm, sendo que a velocidade de rotação média foi estimada em 3182 rpm (53,03 Hz). É importante enfatizar que a velocidade de rotação varia em função das variações da tensão e da frequência de alimentação provenientes da rede elétrica, e também pode ser influenciada pelas condições ambientais, isto devido ao princípio de funcionamento aerodinâmico da fonte sonora.

4.1.1.1 Correções das respostas dos microfones de medição

De acordo com a norma de determinação de níveis de potência sonora ISO 3741 de 1999, na sua Subseção 6.1, os microfones usados nas medições em câmaras reverberantes devem ser calibrados para incidência aleatória como especificado na norma IEC 61183 de 1994 (também denominada IEC 1183) – “Eletroacústica – Calibração de medidores de nível de pressão sonora em campo difuso e incidência aleatória”⁶⁹. Ou seja, procura-se determinar a resposta em frequência do(s) microfone(s) que for(em) utilizado(s) nas medições dos níveis de pressão sonora, L_p . Sendo que os microfones usados nestas circunstâncias estarão expostos a um

⁶⁹ Tradução livre do original em inglês: “*Electroacoustics – Random-incidence and diffuse-field calibration of sound level meters*”.

campo sonoro considerado difuso. Neste caso, a incidência das ondas sonoras sobre a membrana do microfone⁷⁰ tem caráter aleatório – ângulos de incidência aleatórios.

A norma IEC 1183:1994 cita dois tipos de procedimentos para calibração de microfones⁷¹ para obter a resposta em campo difuso com incidência aleatória. Um método é baseado em **medições em campo livre** e outro baseado em **medições em campo difuso**.

O método de calibração baseado em **medições em campo sonoro livre**⁷², deve ser realizado em câmara anecóica. De forma que através do material de absorção que reveste a câmara anecóica evitam-se as reflexões das ondas sonoras. Segundo a Subseção 4.10 da norma IEC 1183, no método de calibração baseado em campo livre, podem ser usados tons puros ou ruído de banda larga⁷³ os quais excitam um alto-falante, a fonte sonora. E esta última é posicionada em torno do medidor de nível de pressão sonora, mais exatamente em torno do centro acústico do microfone de medição que está acoplado ao medidor através do pré-amplificador. Há duas possibilidades de variação do ângulo de incidência, manter o microfone numa posição fixa e mover a fonte sonora em torno do microfone, ou manter a fonte sonora fixa e efetuar rotação do microfone em torno do seu centro acústico. Em ambas as situações a distância entre o alto-falante (fonte sonora) e o centro acústico do microfone deve ser mantida constante durante as medições. Segundo a Subseção 4.11 da norma IEC 1183, para assegurar resultados consistentes nos ensaios usando tons puros, devem-se utilizar no mínimo oito frequências discretas distribuídas equidistantemente em cada uma das bandas de terço de oitava. A Figura 19 mostra esboços de sistemas de coordenadas que são dados na norma IEC 1183:1994, onde a origem das coordenadas é o centro acústico do microfone. Os cálculos e equações relacionados com os parâmetros dados nestes sistemas de coordenadas não são comentados em detalhes nesta seção.

⁷⁰ A membrana metálica do microfone de medição capacitivo é o sensor, ou transdutor, que é sensível às ondas sonoras incidentes.

⁷¹ Esta norma é destinada para calibração do medidor de nível de pressão sonora em conjunto com o pré-amplificador e microfone de medição.

⁷² Citado no Capítulo 4 e no anexo A da norma IEC 1183:1994.

⁷³ No original: “(...) *discrete-frequency sinusoidal sounds or random noise.*”

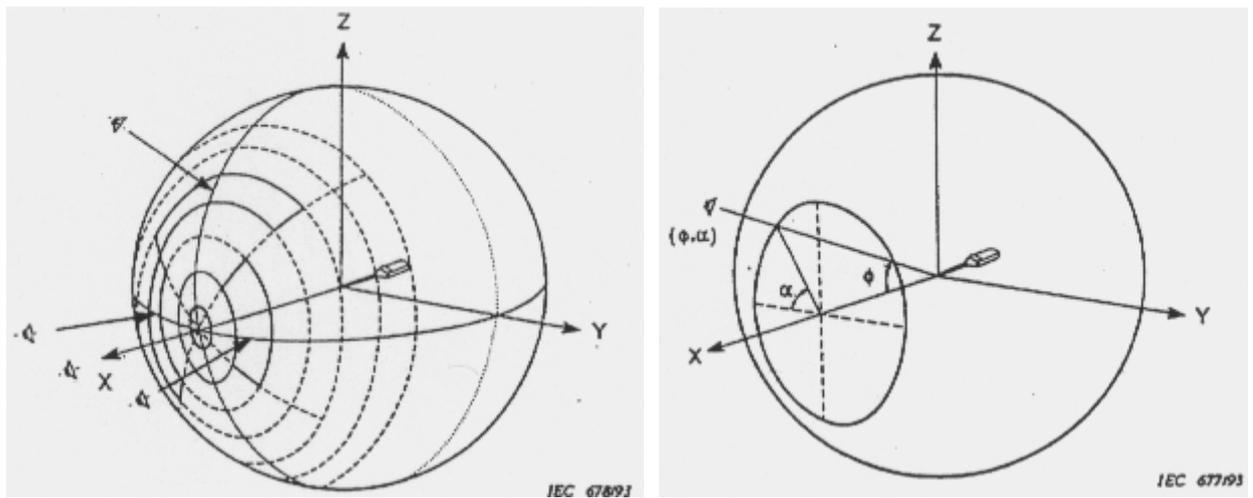


Figura 19 - Diagramas de coordenadas para medições práticas de sensibilidade de microfones baseadas em campo livre, com objetivo de calcular a sensibilidade em campo de incidência aleatória. FONTE: IEC 1183:1994 – Capítulo 4 e Anexo A.

Este tipo de ensaio baseado em campo sonoro livre pode ser usado para determinar a sensibilidade relativa aos ângulos de incidência das ondas sonoras (direcionalidade), como mostrado nas figuras 20 e 23. Nos gráficos da Figura 20 são mostradas as sensibilidades relativas, obtidas com microfone de meia polegada de Brüel & Kjær, em função dos ângulos de incidência nas frequências de 5, 10, 20 e 40 kHz. No centro da figura há um esboço do microfone indicando a referência angular dos gráficos, sendo que a referência adotada nos dois gráficos é no ponto correspondente a 0° e 0 dB. Pode-se notar que para as frequências de 5 a 10 kHz, dentre outras, a maior sensibilidade ocorre em 0° , e que conforme o ângulo de incidência varia em direção a 180° a sensibilidade tende a diminuir.

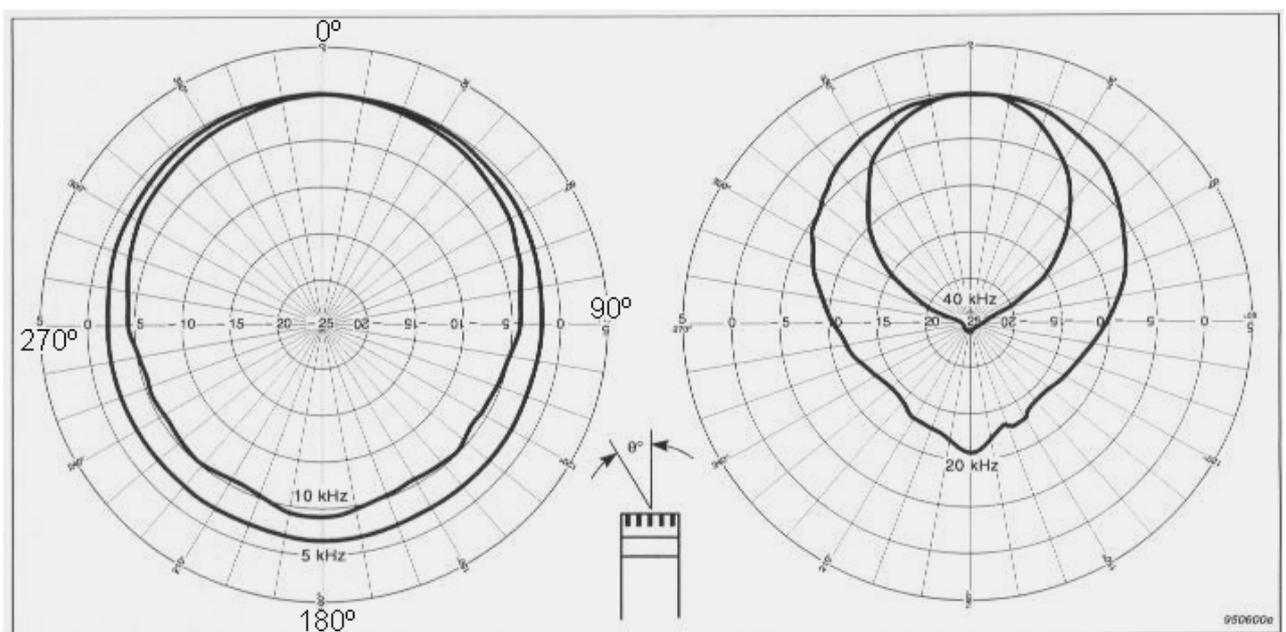


Figura 20 - Características típicas de direcionalidade de microfones de meia polegada, normalizadas para zero grau de incidência. Sensibilidade atinge cerca -5 dB entre 90° e 270° para frequência de 10 kHz. FONTE: Microphone Handbook, Brüel & Kjær.

Com relação à calibração baseada em **medições em campo sonoro difuso** a norma IEC 61183:1994, em sua Subseção B.1.2, recomenda⁷⁴ que seja usado um medidor de nível de pressão sonora de referência equipado com microfone de medição tipo LS2aP ou LS2F, ou LS2bP, estes códigos de padronização dizem respeito à microfones⁷⁵ de “padrão de laboratório” de meia polegada projetados para campo de pressão (P) ou campo livre (F). O microfone type 4180 de Brüel & Kjær (ou BK 4180), de meia polegada, é considerado um microfone tipo LS2aP; segundo catálogo deste fabricante. Os microfones modelos BK 4160 e BK 4180 são utilizados sem grade de proteção, como as que podem ser vistas na Figura 18, ao invés da grade usa-se um “anel adaptador” (*adaptor ring*). Para o microfone modelo BK 4180 usa-se o anel adaptador modelo UA 0825; ver Figura 21. Pode-se notar que a membrana metálica fica exposta, sendo necessário extremo cuidado para que nenhum objeto toque a membrana, caso contrário o microfone pode ficar seriamente danificado.

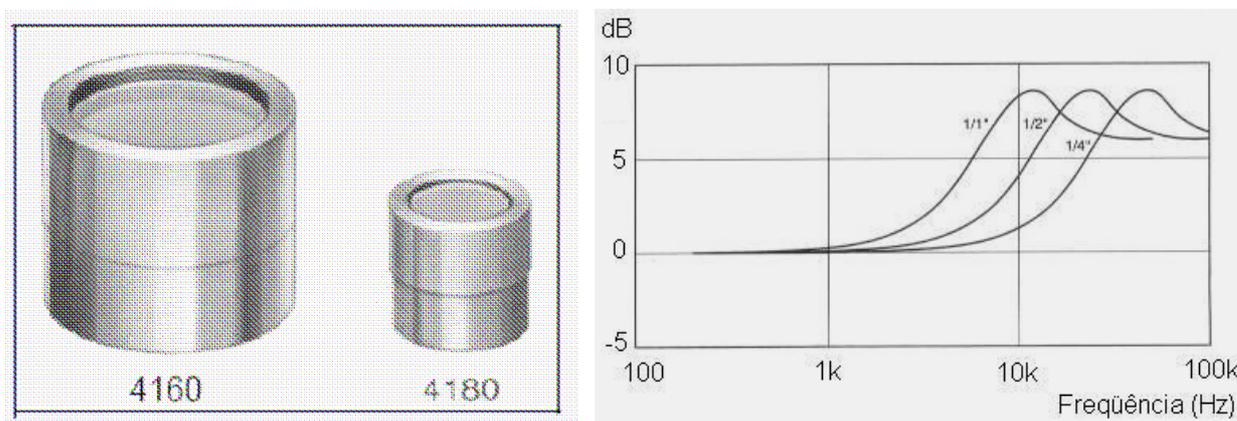


Figura 21 - Microfones modelos 4160 e 4180, de uma polegada e meia polegada, respectivamente. Com anéis adaptadores e membranas metálicas expostas (a esquerda). Gráfico com curvas típicas relativas às respostas de microfones de uma polegada, meia polegada e um quarto de polegada (a direita). Em altas frequências há forte dependência da resposta em função do diâmetro do microfone. FONTE: Brüel & Kjær.

O gráfico da Figura 21 mostra curvas de respostas em frequência atribuídas à microfones de medição de diferentes diâmetros; para ângulo de incidência 0°. Nota-se que quanto maior for o diâmetro do microfone, menor será a frequência onde ocorre o pico da resposta. Neste trabalho foi enfatizado o uso de microfones de meia polegada para realizar os ensaios de determinação de níveis de potência sonora.

⁷⁴ O anexo B da norma IEC 1183:1994 é informativo, portanto não é normativo.

⁷⁵ LS significa “*Laboratory standard*”, o número 2 significa meia polegada; P significa “*pressure field*” (campo de pressão), F significa “*free field*” (campo livre). A norma IEC 1183 cita que os microfones padronizados (considerados) como LS2aP, LS2F e LS2bP devem estar de acordo com especificações da norma IEC 1094-1 – *Measurement microphones – Part 1: Specifications for laboratory standard microphones*, (1992).

De acordo com a Subseção 5.1 da norma IEC 61183:1994, é aceitável utilizar microfones que têm calibração em campo livre ou calibração em campo de pressão para que seja obtida a resposta corrigida para campo difuso do respectivo microfone:

“5.1 - O método de calibração em campo difuso é baseado na comparação do nível de sensibilidade em campo difuso do medidor de nível sonoro, com o nível de sensibilidade em campo difuso do medidor de nível sonoro de referência quando o microfone do dispositivo sob teste e o microfone do sistema de referência são colocados sucessivamente no mesmo exato local em um campo sonoro difuso. O medidor de nível sonoro de referência pode ser calibrado pelo método baseado em medições em campo livre (Capítulo 4 da norma), calibrado em campo livre se os fatores de direcionalidade são conhecidos, ou calibrados em campo de pressão se as diferenças entre os níveis de sensibilidade de campo difuso e campo de pressão são conhecidas (anexo B e Tabela B.1 da norma).”

De qualquer maneira, os métodos citados acima têm diferenças entre os procedimentos e os parâmetros utilizados para se obter a resposta em campo difuso do(s) microfone(s). Na seqüência será enfatizado o método de calibração cujo microfone a ser calibrado tem sua curva de resposta em campo de pressão conhecida e deseja-se obter a curva de resposta em campo difuso⁷⁶. O anexo B da norma IEC 61183 (“Método de calibração prático baseado em medições em campo difuso”) é informativo. Segundo sua Subseção B.1.3, tanto o microfone⁷⁷ sob teste quanto o microfone de referência devem seguir uma trajetória circular dentro da câmara reverberante. E o raio desta trajetória circular deve ser maior que 1 metro; ver Figura 22. De acordo com a Subseção 5.6 da norma IEC 61183 de 1994, as medições de níveis de sensibilidade em campo difuso devem ser desenvolvidas em câmara reverberante qualificada segundo os requisitos da norma ISO 3741; na verdade, segundo o anexo A da antiga norma ISO 3741; de 1988. E além destes requisitos e/ou recomendações, segundo B.1.4 da IEC 61183, a difusividade do campo sonoro dentro da câmara reverberante pode ser melhorada ao se utilizar duas fontes sonoras; ver ilustração na Figura 22.

“B.1.4 – A difusividade do campo sonoro pode ser melhorada ao se usar no mínimo duas fontes sonoras omnidirecionais ao mesmo tempo. Os sinais não devem ser correlacionados e devem ter potências sonoras similares para todas as bandas de frequências (por exemplo, duas fontes sonoras do mesmo tipo). Deve ser tomado cuidado para garantir tempos de integração longos o suficiente para as medições de níveis de pressão sonora pelo medidor de nível sonoro de referência e o medidor de nível sonoro sob teste.”

Na nota que segue a Subseção B.1.4 da norma, é afirmado que são necessários tempos de integração (tempos de medição) superiores a 15 minutos para frequências inferiores a 125 Hz.

⁷⁶ Este método foi utilizado nos ensaios no LAENA-INMETRO para calibração dos microfones, os quais foram usados para a determinação de níveis de potência sonora da fonte BK 4204 do LVA-UFSC.

⁷⁷ O microfone, ou o medidor de nível de pressão sonora juntamente com pré-amplificador e microfone acoplados.

No Capítulo 5 da norma IEC 61183:1994, através das suas Equações 8 e 11, são estabelecidos os parâmetros necessários para calcular a resposta em campo difuso de um microfone cuja resposta em campo de pressão é previamente conhecida. Estes parâmetros são dados a seguir através das Equações 4.6 e 4.7. Para cada banda de frequência, a diferença entre os níveis de sensibilidade de campo difuso, ΔG_D , é dada, em decibéis, por:

$$\Delta G_D = L_D - L_{D,ref} \quad (4.6)$$

onde: L_D é o nível de pressão sonora indicado pelo medidor de nível sonoro sob teste, em decibéis; $L_{D,ref}$ é o nível de pressão sonora indicado pelo medidor de nível sonoro de referência, em decibéis.

A Equação 4.7 corresponde à Equação 11 da norma IEC 61183, a qual deve ser aplicada se “o medidor de nível sonoro de referência (microfone de referência) é calibrado em campo de pressão e as diferenças entre os níveis de sensibilidade em campo difuso e os níveis de sensibilidade em campo de pressão são conhecidos (por exemplo, valores da Tabela B.1 da norma IEC 61183:1994)”. Neste caso, os níveis de sensibilidade do microfone em campo difuso G_D deverão ser calculados, em decibéis, através de:

$$G_D = \Delta G_D + (G_{P,ref} + \Delta_{DP}) \quad (4.7)$$

onde: $G_{P,ref}$ é o nível de sensibilidade de pressão⁷⁸, em decibéis, do medidor de nível de pressão sonora de referência; Δ_{DP} é a diferença entre o nível de sensibilidade em campo difuso⁷⁹ e o nível de sensibilidade em campo de pressão do medidor de nível de pressão sonora de referência, em decibéis. Os valores de Δ_{DP} são dados na Tabela B.1 da norma IEC 61183 a qual foi reproduzida parcialmente através da Tabela 4.1. Estes valores são considerados características de respostas relativas aos microfones tipo LS2aP.

⁷⁸ No original: “pressure sensitivity level”.

⁷⁹ No original: “diffuse-field sensitivity level”.

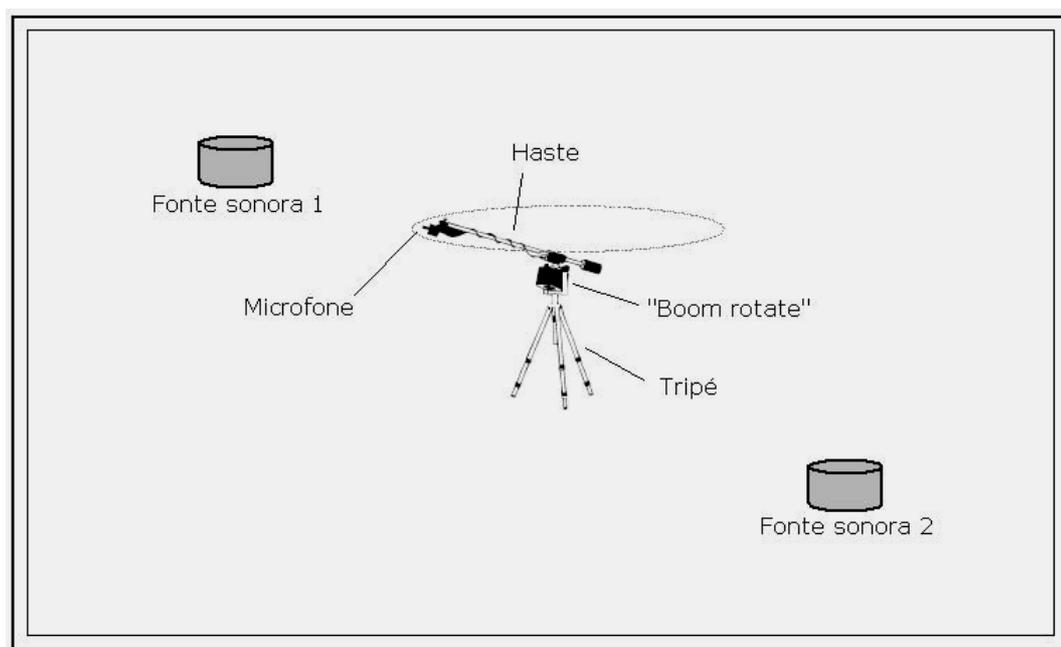


Figura 22 - Esboço de configuração de câmara reverberante para o ensaio de calibração de microfones baseado em medições em campo sonoro difuso, incidência aleatória, segundo norma IEC 1183:1994. “Boom rotate” faz com que o microfone gire em trajeto circular durante medições. É recomendado o uso de duas fontes sonoras para aumentar a difusão (difusividade) do campo sonoro dentro da câmara.

Mais detalhes de aplicação dos cálculos de calibração em campo sonoro difuso são dados na Subseção 4.2.1.1, a qual se refere aos ensaios desenvolvidos no LAENA-INMETRO.

Tabela 4.1 - Características de resposta em campo difuso de microfones tipo LS2aP segundo norma internacional IEC 61183 de 1994; também denominada IEC 1183. Adaptada da Tabela B.1 da norma.

Freqüência (Hz)	Diferença entre os níveis de sensibilidade em campo sonoro difuso e campo sonoro de pressão Δ_{DP} (dB)
25 a 800	0,00
1000	0,00
1250	0,00
1600	0,05
2000	0,10
2500	0,10
3150	0,15
4000	0,25
5000	0,40
6300	0,65
8000	1,20
10000	1,90

Nota: todos os valores foram determinados usando tons puros.

Foi realizado um ensaio prévio de calibração de microfone baseado em medições em campo sonoro livre na câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC. O ensaio foi baseado no Capítulo 4 e no anexo A da norma IEC 1183 de 1994. Neste ensaio foi posicionada uma caixa

acústica a 1 metro de distância do microfone de medição GRAS modelo 40AE, o qual estava a cerca de 1,5 metro das cunhas de espuma que revestem a câmara, proporcionando absorção sonora. Foram ensaiados tons discretos (tons puros) entre 250 Hz e 8 kHz, em ângulos de 0° a 180° com passo de 10°, cujos resultados podem ser vistos no gráfico da Figura 23. A variação de ângulo de incidência foi obtida girando-se o suporte do pré-amplificador e microfone sobre um dispositivo fixado ao tripé, e acompanhando a variação na escala angular (“transferidor”) também fixada ao tripé. Além disto, foi necessário cobrir parte do piso da câmara semi-anecóica para evitar reflexões das ondas sonoras no piso.

Os resultados obtidos neste teste prévio de calibração do microfone ficaram dentro do padrão esperado apenas nas frequências de 250 Hz a 2 kHz; ver Figura 23. Nas frequências de 4 e 8 kHz o comportamento das respostas em função do ângulo de incidência mostrou um aumento inesperado na sensibilidade do microfone (ou, na realidade, no nível de pressão sonora captado pelo microfone) em ângulos próximos a 180°. Na frequência de 8 kHz houve uma ênfase inesperada na resposta obtida em ângulos de incidência próximos a 60°. Estes resultados em altas frequências indicam que pode ter havido erros devido à reflexões das ondas sonoras nas cunhas de espuma que revestem a câmara e/ou devido à presença de lóbulos na irradiação sonora da caixa acústica (alto-falante) principalmente nas frequências mais altas. Além das causas “acústicas de erro” é possível atribuir parte dos erros de medição ao posicionamento do microfone sobre o tripé e dispositivo de medição angular, ou seja, durante as variações de ângulos o operador não consegue garantir que a posição do microfone (centro acústico do microfone) seja exatamente a mesma, a qual poderá variar em alguns milímetros ou um centímetro aproximadamente.

Não foram realizados outros ensaios de calibração baseada em medições em campo livre no LVA-UFSC para os fins deste trabalho de tese. Os resultados obtidos **não** mostraram confiabilidade, principalmente devido aos problemas relacionados a possíveis reflexões (indesejáveis) nas cunhas de absorção sonora da câmara semi-anecóica. A partir desta consideração, os microfones GRAS 40AE utilizados nas medições em campo difuso foram corrigidos apenas pela respostas em campo livre⁸⁰, sendo considerados omnidirecionais no critério relativo aos ângulos de incidências das ondas sonoras. Isto tende a provocar desvios sistemáticos nas medições de níveis de pressão sonora, pelo fato de não efetuar um dos tipos de correções inerentes a este processo de medição. Conseqüentemente poderá haver desvios sistemáticos nos resultados de determinações de níveis de potência sonora devido a não correção de resposta em campo difuso do(s) microfone(s) utilizado(s).

⁸⁰ Encontradas em certificados do fabricante: G.R.A.S Sound & Vibration, Dinamarca.

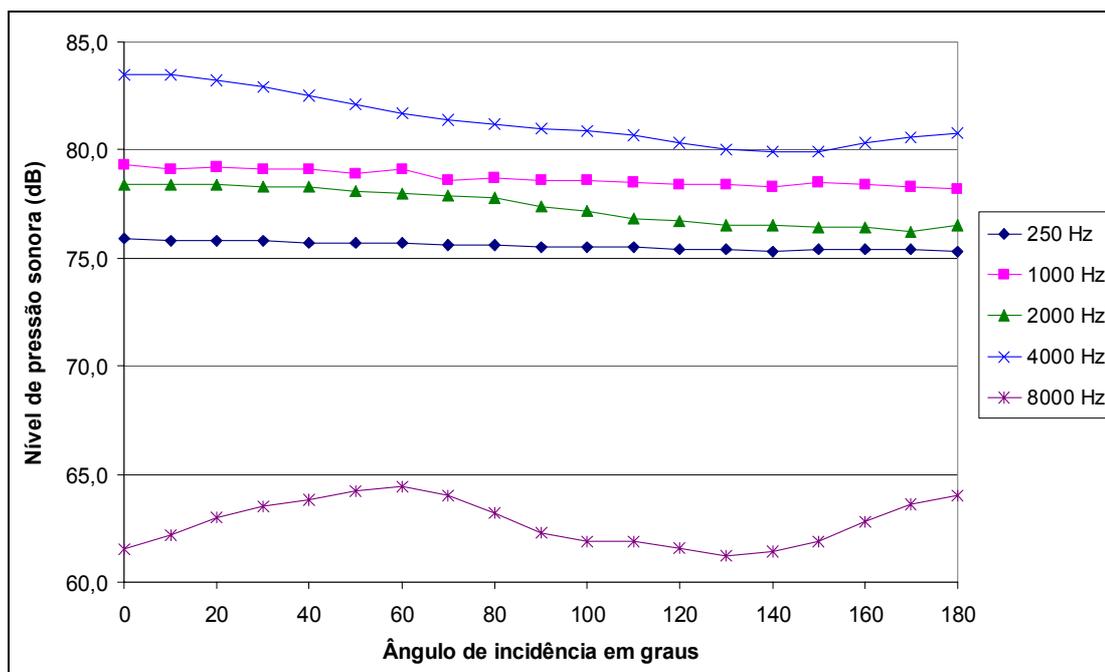


Figura 23 - Níveis de pressão sonora obtidos em ensaio de direcionalidade com microfone modelo GRAS 40AE em câmara semi-aneecóica LVA-UFSC.

Nos ensaios feitos no LVA-UFSC foram aplicadas apenas correções referentes às respostas dos microfones em campo sonoro livre que são dadas na Tabela 4.2; tanto na câmara reverberante quanto na câmara semi-aneecóica. Os valores de resposta em campo livre dos dois microfones foram estimados a partir dos gráficos fornecidos pelo fabricante, os quais estão representados nas figuras 24 e 25.

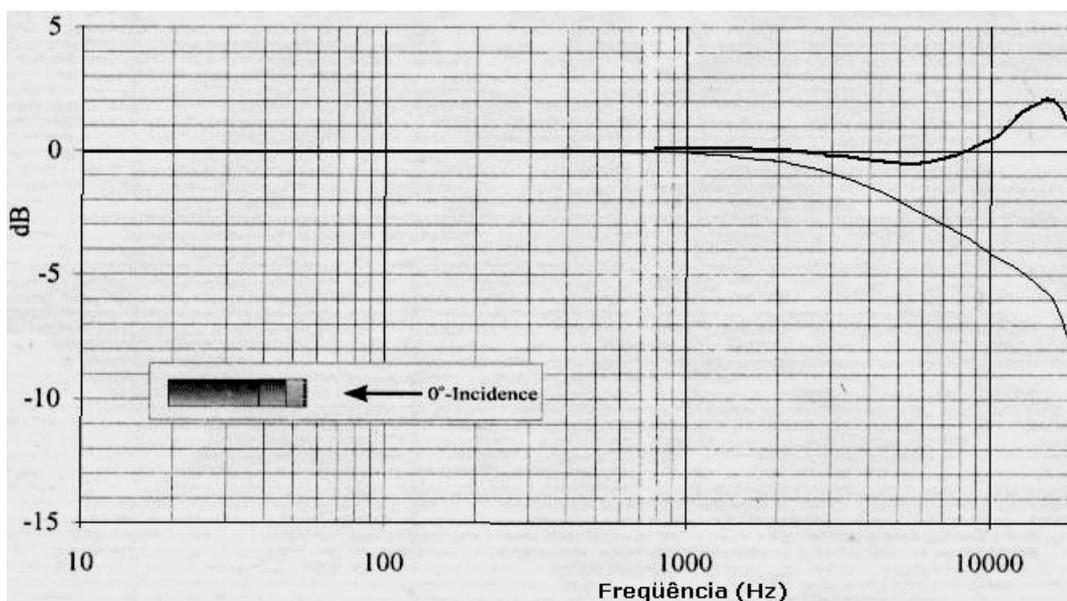


Figura 24 - Gráfico de curva de resposta em campo sonoro livre, incidência 0°, do microfone marca GRAS modelo 40AE número de série 34581 fornecido no certificado do fabricante. Curva superior é a resposta em campo livre; curva inferior é atribuída à resposta em campo de pressão obtida com atuador eletrostático. FONTE: G.R.A.S. Sound & Vibration, Dinamarca.

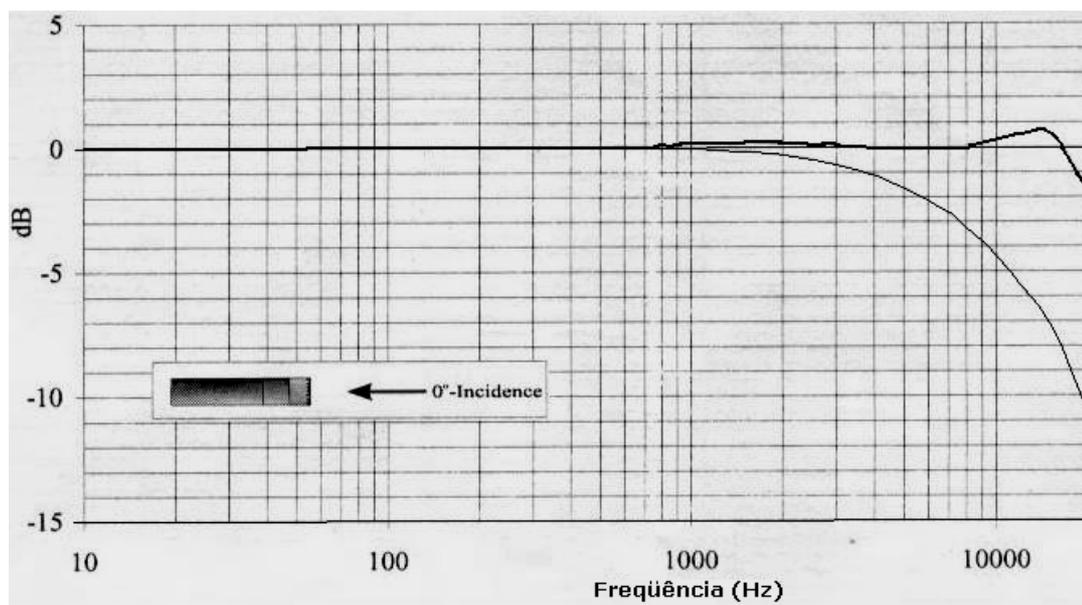


Figura 25 - Gráfico de curva de resposta em campo sonoro livre, incidência 0°, do microfone marca GRAS modelo 40AE número de série 34583 fornecido no certificado do fabricante. Curva superior é a resposta em campo livre; curva inferior é atribuída à resposta em campo de pressão obtida com atuador eletrostático. FONTE: G.R.A.S. Sound & Vibration, Dinamarca.

A partir das curvas superiores das figuras 24 e 25 foram estimados os valores apresentados na Tabela 4.2. As curvas dos gráficos são as tendências (T_d) que tiveram o sinal “invertido” para corresponder às correções (C). Ou seja, $C = -T_d$ corresponde às correções apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores das correções aplicadas aos resultados brutos das medições de níveis de pressão sonora obtidos com microfones marca GRAS modelo 40AE, números de série 34581 e 34583. Valores foram estimados através de curvas de respostas em campo livre de certificados do fabricante.

Frequência (Hz)	Correções de campo sonoro livre estimadas (dB)	
	Microfone. n° 34581	Microfone. n° 34583
100	0,0	0,0
125	0,0	0,0
160	0,0	0,0
200	0,0	0,0
250	0,0	0,0
315	0,0	0,0
400	0,0	0,0
500	0,0	0,0
630	0,0	0,0
800	0,0	0,0
1000	0,0	0,0
1250	0,0	0,0
1600	0,0	0,0
2000	0,0	-0,1
2500	0,0	0,0
3150	0,1	0,0
4000	0,3	0,0
5000	0,4	0,0
6300	0,4	0,0
8000	0,0	0,0
10000	-0,5	-0,3

Estimar as correções de campo livre em pontos das curvas de resposta não é o melhor método a ser utilizado. Isto porque não se conhecem o método usado para plotar as curvas de respostas destes microfones, nem os pontos de medição (valores de frequências e em dB) que originaram essas curvas. Uma alternativa “mais correta” seria o fabricante fornecer os valores numéricos da resposta de cada microfone nas diversas bandas de terço de oitavas, e inclusive valores intermediários para melhorar as estimativas das tendências inerentes à resposta em frequência do microfone de medição utilizado. Como os certificados não apresentaram valores numéricos, restou a alternativa de estimar as correções através das curvas de respostas. Estes tipos de procedimentos tendem a aumentar as incertezas de medição global relativas aos níveis de potência sonora a serem determinados nos ensaios.

4.1.1.2 Câmaras reverberantes utilizadas no LVA-UFSC

Foram utilizadas duas câmaras reverberantes no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) para ensaios de determinação de níveis de potência sonora L_W das fontes de ruído e fontes sonoras aerodinâmicas. As duas câmaras são contíguas e entre elas foi instalado um conjunto de portas acústicas que podem ser vistas nas fotos da Figura 26 (b) e (d). Fotos do interior da **câmara 1** (145,09 m³, também denominada **145 m³**) podem ser vistas na Figura 26 (c) (d) e (f), e fotos do interior da **câmara 2** (192,67 m³, também denominada **193 m³**) na Figura 26 (a) (b) e (e).

Estas câmaras reverberantes são equipadas com alguns acessórios: a câmara de 193 m³ tem cinco painéis de absorção sonora⁸¹ construídos em madeira, que são móveis, e a câmara de 145 m³ tem sete difusores acústicos de formato cilíndrico construídos em acrílico, os quais são fixos. Basicamente, a função dos difusores acústicos é aumentar a difusividade do campo sonoro na câmara reverberante. A função dos painéis de absorção sonora é de diminuir os tempos de reverberação em bandas de baixas frequências. As portas acústicas das câmaras são constituídas de chapas metálicas duplas e materiais de absorção sonora no seu interior, além de ter vedações emborrachadas para proporcionar isolamento acústico adequado. Ver figuras 26 e 27.

As características de uma câmara reverberante que são importantes para o cálculo dos níveis de potência sonora são o volume e a área de superfície interna, conseqüentemente as incertezas destes parâmetros serão necessárias para os cálculos das estimativas de incertezas dos

⁸¹ Painéis projetados para absorção sonora em baixas frequências; entre 100 e 330 Hz. As posições dos painéis foram mantidas as mesmas para a realização de todos os ensaios no contexto deste trabalho de tese.

níveis de potência sonora. As dimensões das câmaras reverberantes foram medidas com trena e, por serem de formatos retangulares, os cálculos de volume e área de superfícies puderam ser desenvolvidos com equações simples e sem uso de ferramentas sofisticadas de CAD⁸².

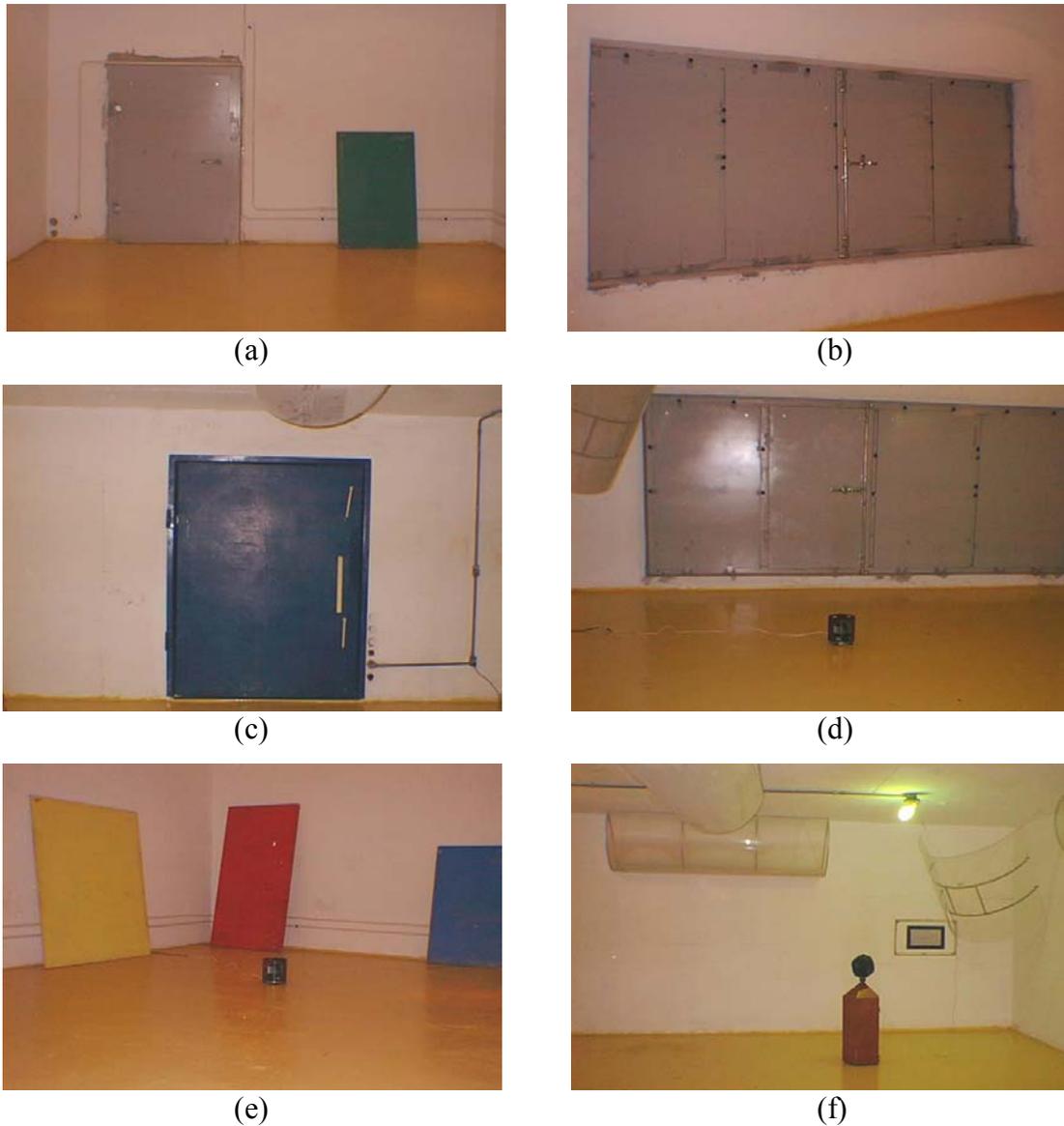


Figura 26 - Fotos das câmaras reverberantes de 145 m³ e 193 m³, câmara 1 e 2, LVA-UFSC: (a) porta acústica para o exterior da câmara (à esquerda) e um painel de absorção sonora; (b) portas acústicas entre as duas câmaras reverberantes; de 145 m³ e 193 m³. (c) porta acústica para o lado exterior, câmara de 145 m³; (d) Portas acústicas entre as duas câmaras reverberantes (vista da câmara de 145 m³), fonte sonora Vibranihil ao centro, e difusor acústico no canto acima; (e) três painéis de absorção sonora e fonte Vibranihil na câmara de 193 m³ nominal; (f) Fonte sonora eletroacústica BK 4241 “dodecaedro” e difusores acústicos acima, câmara de 145 m³.

⁸² CAD – abreviação de: *Computer Aided Design*, (Projeto auxiliado por computador).

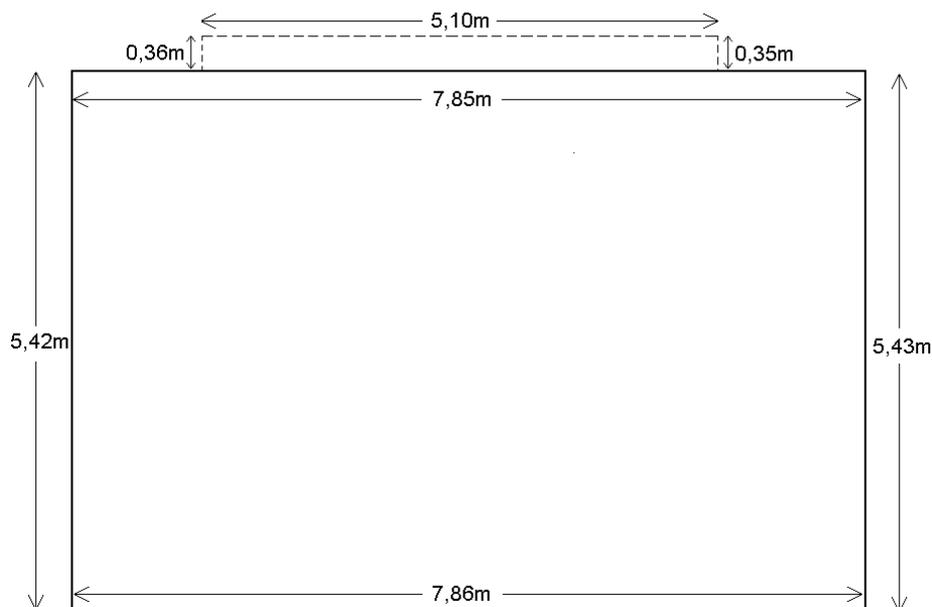


Figura 27 - Esboço das dimensões da câmara 2 (193 m^3) do LVA-UFSC. Largura e comprimento apenas, sem as dimensões de altura. Além das dimensões principais, há um volume de $5,10 \cdot 0,35 \cdot 2,00$ que foi computado no volume total da câmara 2.

Nas medições dimensionais feitas com trena houve variações típicas de $\pm 1 \text{ cm}$ inerentes às imperfeições da construção das câmaras reverberantes. Por exemplo, a altura de uma câmara quando medida em diferentes pontos (parte frontal e aos fundos) apresentou diferenças de até 2 cm . Além disto, foi considerada a incerteza inerente à trena de 1 cm , referente à resolução das anotações dos resultados destas medições. Desta análise foram feitas as estimativas de incertezas considerando que as dimensões de largura, comprimento e altura têm incertezas expandidas da ordem de $U = 2 \text{ cm}$ (equivalente a $0,02 \text{ m}$). Como a incerteza a ser calculada deve ser incerteza padrão, foi computado o valor $u = 1 \text{ cm}$ (com fator de abrangência $k = 2,0$, independentemente do número de graus de liberdade) nos cálculos de incerteza do volume e de área de superfície de cada câmara. As câmaras são retangulares, porém têm volumes extra devido a posição das portas entre as câmaras, ver Figuras 26 e 27. O conjunto de portas tem dimensões de aproximadamente $2,0 \text{ m}$ por $5,10 \text{ m}$.

Os cálculos de incerteza dos volumes das câmaras reverberantes são apresentados a seguir. O volume é dado pelo produto ($V = x.y.z$) de forma generalizada. São apresentadas duas formas de avaliação da incerteza de volume, uma considera que as medições das três dimensões são **totalmente correlacionadas** (correlação máxima), e outra considera que **não há correlação** entre as medições das dimensões de determinada câmara. De fato, foram adotados os valores que consideram a correlação entre as medições para os cálculos de incertezas de L_w .

Incerteza de volume calculada para a câmara de 193 m^3 , **câmara 2**:

(a) Correlação direta perfeita (correlação máxima) é dada pela relação:

$$\frac{u(V)}{V} = \frac{u(x)}{x} + \frac{u(y)}{y} + \frac{u(z)}{z} \quad (4.8)$$

$$\frac{u(V)}{7,85.5,45.4,42} = \frac{0,01}{7,85} + \frac{0,01}{5,45} + \frac{0,01}{4,42}$$

Resultando na incerteza padrão do volume principal de $u(V) = 1,01 \text{ m}^3$

Porém há incerteza da medição do volume adicional V_{ad} com dimensões (0,35; 5,10; 2,00) junto às portas acústicas laterais:

$$\frac{u(V_{ad})}{0,35.5,10.2,00} = \frac{0,01}{0,35} + \frac{0,01}{5,10} + \frac{0,01}{2,00}$$

Resultando na incerteza $u(V_{ad}) = 0,13 \text{ m}^3$, a qual somada com a incerteza $u(V)$ produz a incerteza total do volume da **câmara 2** equivalente a $u(V_{total_2}) = 1,14 \text{ m}^3$.

(b) Medições consideradas **não-correlacionadas**:

$$\left[\frac{u_{nc}(V)}{V} \right]^2 = \left[\frac{u(x)}{x} \right]^2 + \left[\frac{u(y)}{y} \right]^2 + \left[\frac{u(z)}{z} \right]^2 \quad (4.9)$$

$$\left[\frac{u_{nc}(V)}{7,85.5,45.4,42} \right]^2 = \left[\frac{0,01}{7,85} \right]^2 + \left[\frac{0,01}{5,45} \right]^2 + \left[\frac{0,01}{4,42} \right]^2$$

Resultando na incerteza $u_{nc}(V) = 0,60 \text{ m}^3$ relativa ao volume principal da câmara 2. A incerteza não correlacionada do volume adicional é dada por:

$$\left[\frac{u_{nc}(V_{ad})}{0,35.5,10.2,00} \right]^2 = \left[\frac{0,01}{0,35} \right]^2 + \left[\frac{0,01}{5,10} \right]^2 + \left[\frac{0,01}{2,00} \right]^2$$

Resultando em $u_{nc}(V_{ad}) = 0,10 \text{ m}^3$ de incerteza relativa apenas a medição do volume adicional junto as portas acústicas. Sendo que a incerteza do volume total, **não-correlacionada**, é estimada em $u_{nc}(V_{total_2}) = 0,70 \text{ m}^3$.

Incerteza de volume calculada para a câmara de 145 m^3 , **câmara 1**:

(a) Correlação direta perfeita (correlação máxima) é dada pela relação:

$$\frac{u(V)}{V} = \frac{u(x)}{x} + \frac{u(y)}{y} + \frac{u(z)}{z} \quad (4.8)$$

$$\frac{u(V)}{7,39.7,39.2,64} = \frac{0,01}{7,39} + \frac{0,01}{7,39} + \frac{0,01}{2,64}$$

Resultando na incerteza padrão do volume principal de $u(V) = 0,94 \text{ m}^3$

Porém há incerteza da medição do volume adicional V_{ad} com dimensões (0,09; 5,10; 2,00) junto às portas acústicas laterais:

$$\frac{u(V_{ad})}{0,09.5,10.2,00} = \frac{0,01}{0,09} + \frac{0,01}{5,10} + \frac{0,01}{2,00}$$

Resultando na incerteza $u(V_{ad}) = 0,11 \text{ m}^3$, a qual somada com a incerteza $u(V)$ produz a incerteza total do volume da **câmara 2** equivalente a $u(V_{total_2}) = 1,05 \text{ m}^3$.

(b) Medições consideradas **não correlacionadas**:

$$\left[\frac{u_{nc}(V)}{V} \right]^2 = \left[\frac{u(x)}{x} \right]^2 + \left[\frac{u(y)}{y} \right]^2 + \left[\frac{u(z)}{z} \right]^2 \quad (4.9)$$

$$\left[\frac{u_{nc}(V)}{7,39.7,39.2,64} \right]^2 = \left[\frac{0,01}{7,39} \right]^2 + \left[\frac{0,01}{7,39} \right]^2 + \left[\frac{0,01}{2,64} \right]^2$$

Resultando na incerteza $u_{nc}(V) = 0,61 \text{ m}^3$ relativa ao volume principal da câmara 2. A incerteza não correlacionada do volume adicional é dada por:

$$\left[\frac{u_{nc}(V_{ad})}{0,35.5,10.2,00} \right]^2 = \left[\frac{0,01}{0,35} \right]^2 + \left[\frac{0,01}{5,10} \right]^2 + \left[\frac{0,01}{2,00} \right]^2$$

Resultando em $u_{nc}(V_{ad}) = 0,10 \text{ m}^3$ de incerteza relativa apenas a medição do volume adicional junto as portas acústicas. Sendo que a incerteza do volume total, **não-correlacionada**, é estimada em $u_{nc}(V_{total_1}) = 0,71 \text{ m}^3$.

Os cálculos das incertezas das áreas de superfícies internas das câmaras reverberantes do LVA-UFSC são dados a seguir.

Incerteza da área de superfície (S) calculada para a câmara de 193 m^3 , **câmara 2**:

(a) Correlação direta perfeita (correlação máxima) é dada por:

$$\frac{u(S_{xy})}{S_{xy}} = \frac{u(x)}{x} + \frac{u(y)}{y} \quad (4.10)$$

$$\frac{u(S_{yz})}{S_{yz}} = \frac{u(y)}{y} + \frac{u(z)}{z} \quad (4.11)$$

$$\frac{u(S_{xz})}{S_{xz}} = \frac{u(x)}{x} + \frac{u(z)}{z} \quad (4.12)$$

$$u(S) = 2[u(S_{xy}) + u(S_{yz}) + u(S_{xz})] \quad (4.13)$$

Resultando na incerteza padrão de área de superfície de $u(S) = 0,71 \text{ m}^2$

Entretanto há uma área adicional devido à localização das portas acústicas. Esta área está relacionada com as dimensões ($x=0,35$; $y=5,10$; $z=2,00$). E a área adicional foi considerada apenas $S_{ad} = 2.(S_{xy} + S_{xz}) = 4,97 \text{ m}^2$, cuja incerteza associada $u(S_{ad})$ foi calculada em $0,15 \text{ m}^2$. Então considerando correlação máxima entre as medições de área, a incerteza padrão⁸³ será $u_{total}(S) = 0,71 + 0,15 = 0,86 \text{ m}^2$ para a câmara 2.

Incerteza da área de superfície (S) calculada⁸⁴ para a câmara de 145 m^3 , **câmara 1**, resultou em $u_{total}(S) = 0,70 + 0,14 = 0,84 \text{ m}^2$.

As estimativas de incertezas que consideram as medições dimensionais correlacionadas, obtidas nesta Subseção, foram usadas nos cálculos de incertezas envolvendo incertezas referentes aos volumes e/ou área de superfície das câmaras reverberantes do LVA-UFSC.

4.1.2 Métodos de cálculos usados para estimar as incertezas

As estimativas das incertezas de medição podem estar baseadas em incertezas “Tipo A” e “Tipo B”, que são incertezas estimadas a partir de observações de resultados experimentais e incertezas provenientes de outros meios, respectivamente. Estes tipos de incertezas são descritos e comentados nas Subseções 2.3.2, 2.3.3, 3.3.3 a 3.3.5, 4.2 e 4.3, dentre outras subseções, do ISO GUIA – Guia para a expressão da incerteza de medição (2003).

Para quantificar os erros aleatórios, que são causados por efeitos aleatórios, é necessário usar uma estatística para avaliar o grau de dispersão entre os valores obtidos. Neste trabalho a estatística mais usada foi o desvio padrão, ver Equação (4.14); também foi usado o desvio padrão experimental da média. Segundo a Subseção 4.2.2 do ISO GUIA (2003):

“As n observações individuais q_k diferem em valor por causa de variações aleatórias nas grandezas de influência, ou dos efeitos aleatórios. A variância experimental das observações, que estima a variação σ^2 da distribuição de probabilidade de q , é dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (4.14)$$

*Esta estimativa da variância e sua raiz quadrada positiva $s(q_k)$, denominada **desvio padrão experimental**, caracterizam a variabilidade dos valores q_k observados ou, mais especificamente, sua dispersão em torno de sua média \bar{q} .*”

⁸³ A incerteza padrão calculada considerando que não há correlação resultou em $u_{total}(S) = 0,31 \text{ m}^2$, câmara 2.

⁸⁴ A incerteza padrão calculada considerando que não há correlação resultou em $u_{total}(S) = 0,32 \text{ m}^2$, câmara 1.

O ISO GUIA (2003), na sua Subseção 4.2.3, considera que a melhor estimativa da variância $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$ é a variância experimental da média $s^2(\bar{q})$ a qual é dada na Equação 4.15:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (4.15)$$

Para quantificar as dispersões entre os níveis de pressão sonora L_p medidos através de posições aleatórias de microfone(s) dentro de câmaras reverberante, por banda de terço de oitava, foram calculados os *desvios padrão experimentais*⁸⁵ dos valores de L_p de cada posição de microfone, sendo cada um destes valores a média energética no tempo⁸⁶. Portanto, pode-se dizer que os desvios padrão calculados são “desvios padrão experimentais no espaço”, porque se referem aos valores medidos em diversas posições aleatórias de microfone(s). Este fato está relacionado com a questão de definição do mensurando, pois cada posição de microfone adotada aleatoriamente dentro da câmara reverberante pode ter características distintas das outras posições. Na verdade, a posição da fonte sonora tem influência fundamental nas características do campo sonoro dentro da câmara reverberante.

Foram usados os desvios padrão dos níveis de pressão sonora calculados diretamente dos valores em decibéis (dB). Não foi calculado desvio padrão de valores proporcionais à energia sonora de cada valor obtido experimentalmente.

No caso das medições dos tempos de reverberação, T_{rev} , o cálculos dos desvios padrão poderão ter diferenças em função do procedimento das medições adotado. Pode ocorrer uma situação na qual não é possível calcular o desvio padrão de todos os decaimentos realizados através do método de interrupção do ruído. Se o procedimento de obtenção da média do tempo de reverberação em cada posição de microfone foi através de “curva média obtida através de várias curvas de decaimento”⁸⁷ então não é possível calcular o desvio padrão em função de cada decaimento medido. Mas se cada decaimento tem o valor de tempo de reverberação avaliado individualmente, então se pode calcular o desvio padrão relativo a todos os decaimentos. Estas duas situações, dois procedimentos, são aceitáveis para medir os tempos de reverberação T_{rev} e levam a resultados concordantes, porém os desvios padrão serão distintos em função do

⁸⁵ E a partir dos resultados obtidos no LAENA-INMETRO também foram calculados os *desvios padrão experimentais da média*.

⁸⁶ Nível equivalente de pressão sonora no tempo. As medições de L_p foram feitas em períodos de trinta segundos no mínimo.

⁸⁷ A avaliação do decaimento de uma “curva média”, em uma faixa de decaimento, por exemplo T_{15} , resulta em apenas um valor numérico; apenas uma amostra. Apesar de o procedimento poder contar com diversas curvas de decaimentos, as quais originaram a denominada “curva média”.

procedimento adotado. Isto porque o número, e valores, de amostras não é o mesmo em função destes procedimentos.

As **incertezas padrão das grandezas de entrada** u_i , tanto as resultantes de observações (estatísticas) dos ensaios realizados (Tipo A) quanto as obtidas a partir de outras fontes de informações (Tipo B)⁸⁸, foram calculadas a partir das estimativas de incertezas X_i , coeficientes de sensibilidade c_i , e divisores d_i . Sendo que os valores de X_i foram baseados em desvios padrão experimentais, ou em desvios experimentais da média, nos cálculos relativos aos tempos de reverberação e níveis de pressão sonora. A relação entre estes parâmetros é dada pela Equação 4.16:

$$u_i = X_i \cdot c_i / d_i \quad (4.16)$$

onde os coeficientes de sensibilidade c_i são equivalentes às derivadas parciais do nível de potência sonora⁸⁹ pela grandeza de entrada x_i , de acordo com a Equação 4.17:

$$c_i = \frac{\partial L_W}{\partial x_i} \quad (4.17)$$

As estimativas X_i são “estimativas brutas” das incertezas das grandezas de entrada relativas ao cálculo de nível de potência sonora L_W . Uma das funções dos coeficientes de sensibilidade c_i é de compatibilizar a unidade da incerteza calculada, de forma que u_i tenha a mesma unidade que L_W , que é a grandeza de saída. Desta forma, os cálculos das incertezas padrão u_i produziram valores em decibéis (dB). O valor de cada divisor d_i é dado em função da **distribuição de probabilidade** atribuída a respectiva grandeza de entrada.

Os procedimentos dos cálculos segundo o “Guia para a expressão de incerteza de medição”, ISO GUM ou ISO GUIA, inicialmente visam efetuar a combinação de incertezas padrão. Sendo necessário aplicar as Equações 4.18 e 4.17.

$$u_c^2(L_W) = \sum_i c_i^2 \cdot (X_i/d_i)^2 = \sum_i (c_i \cdot (X_i/d_i))^2 \quad (4.18)$$

onde c_i são os coeficientes de sensibilidade obtidos através da Equação 4.17, $u_c^2(L_W)$ é a incerteza combinada ao quadrado das diversas grandezas de entrada, esta incerteza é dada em dB e é relativa ao nível de potência sonora L_W .

⁸⁸ Este tipo de combinação de diferentes tipos de incertezas é denominado “abordagem mista de cálculo de incertezas”.

⁸⁹ Grandeza de saída. Representada pela Equação 4.4 da Subseção 4.1.1; equação fornecida na norma ISO 3741 de 1999.

A Equação 4.18 foi deduzida conforme representado na Equação 4.19. Esta última é denominada de “soma quadrática” das estimativas de incertezas.

$$u_c = u_c(L_W) = \sqrt{u_{L_p}^2 + u_{T_{rev}}^2 + u_V^2 + u_S^2 + u_t^2 + u_B^2 + u_f^2} \quad \text{em dB} \quad (4.19)$$

onde u_{L_p} , $u_{T_{rev}}$, u_V , u_S , u_t , u_B e u_f são as estimativas de incertezas padrão relativas aos: níveis de pressão sonora L_p , tempo de reverberação T_{rev} , volume (m^3) da câmara, superfície interna da câmara reverberante (m^2), temperatura ambiente, pressão barométrica (ou atmosférica), e frequência central da banda de terço de oitava, respectivamente. Todas estas estimativas estão em dB.

Após calcular a incerteza padrão combinada u_c dada pela Equação 4.19, é possível calcular as incertezas expandidas $U_{95\%}$, aqui denominadas $U_c(L_W)$ ou $U(L_W)$, para cada banda de terço de oitava. Sendo necessário usar o fator de abrangência k para multiplicar a incerteza padrão em cada banda de terço de oitava, ver Equação 4.20. Neste trabalho foi aplicado fator de abrangência $k = 2,0$, independentemente dos números de graus de liberdade ν .

$$U_c(L_W) = k \cdot u_c(L_W) \quad (4.20)$$

Os desvios padrão experimentais obtidos através das medições de L_p e de T_{rev} foram usados para calcular as estimativas das incertezas padrão u_{L_p} e $u_{T_{rev}}$, respectivamente. As incertezas padrão do volume e superfície das câmaras foram estimadas a partir de medições com trena das dimensões de cada câmara reverberante.

4.1.3 Resultados experimentais e incertezas de medição obtidos com a fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m³ do LVA-UFSC

Foram desenvolvidas quatro baterias de ensaios de determinação de níveis de potência sonora aerodinâmica *Type 4204* fabricada por Brüel & Kjær, também denominada BK 4204, na câmara 2 (câmara reverberante de 193 m³) do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da UFSC. Os ensaios de medições dos tempos de reverberação (T_{rev}) da câmara e medições dos níveis de pressão sonora (L_p) produzidos pela fonte BK 4204 dentro desta câmara foram executados nos meses de fevereiro, julho, agosto e novembro de 2005.

4.1.3.1 Primeira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, câmara 2 (193 m³)

Esta primeira bateria de ensaios⁹⁰ é relatada com maior detalhamento dos cálculos e valores intermediários que foram necessários para desenvolver os cálculos de incertezas. Esta bateria de ensaios experimentais foi realizada em fevereiro de 2005. São apresentados os componentes dos cálculos de níveis de potência sonora por banda de terço de oitavas; valores mostrados em tabela. Também são apresentados os valores de estimativas de todas as fontes de incertezas em detalhes de como foram calculadas. Na parte final desta subseção estão os gráficos que ilustram o “comportamento das incertezas” em forma de gráficos de barras, por bandas de terço de oitavas e valor global. De fato, estes gráficos visam mostrar quais são as contribuições mais significativas entre as diversas fontes de incertezas pertinentes.

4.1.3.1.1 A determinação de níveis de potência sonora na primeira bateria de ensaios

Os parâmetros necessários para calcular os níveis de potência sonora são: os níveis de pressão sonora \bar{L}_p (média no tempo e no espaço; ver Equação 4.1 na Subseção 4.1.1), os tempos de reverberação (para calcular as áreas de absorção sonora equivalentes “A”), volume e superfície da câmara reverberante, temperatura ambiente, velocidade do som, frequência central de cada banda de terço de oitava, e pressão atmosférica. Na Tabela 4.3 foi adotada uma nomenclatura que descreve cada termo do cálculo⁹¹ de níveis de potência sonora a qual é definida pela Equação 4.4, da Subseção 4.1.1, que é reapresentada a seguir:

$$L_w = \bar{L}_p + \left\{ 10 \log \frac{A}{A_0} + 4,34 \frac{A}{S} + 10 \log \left(1 + \frac{S \cdot c}{8 \cdot V \cdot f} \right) - 25 \log \left[\frac{427}{400} \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}} \cdot \frac{B}{B_0} \right] - 6 \right\} \text{ dB} \quad (4.4)$$

onde a área de absorção sonora equivalente, em m², é dada pela Equação 4.5; para mais detalhes ver Subseção 4.1.1.

$$A = \frac{55,26}{c} \left(\frac{V}{T_{rev}} \right) \quad (4.5)$$

Para a demonstração dos detalhes dos cálculos dos níveis de potência sonora, a Equação 4.4 foi reformulada através das parcelas que compõem a Equação 4.21:

$$L_w = \bar{L}_p + TFS + FAA + FW + FCTP - 6 \quad (4.21)$$

⁹⁰ Efetuada em fevereiro de 2005.

⁹¹ Equação dada na norma ISO 3741 de 1999.

onde: TFS foi denominado “Termo da formulação de Sabine” que é dado por:

$$TFS = 10 \cdot \log\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad (4.22)$$

Com A_0 sendo igual a 1 m^2 .

FAA é atribuído ao “Fator de correção devido à absorção sonora do ar”, e é dado por:

$$FAA = 4,34 \frac{A}{S} \quad (4.23)$$

FW é atribuído ao “Fator de correção de Waterhouse”:

$$FW = 10 \log\left(1 + \frac{S \cdot c}{8 \cdot V \cdot f}\right) \quad (4.24)$$

Fator de correção relacionado com temperatura ambiente e pressão atmosférica:

$$FCTP = -25 \cdot \log\left[\frac{427}{400} \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}} \cdot \frac{B}{B_0}\right] \quad (4.25)$$

Portanto as Equações 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 são algumas das parcelas que formam a Equação 4.4, ou 4.21, compondo um conjunto de parâmetros necessários para calcular os níveis de potência sonora de acordo com a norma ISO 3741 de 1999.

Os tempos de reverberação medidos por bandas de terço de oitava, T_{rev} , que foram usados nos cálculos de L_W são apresentados na Tabela 4.5. Neste caso os tempos de reverberação foram medidos na faixa de variação de nível de pressão sonora estabelecida em 20 dB, e por isto são denominados T_{20} .

Na Tabela 4.3 há linhas cujos valores foram realçados, as que correspondem às bandas de frequências de 1 a 2 kHz. Pode-se notar que nestas linhas estão os níveis de potência sonora mais elevados obtidos dentre as bandas de terço de oitavas.

Tabela 4.3 - Parâmetros detalhando o cálculo de determinação dos níveis de potência sonora L_W . Câmara reverberante de 193 m³ (câmara 2) do LVA-UFSC, 1ª bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, fevereiro 2005.

Frequência central (Hz)	A (m ²) Sabine	Média energética de L_p (dB)	TFS (dB)	FAA (dB)	FW (dB)	FCTP (dB)	L_W (dB)	L_{WA} dB(A)
100	3,028	76,10	4,81	0,06	1,67	-0,187	76,46	57,36
125	3,142	76,95	4,97	0,07	1,38	-0,187	77,18	61,08
160	4,529	76,52	6,56	0,09	1,11	-0,187	78,10	64,70
200	4,300	77,93	6,33	0,09	0,91	-0,187	79,08	68,18
250	4,519	78,86	6,55	0,09	0,75	-0,187	80,06	71,46
315	5,274	78,80	7,22	0,11	0,60	-0,187	80,54	73,94
400	4,248	79,29	6,28	0,09	0,48	-0,187	79,95	75,15
500	3,831	79,77	5,83	0,08	0,39	-0,187	79,89	76,69
630	3,926	80,53	5,94	0,08	0,31	-0,187	80,68	78,78
800	4,168	83,18	6,20	0,09	0,25	-0,187	83,53	82,73
1000	4,391	84,37	6,43	0,09	0,20	-0,187	84,90	84,90
1250	4,478	84,97	6,51	0,09	0,16	-0,187	85,55	86,15
1600	4,802	84,32	6,81	0,10	0,13	-0,187	85,17	86,17
2000	5,035	83,28	7,02	0,10	0,10	-0,187	84,32	85,52
2500	5,901	81,04	7,71	0,12	0,08	-0,187	82,76	84,06
3150	6,685	78,93	8,25	0,14	0,06	-0,187	81,20	82,40
4000	7,833	78,27	8,94	0,16	0,05	-0,187	81,24	82,24
5000	9,946	76,37	9,98	0,21	0,04	-0,187	80,40	80,90
6300	12,159	73,51	10,85	0,25	0,03	-0,187	78,45	78,35
8000	15,421	69,91	11,88	0,32	0,03	-0,187	75,96	74,86
10000	21,701	65,88	13,36	0,45	0,02	-0,187	73,53	71,03
Global							94,71	94,34

Volume da câmara: $V = 192,67 \text{ m}^3$, superfície: $S = 208,11 \text{ m}^2$, temperatura: $\theta = 25,8 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão atmosférica: $B = 1,010 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.
Foram usados os tempos de reverberação T_{20} para obter estes níveis de potência sonora.
Medições de L_p com três posições de fonte sonora e seis posições de microfone. Total de 18 amostras.

Com relação a alguns dos parâmetros na Tabela 4.3, a média energética de L_p em dB é dada por $\overline{L_p}$ da Equação 4.1, Subseção 4.1.1; L_W em dB corresponde aos níveis de potência sonora por banda de terço de oitava e global sem ponderação; L_{WA} em dB(A) são os níveis de potência sonora ponderados⁹² pelos valores da “curva A”, apresentados na penúltima coluna da tabela.

4.1.3.1.2 Detalhamento das estimativas das fontes de incertezas

Algumas das fontes de incertezas importantes para esta investigação experimental com a fonte sonora BK 4204 foram: a incerteza da cadeia de medição, estimada através de u_{ccm} ; os desvios padrão de tempos de reverberação S_{Trev} , da câmara de 193 m³ nominal; e os desvios

⁹² A norma ISO 3741:1999 **não** requer que os valores sejam expressos em dB(A) por banda de terço de oitava. Os valores apresentados na última coluna da Tabela 4.3 apenas demonstram os efeitos da ponderação “curva A”.

padrão dos níveis de pressão sonora S_{Lp} , medidos na câmara reverberante com a fonte sonora⁹³ BK 4204.

O parâmetro denominado u_{ccm} é a incerteza padrão combinada estimada para a cadeia de medição acústica⁹⁴, a qual contabiliza as incertezas inerentes ao: calibrador de nível sonoro⁹⁵, à resposta em frequência do microfone de medição, pré-amplificador e analisador de sinais. Mas não considera a estimativa da deriva do calibrador de nível sonoro, a qual será computada no cálculo de incerteza do valor global, de forma sistemática. Os desvios padrão dos níveis de pressão sonora, medidos na câmara reverberante de 193 m³ com fonte sonora BK 4204, e valores de u_{ccm} são dados na Tabela 4.4. Estes valores são usados para calcular a incerteza padrão combinada dos níveis de pressão sonora medidos u_{Lp} , em dB, cujos valores são dados na Tabela 4.4. Os cálculos foram feitos com base na Equação 4.26, porém para estimar u_{Lp} , primeiro foi necessário calcular o parâmetro denominado $X_{Lp_aleatório}$ através da combinação entre as incertezas inerentes à cadeia de medição (u_{ccm}) e os **desvios padrão experimentais dos níveis de pressão sonora S_{Lp}** . Esta combinação resulta na estimativa de incerteza das medições dos níveis de pressão sonora (considerada de caráter aleatório) $X_{Lp_aleatório}$, que é dada pela Equação 4.27.

$$u_{Lp} = X_{Lp_aleatório} \cdot c_1 / d_{Lp} \quad (4.26)$$

onde:

$$X_{Lp_aleatório} = \sqrt{(u_{ccm})^2 + (S_{Lp})^2} \quad (4.27)$$

O coeficiente de sensibilidade c_1 é computado de acordo com a Equação 4.28, em cada banda de terço de oitava. O divisor d_{Lp} assume valor 1,0 devido à distribuição de probabilidade, que foi arbitrada como sendo distribuição normal.

$$c_1 = \frac{\partial L_w}{\partial L_p} = 1,0 \quad (4.28)$$

Os valores de u_{Lp} realçados nas linhas correspondentes às frequências de 1 a 2 kHz, na Tabela 4.4, se apresentam muito próximos, ou seja, da mesma ordem de grandeza, entre 0,19 e 0,22 dB. Estes valores são as incertezas de maior influência para o valor de incerteza do nível de potência sonora global, ver Tabelas 4.9 e 4.10. Além das linhas realçadas,

⁹³ Energizada em 220 volts da rede elétrica local.

⁹⁴ O parâmetro u_{ccm} representa a incerteza (*uncertainty*) combinada da cadeia de medição.

⁹⁵ Exceto a contribuição de incerteza referente à deriva do calibrador sonoro. Na intenção de computar inicialmente só as fontes de incertezas de caráter aleatório, e acrescentar os desvios relativos aos efeitos sistemáticos na etapa final do balanço de incertezas.

pode-se notar que em altas frequências os valores das incertezas padrão u_{L_p} resultaram ligeiramente mais elevados, e em baixas frequências os valores das incertezas foram elevados; devido aos altos desvios padrão experimentais nas medições de L_p .

Tabela 4.4 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , 1ª bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m³ (câmara 2) do LVA-UFSC, fevereiro 2005.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)	u_{ccm} (dB)	$X_{L_p, \text{aleatório}}$ (dB)	c_1	d_{L_p}	$u_{L_p}(L_w)$ [dB]
100	1,62	0,172	1,63	1,0	1,0	1,63
125	1,45	0,172	1,46	1,0	1,0	1,46
160	0,78	0,172	0,80	1,0	1,0	0,80
200	0,76	0,172	0,78	1,0	1,0	0,78
250	0,61	0,172	0,64	1,0	1,0	0,64
315	0,41	0,172	0,45	1,0	1,0	0,45
400	0,25	0,172	0,30	1,0	1,0	0,30
500	0,18	0,172	0,25	1,0	1,0	0,25
630	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23
800	0,13	0,172	0,22	1,0	1,0	0,22
1000	0,13	0,172	0,22	1,0	1,0	0,22
1250	0,12	0,172	0,21	1,0	1,0	0,21
1600	0,09	0,172	0,19	1,0	1,0	0,19
2000	0,10	0,172	0,20	1,0	1,0	0,20
2500	0,09	0,172	0,20	1,0	1,0	0,20
3150	0,09	0,172	0,19	1,0	1,0	0,19
4000	0,18	0,172	0,25	1,0	1,0	0,25
5000	0,13	0,172	0,22	1,0	1,0	0,22
6300	0,13	0,215	0,25	1,0	1,0	0,25
8000	0,14	0,215	0,26	1,0	1,0	0,26
10000	0,21	0,215	0,30	1,0	1,0	0,30

A estimativa da incerteza “Tipo A”, experimental, dos tempos de reverberação (em segundos) X_{Trev} , da câmara de 193 m³ (nominal) foi encontrada a partir dos desvios padrão das medições de tempos de reverberação. Para encontrar os valores que foram atribuídos à incerteza padrão u_{Trev} , foi utilizada a Equação 4.29, na qual foi aplicada a multiplicação pelo coeficiente de sensibilidade c_2 , e divisão pelo divisor⁹⁶ d_{Trev} . Um dos papéis de c_2 é a compatibilização de unidades, proporcionando estimativas de incerteza em decibel, dB. Este coeficiente é dado pela derivada parcial de L_w em relação à T_{rev} em cada banda de terço de oitava, ver Equação 4.30. Portanto, o coeficiente c_2 representa uma espécie de “taxa da influência” relativa à variação do tempo de reverberação sobre o valor do nível de potência sonora na respectiva banda de frequência.

$$u_{Trev} = X_{Trev} \cdot c_2 / d_{Trev} \quad (4.29)$$

⁹⁶ Atribuindo-se uma distribuição de probabilidade normal aos tempos de reverberação medidos, por isto: $d_{Trev} = 1,0$.

onde:

$$c_2 = \frac{\partial L_W}{\partial T_{rev}} = \frac{-4,34}{T_{rev}} - \frac{11,96V}{T_{rev}^2 S \sqrt{273 + \theta}} \quad em \text{ dB} / s \quad (4.30)$$

onde θ é a temperatura em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), ($V = 192,67 \text{ m}^3$) é o volume da câmara reverberante, ($S = 208,06 \text{ m}^2$) é a área de superfície interna da câmara reverberante, e T_{rev} são os tempos de reverberação da câmara relativos a cada banda de frequência de terço de oitava. Portanto, o coeficiente de sensibilidade c_2 varia em função da frequência central de cada banda. Ver Tabela 4.5.

Ao se observar a Tabela 4.5, na terceira coluna, nota-se que houve variações relativamente grandes dos desvios padrão dos tempos de reverberação, representados através do parâmetro X_{Trev} . Os valores de X_{Trev} variaram de 0,01 a 0,59 segundo, sendo que tais variações se originaram das curvas experimentais de decaimentos ensaiados na câmara reverberante através do método da interrupção do ruído. Estas variações se refletem na avaliação “Tipo A” dos tempos de reverberação dadas por u_{Trev} , última coluna da Tabela 4.5; valores que estão entre 0,01 e 0,36 dB. O parâmetro representado por u_{Trev} ou $u_{Trev}(L_W)$ se refere à “influência das incertezas padrão dos tempos de reverberação sobre os níveis de potência sonora L_W ”, por bandas de terço de oitava; então este parâmetro é dado em decibel, e não em segundo. Isto se deve ao fato da aplicação do coeficiente de sensibilidade c_2 , cuja unidade é dB/s. De qualquer maneira, as estimativas de u_{Trev} que tendem a influenciar de forma predominante a incerteza do nível global de potência sonora estão na faixa de 0,01 a 0,13 dB, e correspondem as bandas de terço de oitava de 1 a 2 kHz.

Comparando-se os valores de incertezas padrão u_{Lp} e u_{Trev} na banda de 1000 Hz, 0,22 dB e 0,13 dB respectivamente, pode-se considerar que são valores da mesma ordem de grandeza no contexto da avaliação experimental de incertezas. Porém ao se fazer a mesma comparação na banda de 2000 Hz, os valores 0,20 e 0,01 dB mostram que as contribuições de incertezas relativas aos tempos de reverberação podem, em algumas bandas de frequências, ser significativamente menores que as contribuições de incertezas provenientes das medições de níveis de pressão sonora.

Tabela 4.5 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m³ do LVA-UFSC (1ª bateria de ensaios) fevereiro de 2005. As estimativas de incertezas $X_{T_{rev}}$ foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor $d_{T_{rev}}$ e incertezas padrão combinadas $u_{T_{rev}}(L_W)$.

Frequência central (Hz)	T_{rev} (s) *	$X_{T_{rev}}$ (s)	c_2 (dB/s)	$d_{T_{rev}}$	$u_{T_{rev}}(L_W)$ [dB]
100	10,14	0,29	-0,43	1,0	0,13
125	9,78	0,40	-0,45	1,0	0,18
160	6,78	0,12	-0,65	1,0	0,08
200	7,14	0,59	-0,62	1,0	0,36
250	6,80	0,06	-0,65	1,0	0,04
315	5,82	0,01	-0,76	1,0	0,01
400	7,23	0,13	-0,61	1,0	0,08
500	8,02	0,12	-0,55	1,0	0,07
630	7,83	0,28	-0,57	1,0	0,16
800	7,37	0,29	-0,60	1,0	0,18
1000	7,00	0,21	-0,63	1,0	0,13
1250	6,86	0,10	-0,65	1,0	0,07
1600	6,40	0,06	-0,69	1,0	0,04
2000	6,10	0,01	-0,73	1,0	0,01
2500	5,21	0,13	-0,86	1,0	0,11
3150	4,60	0,08	-0,98	1,0	0,08
4000	3,92	0,05	-1,15	1,0	0,06
5000	3,09	0,09	-1,47	1,0	0,14
6300	2,53	0,04	-1,82	1,0	0,08
8000	1,99	0,03	-2,34	1,0	0,07
10000	1,42	0,01	-3,39	1,0	0,03

* T_{rev} são os tempos de reverberação T_{20}

Medições de T_{rev} com uma posição de fonte sonora e quatro posições de microfones; sendo cinco decaimentos em cada posição de microfones. Total de 20 decaimentos.

Os valores das estimativas de incertezas calculadas em função dos parâmetros volume e superfície da câmara reverberante são dados na Tabela 4.6. A estimativa de incerteza de medição do volume da câmara é dada através de um valor constante; 1,14 m³, apesar disto a incerteza calculada $u_V(L_W)$, em dB, tem valores diferentes em função da banda de frequência. Como se pode ver na equação que representa o coeficiente de sensibilidade de volume, Equação 4.31, existem parâmetros que variam com a frequência central da banda de terço de oitava; a própria frequência (f) e os tempos de reverberação (T_{rev}), ver Equação 4.31. Portanto, as estimativas de incertezas devido ao volume, $u_V(L_W)$ variam em função dos tempos de reverberação e da banda de frequência. A relação matemática desta estimativa é dada através da Equação 4.32.

$$c_3 = \frac{\partial L_W}{\partial V} = \frac{4,34}{V} + \frac{11,96}{T_{rev} S \sqrt{273 + \theta}} - \frac{10,88 \cdot S \sqrt{273 + \theta}}{(Vf + 2,51 \cdot S \cdot \sqrt{273 + \theta}) \cdot V} \quad \text{em dB/m}^3 \quad (4.31)$$

$$u_V = u_V(L_W) = X_V \cdot c_3 / d_V \quad \text{em dB} \quad (4.32)$$

Da mesma forma que a incerteza do volume, X_V , a estimativa de incerteza de medição da superfície interna da câmara reverberante é dada por um valor constante; $X_S = 0,86 \text{ m}^2$. Apesar disto, a incerteza $u_S(L_W)$ varia em função da banda de frequência para a qual é calculada; ver resultados na Tabela 4.6. Estes cálculos foram desenvolvidos através das Equações 4.33 e 4.34.

$$u_S = u_S(L_W) = X_S \cdot c_4 / d_S \quad \text{em dB} \quad (4.33)$$

$$c_4 = \frac{\partial L_W}{\partial S} = \frac{-11,96V}{S^2 T_{rev} \sqrt{273 + \theta}} + \frac{10,88 \sqrt{273 + \theta}}{Vf + 2,51 \cdot S \sqrt{273 + \theta}} \quad \text{em dB/m}^2 \quad (4.34)$$

onde: u_S ou $u_S(L_W)$, em dB, é a “contribuição de incerteza relativa a área de superfície interna da câmara reverberante”; c_4 é o coeficiente de sensibilidade relativo a esta área de superfície; S é a área de superfície; V é o volume da câmara; θ é a temperatura em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$); d_S é o divisor que varia em função do tipo de distribuição de probabilidade atribuída à medição de superfície.

Tabela 4.6 - Estimativas de incertezas padrão relativas ao volume da câmara reverberante, u_V . E estimativas de incertezas padrão, u_S , relativas à área da superfície interna da câmara reverberante de 193 m^3 do LVA-UFSC.

Frequência central (Hz)	X_V (m^3)	c_3 (dB/ m^3)	d_V	$u_V(L_W)$ [dB]	X_S (m^2)	c_4 (dB/ m^2)	d_S	$u_S(L_W)$ [dB]
100	1,14	0,0157	1,0	0,018	0,86	0,0063	1,0	0,0055
125	1,14	0,0167	1,0	0,019	0,86	0,0054	1,0	0,0046
160	1,14	0,0179	1,0	0,020	0,86	0,0043	1,0	0,0037
200	1,14	0,0187	1,0	0,021	0,86	0,0035	1,0	0,0030
250	1,14	0,0195	1,0	0,022	0,86	0,0028	1,0	0,0024
315	1,14	0,0202	1,0	0,023	0,86	0,0022	1,0	0,0019
400	1,14	0,0206	1,0	0,024	0,86	0,0018	1,0	0,0015
500	1,14	0,0210	1,0	0,024	0,86	0,0014	1,0	0,0012
630	1,14	0,0214	1,0	0,024	0,86	0,0010	1,0	0,0009
800	1,14	0,0217	1,0	0,025	0,86	0,0007	1,0	0,0006
1000	1,14	0,0220	1,0	0,025	0,86	0,0005	1,0	0,0004
1250	1,14	0,0222	1,0	0,025	0,86	0,0003	1,0	0,0003
1600	1,14	0,0224	1,0	0,026	0,86	0,0001	1,0	0,0001
2000	1,14	0,0226	1,0	0,026	0,86	0,0000	1,0	0,0000
2500	1,14	0,0228	1,0	0,026	0,86	-0,0002	1,0	0,0002
3150	1,14	0,0229	1,0	0,026	0,86	-0,0004	1,0	0,0003
4000	1,14	0,0231	1,0	0,026	0,86	-0,0005	1,0	0,0005
5000	1,14	0,0234	1,0	0,027	0,86	-0,0008	1,0	0,0007
6300	1,14	0,0237	1,0	0,027	0,86	-0,0011	1,0	0,0009
8000	1,14	0,0241	1,0	0,027	0,86	-0,0014	1,0	0,0012
10000	1,14	0,0248	1,0	0,028	0,86	-0,0021	1,0	0,0018

Pode-se notar que os valores das contribuições de incertezas u_V e u_S , também denominadas $u_V(L_W)$ e $u_S(L_W)$ calculadas em decibéis (dB), têm valores relativamente muito pequenos se comparados com as incertezas estimadas para as grandezas L_p e T_{rev} , níveis de pressão sonora e tempos de reverberação, respectivamente. Há um fato singular com relação à

influência da incerteza de medição da superfície da câmara sobre o nível de potência sonora. O coeficiente de sensibilidade c_4 torna-se negativo a partir da frequência de 2500 Hz, e atinge um valor praticamente nulo na banda de 2000 Hz. E da mesma forma que ocorre no coeficiente c_3 , os parâmetros T_{rev} e f são variáveis em função da banda de terço de oitava, sendo os parâmetros que fazem com que c_4 varie. Porém faz com que c_4 apresente valores positivos e negativos, o que não corre com o coeficiente c_3 , apesar de que este último tem valores mais elevados e assim contribuem mais significativamente para as incertezas de medição de L_W .

Além das grandezas (parâmetros) citadas anteriormente, há outras grandezas de entrada que estão detalhadas a seguir. A temperatura ambiente, a frequência central de cada banda de terço de oitava, e a pressão barométrica são grandezas que podem influenciar o resultado do cálculo de níveis de potência sonora. As investigações e cálculos de estimativas de incertezas destas grandezas são apresentados a seguir.

Os valores de estimativas de incertezas calculados para a temperatura ambiente (θ) e para a frequência central de cada banda de terço de oitava (f) são apresentados na Tabela 4.7. Para estimar a variação de temperatura dentro da câmara reverberante foram usados dados das medições obtidos com termômetro digital, e concluiu-se que as variações⁹⁷ ficaram na faixa de ± 2 °C aproximadamente. Sendo que este último foi atribuído à estimativa de incerteza X_t . Os cálculos necessários para encontrar as incertezas u_t , também denominadas $u_t(L_W)$, em dB, foram efetuados segundo as Equações 4.35 e 4.36. Pode-se notar na terceira coluna da Tabela 4.7, que há uma ligeira diminuição nos valores de c_5 com o aumento da frequência da banda de terço de oitava. Estas variações estão relacionadas com os parâmetros f e T_{rev} presentes na Equação 4.36, sendo que neste caso os outros parâmetros são constantes em relação à frequência central da banda de terço de oitava (f).

$$u_t = u_t(L_W) = X_t \cdot c_5 / d_t \quad \text{em dB} \quad (4.35)$$

$$c_5 = \frac{\partial L_W}{\partial \theta}$$

$$c_5 = \frac{-2,17}{273 + \theta} - \frac{5,98V}{T_{rev} S (273 + \theta)^{3/2}} + \frac{5,44 \cdot S}{(Vf + 2,51\sqrt{273 + \theta} \cdot S) \cdot \sqrt{273 + \theta}} + \frac{5,43}{273 + \theta} \quad \text{em dB/}^\circ\text{C} \quad (4.36)$$

As incertezas das medições de frequências das bandas de terço de oitavas foram realmente superestimadas. Foram atribuídos valores de incerteza da ordem da própria banda de frequência, sendo em torno de 10 % a 11 % do valor da frequência central de cada banda de

⁹⁷ O erro, ou incerteza, do termômetro digital indicado no catálogo do fabricante é de $\pm 1,0$ °C.

terço de oitava. Isto corresponde à diferença (aritmética) de duas frequências⁹⁸ dividida por 2,0. Estes valores foram calculados através da Equação 4.37, onde f_n é a frequência da banda e f_{n-1} é a frequência da banda imediatamente inferior.

$$X_f = (f_n - f_{n-1})/2 \quad \text{em Hz} \quad (4.37)$$

Tabela 4.7 - Estimativas de Incertezas padrão relacionadas às variações de temperatura ambiente, estimadas em $\pm 2^\circ \text{C}$, câmara reverberante de 193 m^3 do LVA-UFSC. E incertezas padrão estimadas (superestimadas) para as frequências centrais das bandas de terço de oitavas.

Frequência central (Hz)	X_t ($^\circ\text{C}$)	c_5 (dB/ $^\circ\text{C}$)	d_t	$u_t(L_w)$ [dB]	X_f (Hz)	c_7 (dB/Hz)	d_f	$u_f(L_w)$ [dB]
100	2,0	0,0131	$\sqrt{3}$	0,015	10,0	-0,01384	$\sqrt{3}$	0,080
125	2,0	0,0128	$\sqrt{3}$	0,015	12,5	-0,00946	$\sqrt{3}$	0,068
160	2,0	0,0124	$\sqrt{3}$	0,014	17,5	-0,00614	$\sqrt{3}$	0,062
200	2,0	0,0121	$\sqrt{3}$	0,014	20,0	-0,00412	$\sqrt{3}$	0,048
250	2,0	0,0119	$\sqrt{3}$	0,014	25	-0,00274	$\sqrt{3}$	0,040
315	2,0	0,0117	$\sqrt{3}$	0,013	33	-0,00178	$\sqrt{3}$	0,033
400	2,0	0,0115	$\sqrt{3}$	0,013	43	-0,00114	$\sqrt{3}$	0,028
500	2,0	0,0114	$\sqrt{3}$	0,013	50	-0,00074	$\sqrt{3}$	0,021
630	2,0	0,0113	$\sqrt{3}$	0,013	65	-0,00048	$\sqrt{3}$	0,018
800	2,0	0,0112	$\sqrt{3}$	0,013	85	-0,00030	$\sqrt{3}$	0,015
1000	2,0	0,0111	$\sqrt{3}$	0,013	100	-0,00019	$\sqrt{3}$	0,011
1250	2,0	0,0110	$\sqrt{3}$	0,013	125	-0,00013	$\sqrt{3}$	0,009
1600	2,0	0,0109	$\sqrt{3}$	0,013	175	-0,00008	$\sqrt{3}$	0,008
2000	2,0	0,0109	$\sqrt{3}$	0,013	200	-0,00005	$\sqrt{3}$	0,006
2500	2,0	0,0108	$\sqrt{3}$	0,013	250	-0,00003	$\sqrt{3}$	0,005
3150	2,0	0,0108	$\sqrt{3}$	0,012	325	-0,00002	$\sqrt{3}$	0,004
4000	2,0	0,0107	$\sqrt{3}$	0,012	425	-0,00001	$\sqrt{3}$	0,003
5000	2,0	0,0106	$\sqrt{3}$	0,012	500	-0,00001	$\sqrt{3}$	0,002
6300	2,0	0,0105	$\sqrt{3}$	0,012	650	-0,00001	$\sqrt{3}$	0,002
8000	2,0	0,0104	$\sqrt{3}$	0,012	850	0,00000	$\sqrt{3}$	0,002
10000	2,0	0,0102	$\sqrt{3}$	0,012	1000	0,00000	$\sqrt{3}$	0,001

Os valores de X_f , dos coeficientes de sensibilidade c_7 , das incertezas padrão relativas as frequências u_f , ou também chamadas $u_f(L_w)$ em dB, são dados na Tabela 4.7. Pode-se notar que os maiores valores alcançados por u_f encontram-se nas baixas frequências, e que nas bandas onde ocorreram níveis de potência sonora mais elevados, entre 1250 e 2500 Hz, as incertezas padrão u_f foram inferiores a 0,010 dB. De fato, os valores superestimados de X_f tiveram como objetivo investigar as influências máximas que podem ser provenientes dos erros de medição das frequências das bandas de terço de oitava; com uma consideração extrema de

⁹⁸ Ao subtrair o valor correspondente a uma banda de terço de oitava pelo valor da banda imediatamente inferior. No caso da banda de 100 Hz foi tomado o valor de 10 % de 100 Hz que equivale a 10 Hz.

que o erro corresponderia a metade da banda de frequência investigada. As Equações 4.38 e 4.39 foram usadas para calcular u_f e c_7 apresentados na Tabela 4.7.

$$u_f = u_f(L_W) = X_f \cdot c_7 / d_f \quad (4.38)$$

$$c_7 = \frac{\partial L_W}{\partial f} = \frac{-10,88 \cdot S \sqrt{273 + \theta}}{V f^2 + 2,51 \cdot S \sqrt{273 + \theta} \cdot f} \text{ em dB/Hz} \quad (4.39)$$

Com relação à pressão atmosférica (B), o valor estimado foi de $B = 1,010 \cdot 10^5$ Pa; para o dia da medição, e as variações estimadas em 300 Pa, através de sites de meteorologia⁹⁹, durante os dias de medições. Sendo que a incerteza atribuída a X_B é 300 Pa, ver Tabela 4.8. O coeficiente de sensibilidade referente à pressão atmosférica é dado por c_6 na Equação 4.40.

$$c_6 = \frac{\partial L_W}{\partial B} = \frac{-10,86}{B} \quad (4.40)$$

Tabela 4.8 - Estimativa de incerteza padrão, u_B , (em dB), devido às variações da pressão atmosférica (pressão barométrica) em Pascal.

X_B (Pa)	c_6 (dB/Pa)	d_B	$u_B(L_W)$ [dB]
300	-0,00011	$\sqrt{3}$	0,019

4.1.3.1.3 As incertezas por banda de terço de oitava e as relativas ao nível de potência sonora global em dB(A)

As combinações de incertezas devem ser feitas primeiramente por bandas de terço de oitavas, e depois disto pode-se calcular a incerteza relativa ao valor global de nível de potência sonora. Incertezas padrão combinadas por banda de oitava (u_c) foram calculadas através da Equação 4.19, da Subseção 4.1.2, em dB:

$$u_c = \sqrt{u_{L_p}^2 + u_{Trev}^2 + u_V^2 + u_S^2 + u_t^2 + u_B^2 + u_f^2} \text{ em dB} \quad (4.19)$$

Os valores calculados através da Equação 4.19 são apresentados na penúltima coluna da Tabela 4.9. Nas bandas de 1000 a 2000 Hz os valores de u_c , também chamado $u_c(L_W)$, ficaram entre 0,20 e 0,25 dB. Pode-se notar, através dos valores na Tabela 4.9, que há predominância das contribuições de incertezas padrão inerentes aos níveis de pressão sonora, u_{L_p} , com relação às outras fontes de incertezas. Também foram calculadas as incertezas expandidas por bandas de terço de oitava, U , considerando um fator de abrangência de $k = 2,0$, ver última coluna da Tabela 4.9. Nota-se que as incertezas combinadas u_c apresentam ligeiro

⁹⁹ Os barômetros disponíveis no laboratório não apresentaram confiabilidade com relação aos valores de variações de pressão atmosférica.

aumento em bandas de altas frequências e grande elevação de valores em baixas frequências, com influência direta dos valores de u_{Lp} . Isto devido aos elevados desvios padrão experimentais dos níveis de pressão sonora L_p medidos em baixas frequências. Além disto, as incertezas padrão u_{Trev} contribuem significativamente nestes balanços de incertezas. As outras fontes de incertezas apresentam valores numéricos pouco significativos diante de u_{Lp} e u_{Trev} .

Tabela 4.9 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Primeira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m³ (câmara 2), fevereiro de 2005, LVA-UFSC.

Frequência central (Hz)	$u_{Lp}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_t(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_f(L_W)$ [dB]	$u_c(L_W)$ [dB]	$U(L_W)$ [dB]
100	1,63	0,13	0,018	0,005	0,015	0,019	0,080	1,64	3,27
125	1,46	0,18	0,019	0,005	0,015	0,019	0,068	1,48	2,95
160	0,80	0,08	0,020	0,004	0,014	0,019	0,062	0,80	1,60
200	0,78	0,36	0,021	0,003	0,014	0,019	0,048	0,86	1,72
250	0,64	0,04	0,022	0,002	0,014	0,019	0,040	0,64	1,28
315	0,45	0,01	0,023	0,002	0,013	0,019	0,033	0,45	0,90
400	0,30	0,08	0,024	0,002	0,013	0,019	0,028	0,32	0,63
500	0,25	0,07	0,024	0,001	0,013	0,019	0,021	0,26	0,52
630	0,23	0,16	0,024	0,001	0,013	0,019	0,018	0,28	0,57
800	0,22	0,18	0,025	0,001	0,013	0,019	0,015	0,28	0,56
1000	0,22	0,13	0,025	0,000	0,013	0,019	0,011	0,25	0,51
1250	0,21	0,07	0,025	0,000	0,013	0,019	0,009	0,22	0,44
1600	0,19	0,04	0,026	0,000	0,013	0,019	0,008	0,20	0,40
2000	0,20	0,01	0,026	0,000	0,013	0,019	0,006	0,20	0,41
2500	0,20	0,11	0,026	0,000	0,013	0,019	0,005	0,23	0,46
3150	0,19	0,08	0,026	0,000	0,012	0,019	0,004	0,21	0,42
4000	0,25	0,06	0,026	0,000	0,012	0,019	0,003	0,25	0,51
5000	0,22	0,14	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,26	0,52
6300	0,25	0,08	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,26	0,53
8000	0,26	0,07	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,27	0,53
10000	0,30	0,03	0,028	0,002	0,012	0,019	0,001	0,31	0,61

Com o objetivo de combinar as incertezas das bandas de terço de oitava, foram utilizadas as Equações 4.41 e 4.42. Assim obtendo a incerteza que será atribuída ao nível de potência sonora global da fonte sonora aerodinâmica BK 4204, na câmara de 193 m³. Os coeficientes de sensibilidade denominados c_j ponderam a influência correspondente a j -ésima banda de frequência de terço de oitava, L_{WAj} , em relação ao valor do nível de potência sonora global L_{WA} em dB(A); ver Equação 6.17.

$$c_j = \frac{\partial L_{WA}}{\partial L_{WAj}} = 10^{0,1(L_{Wj} + A_j - L_{WA})} \quad \text{em dB / dB} \quad (4.41)$$

$$u_c(L_{WA}) = \sqrt{\sum_j (c_j(u_c)_j)^2} \quad (4.42)$$

onde L_{Wj} é o nível de potência sonora em dB da j -ésima banda de frequência, A_j corresponde aos valores da “curva de ponderação A”, L_{WA} é valor do nível de potência sonora global em dB(A), e L_{WAj} são os valores de níveis de potência sonora em dB(A) referentes a cada banda de frequência.

Os coeficientes de sensibilidade c_j ponderam as incertezas em função dos níveis de potência sonora de cada banda¹⁰⁰, L_{Wj} , e dos valores de A_j ; referentes à curva “A”. Quanto mais elevado o nível de potência sonora na banda, maior será a contribuição de incerteza da mesma para a incerteza do nível global de potência sonora. Além disto, ao se combinarem as incertezas das diversas bandas de frequências, conforme a Equação 4.42, as parcelas já ponderadas, $c_j u_c$, são elevadas ao quadrado, e isto aumenta o efeito da ponderação proporcionada pelos coeficientes de sensibilidade c_j . Os valores de $(c_j u_c)^2$ são dados na sétima coluna da Tabela 4.10. Na penúltima linha da Tabela 4.10 estão os resultados de incertezas calculadas para os valores globais.

O indicador denominado “1 / c_j ” mostrado na Tabela 4.10 ajuda a compreender a ordem de grandeza da influência de cada nível de potência sonora, em dB(A), sobre a incerteza da banda de terço de oitava. Nas bandas onde ocorreram os menores valores do indicador “1 / c_j ” as contribuições de incertezas foram as mais elevadas. Na verdade, as linhas realçadas nas diversas Tabelas apresentadas, referentes às bandas de 1 a 2 kHz, foram escolhidas com base nos níveis de potência sonora e no indicador “1 / c_j ”. Este último varia entre 6,6 e 8,8 nas bandas realçadas, ver Tabela 4.10. Através dos valores nesta Tabela, nota-se que a maior contribuição de incerteza ocorreu na banda de 1250 Hz, isto através de $(c_j u_c)^2 = 0,011 \text{ dB}^2$.

A incerteza expandida do nível de potência sonora global em dB(A), $U(L_{WA})$, resultou em 0,15 dB, neste valor não está computada a estimativa da deriva do calibrador de nível sonoro. Foi usado fator de abrangência $k = 2,0$, e a incerteza foi arredondada para cima, com duas casas decimais, ver penúltima linha da Tabela 4.10.

¹⁰⁰ Níveis de potência sonora L_{Wj} estão em dB(F), ainda sem ponderação. F significa *flat*, ou seja, plano. A curva de resposta plana foi utilizada para obter os valores “brutos” ou “originais” das medições de níveis de pressão sonora.

Tabela 4.10 - Valores do cálculo da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Primeira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m³ (câmara 2) LVA-UFSC, fevereiro 2005.

Frequência central (Hz)	Ponderação curva "A" (dB)	L _{wj} dB	c _j	u _c (L _{wj}) (dB)	c _j u _c (dB)	(c _j u _c) ² (dB) ²	1 / c _j
100	-19,1	76,46	0,000	1,64	0,000	0,0000	4990,1
125	-16,1	77,18	0,000	1,48	0,001	0,0000	2115,1
160	-13,4	78,10	0,001	0,80	0,001	0,0000	919,1
200	-10,9	79,08	0,002	0,86	0,002	0,0000	412,6
250	-8,6	80,06	0,005	0,64	0,003	0,0000	193,9
315	-6,6	80,54	0,009	0,45	0,004	0,0000	109,5
400	-4,8	79,95	0,012	0,32	0,004	0,0000	82,9
500	-3,2	79,89	0,017	0,26	0,004	0,0000	58,2
630	-1,9	80,68	0,028	0,28	0,008	0,0001	36,0
800	-0,8	83,53	0,069	0,28	0,019	0,0004	14,5
1000	0	84,90	0,114	0,25	0,029	0,0008	8,8
1250	0,6	85,55	0,152	0,22	0,033	0,0011	6,6
1600	1	85,17	0,153	0,20	0,031	0,0009	6,6
2000	1,2	84,32	0,131	0,20	0,027	0,0007	7,6
2500	1,3	82,76	0,094	0,23	0,021	0,0005	10,7
3150	1,2	81,20	0,064	0,21	0,014	0,0002	15,6
4000	1	81,24	0,062	0,25	0,016	0,0002	16,2
5000	0,5	80,40	0,045	0,26	0,012	0,0001	22,1
6300	-0,1	78,45	0,025	0,26	0,007	0,0000	39,7
8000	-1,1	75,96	0,011	0,27	0,003	0,0000	88,8
10000	-2,5	73,53	0,005	0,31	0,001	0,0000	214,1
				u _c (L _{WA})	U(L _{WA})		
Global				0,072 dB	0,15dB	k = 2,0	

Obs.: Incerteza expandida U(L_{WA}) arredondada para cima, com duas casas decimais.

A deriva inerente ao calibrador de nível sonoro, utilizado para o ajuste da escala do analisador de sinais, foi incluída na estimativa de incerteza através de soma algébrica, por ser considerada um efeito sistemático não compensado¹⁰¹. A estimativa da deriva (*Deriva_cal*) somada à incerteza expandida, U(L_{WA}) da Tabela 4.10, para encontrar a estimativa final de incerteza de medição do nível de potência sonora global aqui denominada de U(L_{WA})_{Total}.

$$U_{(L_{WA})_{Total}} = U(L_{WA}) + Deriva_cal = 0,15 + 0,10 = 0,25 \text{ dB(A)}$$

Assim, o resultado desta determinação de nível de potência sonora foi: **L_{WA} = 94,34 ± 0,25 dB(A)**, considerando a faixa de frequência de 100 Hz a 10 kHz e intervalo de confiança de aproximadamente 95 %. Com a fonte sonora (padrão de referência) BK 4204 ensaiada na câmara de 193 m³ do LVA-UFSC.

Como ocorreu com outros tipos de fontes sonoras ensaiadas nas câmaras reverberantes, as incertezas padrão dos níveis de pressão sonora u_{Lp} apresentaram grande

¹⁰¹ Ou “erro sistemático não compensado”.

influência sobre o valor da incerteza global de cada banda de oitava. E também sobre a incerteza expandida $U_{95\%}$, ou $U(L_{WA})$, do nível global de potência sonora da fonte aerodinâmica BK 4204.

As variações quantificadas pelos **desvios padrão experimentais** dos níveis de pressão sonora, e dos tempos de reverberação, são “fontes de incertezas” que predominam no balanço de incertezas. Isto aconteceu em cada banda de terço de oitava, e também, na incerteza do nível de potência sonora global. As proporções destas predominâncias podem ser vistas nas figuras 29 e 30.

As contribuições de incertezas representadas em decibel ao quadrado (dB^2) foram plotadas em gráficos de barras nas figuras 29 e 30. As fontes de incertezas visíveis nas barras destes gráficos são u_{Lp}^2 e u_{Trev}^2 , incertezas padrão ao quadrado dos níveis de pressão sonora e dos tempos de reverberação, respectivamente¹⁰². Na Figura 29 também se pode ver pequenas contribuições relativas à medição do volume da câmara reverberante, “ $cj2*u2v(Lw)$ ”, e da pressão atmosférica, “ $cj2*u2B(Lw)$ ” segundo a legenda do gráfico; ver parte superior da barra “Incert soma”. As outras fontes de incertezas não aparecem nas barras dos gráficos porque os valores são muito pequenos em relação às incertezas predominantes.

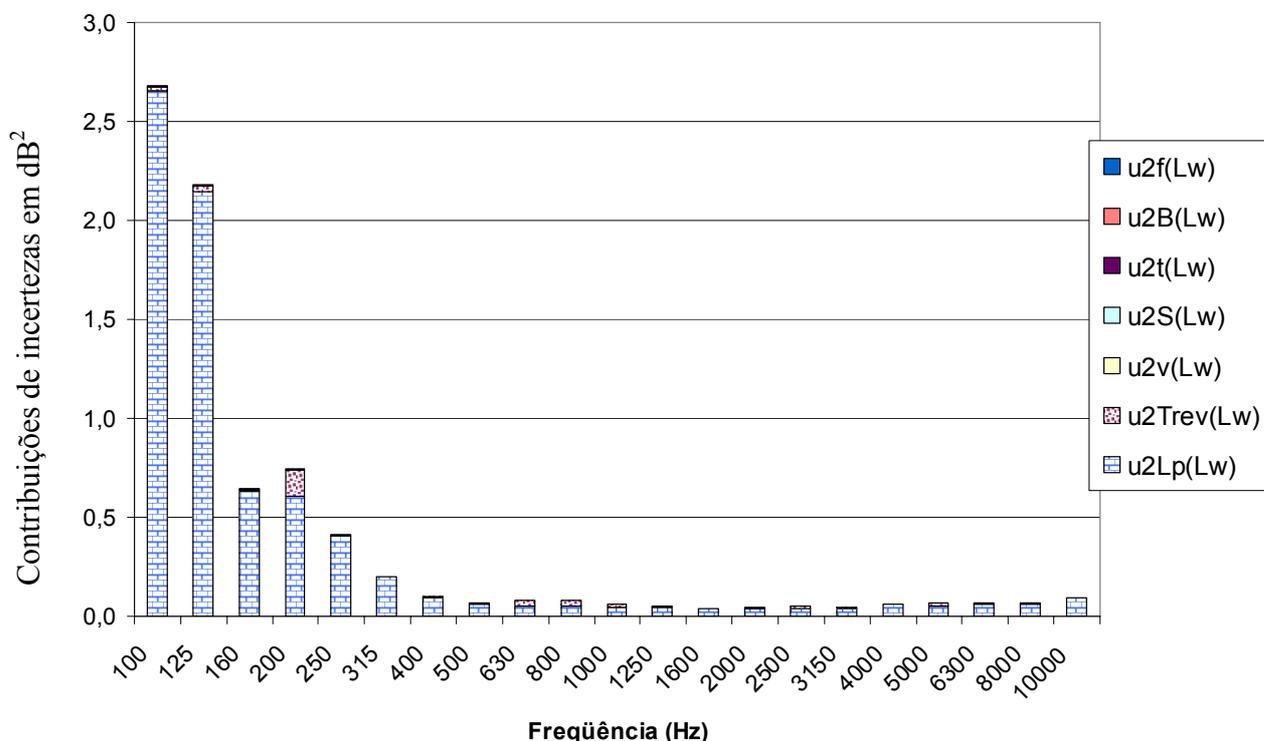


Figura 28 - Gráfico de barras representando as contribuições de cada fonte de incerteza nas bandas de terço de oitava. Valores de incertezas padrão ao quadrado. Fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m^3 nominal do LVA-UFSC, fevereiro 2005.

¹⁰² Incertezas relativas aos níveis de pressão sonora, legendadas por “ $u2Lp(Lw)$ ”, e incertezas relativas aos tempos de reverberação, legendadas por “ $u2Trev(Lw)$ ”.

A diferença entre as contribuições de incertezas plotadas na Figura 28 e as da Figura 29 está na ponderação dada pelos coeficientes de sensibilidade c_j , de forma que as amplitudes das barras na Figura 29 representam as contribuições de cada banda para o somatório de incerteza do nível global de potência sonora L_{WA} em dB(A). Sendo que a barra “Incert soma” é o somatório das amplitudes das barras das bandas de 100 a 10.000 Hz. Entretanto, as contribuições de incertezas representadas na Figura 28 são individuais, ou seja, cada barra representa as incertezas da respectiva banda de terço de oitava. Nestas contribuições individuais nota-se que os valores (ao quadrado) são significativamente elevados nas baixas frequências.

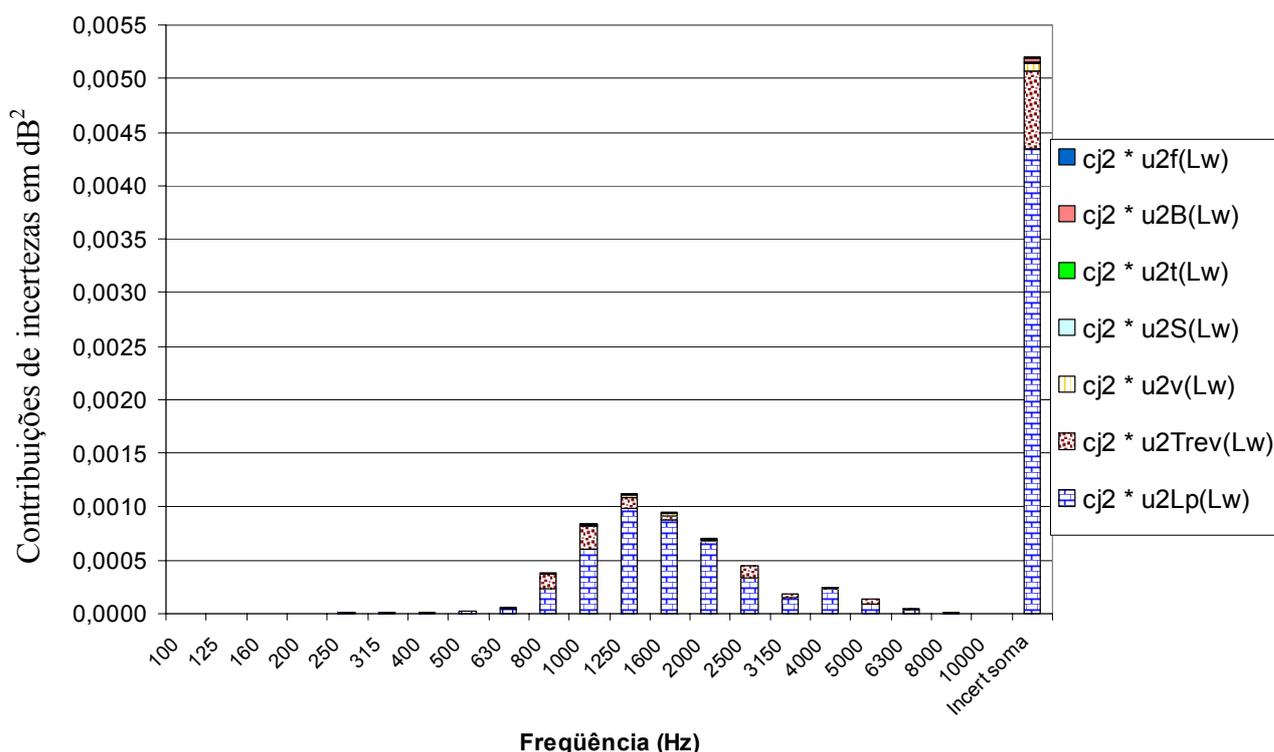


Figura 29 - Gráfico de barras representando as contribuições de incertezas, em dB^2 , com relação à incerteza do nível de potência sonora global L_{WA} , em dB(A). Fonte sonora BK 4204; câmara reverberante de 193 m^3 nominal do LVA-UFSC, fevereiro 2005.

O perfil formado pelas barras no gráfico da Figura 29 torna evidente que existe uma correlação entre o nível de potência sonora e a contribuição de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global. As principais fontes de incertezas, ou que pelo menos podem ser vistas no gráfico, são: os níveis de pressão sonora L_p , os tempos de reverberação T_{rev} , o volume da câmara reverberante V , e a pressão atmosférica B . As quais são legendadas por: $c_j^2 * u_{2Lp}(L_w)$, $c_j^2 * u_{2Trev}(L_w)$, $c_j^2 * u_{2v}(L_w)$, e $c_j^2 * u_{2B}$, respectivamente.

De maneira aproximada, a barra “incert soma” é dimensionada de acordo com o somatório dado na seguinte expressão:

$$\sum_{j=1}^M (c_j \cdot u_{Lp,j})^2 + \sum_{j=1}^M (c_j \cdot u_{Trev,j})^2 + \sum_{j=1}^M (c_j \cdot u_{V,j})^2 + \sum_{j=1}^M (c_j \cdot u_{B,j})^2$$

onde j representa a j -ésima banda de terço de oitava, e M é o número total de bandas. Sendo o primeiro termo é o predominante no cálculo da incerteza global. Os termos referentes à superfície S , temperatura t ou θ , e frequência f foram desprezados na expressão anterior.

4.1.3.2 Segunda bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, câmara de 193 m³

Os resultados desta segunda bateria de ensaios são reportados com menos detalhes que a bateria de ensaios anterior, mas a apresentação segue praticamente a mesma seqüência. Não há detalhes dos cálculos dos níveis de potência sonora através de termos da equação da norma ISO 3741 de 1999. As fontes de incertezas cujos valores são relativamente menores não são apresentadas nas tabelas a seguir. Semelhantemente à subseção anterior, as fontes de incertezas com valores menores são pouco visíveis, ou não aparecem nos gráficos de barras.

Os ensaios desta segunda bateria foram feitos em julho de 2005 na câmara reverberante de 193 m³ (volume nominal) do LVA. Foram medidos os tempos de reverberação, T_{rev} , e os níveis de pressão sonora, L_p , em diversas posições aleatórias de microfone dentro da câmara reverberante, respeitando as distâncias mínimas estabelecidas em norma. As posições dos painéis de absorção sonora foram mantidas praticamente as mesmas de quando foi desenvolvida a primeira bateria de ensaios em fevereiro de 2005.

Um dos objetivos das repetições dos ensaios após alguns meses é a verificação de possíveis variações valores dos níveis de potência sonora que podem ocorrer devido aos diversos parâmetros envolvidos e as incertezas do processo de medição.

Os níveis de potência sonora por banda de terço de oitava e valor global em dB(A), apresentados na Tabela 4.11, tem sido calculados com os mesmos métodos usados na Subseção 4.1.3.1.1. Na Tabela 4.11 foram realçadas as colunas correspondentes aos valores de níveis de potência sonora mais elevados dentre as bandas de terço de oitava. Também são dados os valores de incertezas expandidas, $U_{95\%}$, também denominadas $U(L_W)$, as quais também são apresentadas na Tabela 4.14. Estas últimas foram calculadas através de incertezas padrão combinadas baseadas nos princípios estabelecidos no ISO GUIA; Guia para a expressão da incerteza de medição.

Os resultados da investigação experimental¹⁰³ das incertezas de medições dos níveis de pressão sonora L_p são apresentados na Tabela 4.12. São estimativas de incertezas baseadas em desvios padrão experimentais¹⁰⁴.

Tabela 4.11 - Níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A). Incertezas expandidas $U_{95\%}$ estimadas para os L_{WA} em dB(A). Fonte sonora BK 4204 (2ª bateria de ensaios) ensaiada na câmara reverberante de 193 m³ do LVA-UFSC. Julho de 2005.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
L_{WF} dB	75,72	77,42	77,65	78,60	80,49	79,86	80,03	79,97	80,66	83,78	84,69
L_{WA} dB(A)	56,62	61,32	64,25	67,70	71,89	73,26	75,23	76,77	78,76	82,98	84,69
$U_{95\%}$ dB(A)	2,63	1,88	1,55	1,94	0,70	1,01	0,67	0,46	0,50	0,41	0,55
Frequência (Hz)	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	Global
L_{WF} dB	85,69	85,36	84,69	82,59	81,02	80,92	80,09	78,35	75,24	70,58	94,68
L_{WA} dB(A)	86,29	86,36	85,89	83,89	82,22	81,92	80,59	78,25	74,14	68,08	94,35
$U_{95\%}$ dB(A)	0,51	0,45	0,47	0,54	0,53	0,82	0,55	0,52	0,57	2,05	0,17
Incerteza $U_{95\%}$ (ou U) sem considerar a estimativa de deriva do calibrador de nível sonoro.											
Volume da câmara: $V = 192,67 \text{ m}^3$, superfície: $S = 208,11 \text{ m}^2$, temperatura: $\theta = 24,2 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão atmosférica: $B = 1,015 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Valores médios aproximados.											
Foram usados os tempos de reverberação T_{20} para obter estes níveis de potência sonora.											

Em comparação com os resultados de L_{WF} e L_{WA} encontrados na primeira bateria de ensaios, em fevereiro de 2005, os resultados mostrados na Tabela 4.11 apresentam grande concordância. Os níveis de potência sonora (sem ponderação) resultaram em 94,71 dB e 94,68 dB em fevereiro e julho de 2005, respectivamente, na câmara de 193 m³. E os níveis de potência sonora obtidos com “ponderação da curva A” resultaram em 94,34 dB(A) e 94,35 dB(A) em fevereiro e julho de 2005, respectivamente. As diferenças são extremamente pequenas, da ordem de 0,01 a 0,03 dB, o que demonstra a grande concordância entre estes resultados experimentais, considerando o tempo entre as realizações das duas baterias de ensaios.

¹⁰³ Medições de L_p com oito posições de microfones e duas posições de fonte sonora. Total de dezesseis amostras.

¹⁰⁴ Detalhes dos cálculos de estimativas de incertezas, e equações usadas, na Subseção 4.1.3.1.2.

Tabela 4.12 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , câmara de 193 m³ do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 (2ª bateria de ensaios) julho 2005.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)	u_{ccm} (dB)	$X_{L_p, aleatório}$ (dB)	c_1	d_{L_p}	$u_{L_p}(L_w)$ [dB]
100	1,06	0,172	1,07	1,0	1,0	1,07
125	0,87	0,172	0,89	1,0	1,0	0,89
160	0,72	0,172	0,74	1,0	1,0	0,74
200	0,71	0,172	0,73	1,0	1,0	0,73
250	0,27	0,172	0,32	1,0	1,0	0,32
315	0,38	0,172	0,41	1,0	1,0	0,41
400	0,28	0,172	0,33	1,0	1,0	0,33
500	0,11	0,172	0,20	1,0	1,0	0,20
630	0,07	0,172	0,19	1,0	1,0	0,19
800	0,10	0,172	0,20	1,0	1,0	0,20
1000	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23
1250	0,08	0,172	0,19	1,0	1,0	0,19
1600	0,12	0,172	0,21	1,0	1,0	0,21
2000	0,09	0,172	0,19	1,0	1,0	0,19
2500	0,07	0,172	0,18	1,0	1,0	0,18
3150	0,07	0,172	0,19	1,0	1,0	0,19
4000	0,09	0,172	0,19	1,0	1,0	0,19
5000	0,07	0,172	0,19	1,0	1,0	0,19
6300	0,08	0,215	0,23	1,0	1,0	0,23
8000	0,18	0,215	0,28	1,0	1,0	0,28
10000	0,27	0,215	0,35	1,0	1,0	0,35

As estimativas experimentais de incertezas das medições de L_p dadas na Tabela 4.12 nas linhas correspondentes às bandas de 1000 a 2000 Hz são da mesma ordem de grandeza que as obtidas na primeira bateria de ensaios em fevereiro de 2005, ver Tabela 4.4 na Subseção 4.1.3.1.2. As incertezas padrão u_{L_p} estão entre 0,19 e 0,23 dB nas bandas de 1000 a 2000 Hz. Pelo menos neste caso específico houve muito boa concordância das estimativas experimentais de incertezas.

O ensaio de tempos de reverberação desta segunda bateria de ensaios apresentou dispersões menores que as da primeira bateria realizada em fevereiro de 2005. Especificamente nas bandas de 1000 a 2000 Hz as incertezas padrão $u_{T_{rev}}$ encontradas ficaram na faixa de 0,07 a 0,17 dB; ver Tabela 4.13. Neste caso as estimativas $u_{T_{rev}}$ da primeira bateria de ensaios tiveram grandes variações. Nas bandas de 1000 a 2000 Hz as incertezas $u_{T_{rev}}$ variaram entre 0,01 e 0,13 dB. Estas diferenças de estimativas experimentais são chamadas de “incerteza da incerteza” no ISO GUIA, se referindo à qualidade deste tipo de estimativa a qual pode variar de ensaio para ensaio. O motivo da ocorrência destas dispersões diferentes dos valores de T_{rev} entre as duas baterias de ensaios está relacionada com o modo com que o operador conduziu o ensaio, com as posições de microfones (e o campo sonoro dentro da câmara reverberante), além da excitação

utilizada (tipo de fonte sonora eletroacústica¹⁰⁵ e níveis de excitação aplicados), dentre outros fatores de influência sobre os desempenhos metrológicos das diversas medições.

Tabela 4.13 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m³ do LVA-UFSC em **julho** de 2005 (2ª bateria de ensaios). As estimativas de incertezas $X_{T_{rev}}$ foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor $d_{T_{rev}}$ e incertezas padrão combinada $u_{T_{rev}}(L_W)$.

Frequência central (Hz)	T_{rev} (s) *	$X_{T_{rev}}$ (s)	c_2 (dB/s)	$d_{T_{rev}}$	$u_{T_{rev}}(L_W)$ [dB]
100	12,66	2,19	-0,35	1,0	0,76
125	11,71	0,81	-0,38	1,0	0,30
160	8,54	0,41	-0,52	1,0	0,21
200	7,50	1,08	-0,59	1,0	0,64
250	6,52	0,22	-0,68	1,0	0,15
315	6,39	0,41	-0,69	1,0	0,29
400	6,99	0,09	-0,63	1,0	0,06
500	7,65	0,18	-0,58	1,0	0,10
630	7,82	0,29	-0,57	1,0	0,16
800	7,51	0,09	-0,59	1,0	0,05
1000	7,56	0,25	-0,59	1,0	0,15
1250	7,28	0,28	-0,61	1,0	0,17
1600	6,52	0,10	-0,68	1,0	0,07
2000	5,64	0,16	-0,79	1,0	0,13
2500	4,95	0,21	-0,90	1,0	0,19
3150	3,96	0,17	-1,14	1,0	0,19
4000	3,25	0,26	-1,40	1,0	0,36
5000	2,39	0,11	-1,93	1,0	0,20
6300	1,72	0,04	-2,73	1,0	0,11
8000	1,36	0,02	-3,53	1,0	0,06
10000	1,35	0,27	-3,56	1,0	0,96

* T_{rev} são os tempos de reverberação T_{20} .

Duas posições de fonte sonora, três posições de microfone; com dois decaimentos em cada posição. Total de doze decaimentos. Médias e desvios padrão de seis amostras.

Houve um erro grosseiro na avaliação das curvas de decaimento de tempos de reverberação na banda de 10 kHz, sendo que o valor de T_{rev} e da estimativa de incerteza $X_{T_{rev}}$, e conseqüentemente $u_{T_{rev}}$, **não** são confiáveis para a determinação do nível de potência sonora naquela banda de terço de oitava. No entanto, os valores foram mantidos com o objetivo de verificar se um erro desta amplitude influenciaria a incerteza do valor global de nível de potência sonora, considerando também a pequena quantidade de energia sonora na banda de 10 kHz.

Ao se avaliarem as incertezas padrão combinadas u_c , Tabela 4.14, nas bandas de 1000 a 2000 Hz, nota-se que de maneira geral as incertezas foram superiores às apresentadas na Tabela 4.9 da Subseção 4.1.3.1.3, que se refere aos ensaios de fevereiro de 2005. Estas últimas na faixa de 0,20 a 0,25 dB, enquanto que os valores de u_c calculadas para a segunda bateria, Tabela 4.14, estão entre 0,23 e 0,28 dB. O motivo deste aumento nas incertezas investigadas se deve principalmente ao aumento encontrado nos valores de $u_{T_{rev}}$, também denominado

¹⁰⁵ Foram usados dois tipos distintos de fontes sonoras eletroacústicas nas medições de tempos de reverberação T_{rev} .

$u_{Trev}(L_W)$; ver terceiras colunas das Tabelas 4.14 e 4.9 na Subseção 4.1.3.1.3.

Tabela 4.14 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 sob teste (2ª bateria de ensaios). Câmara de 193 m³ LVA-UFSC, julho de 2005.

Frequência central (Hz)	$u_{T,p}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_i(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_f(L_W)$ [dB]	$u_c(L_W)$ [dB]	$U(L_W)$ [dB]
100	1,07	0,76	0,018	0,006	0,015	0,019	0,080	1,31	2,63
125	0,89	0,30	0,019	0,005	0,015	0,019	0,068	0,94	1,88
160	0,74	0,21	0,020	0,004	0,014	0,019	0,062	0,77	1,55
200	0,73	0,64	0,021	0,003	0,014	0,019	0,047	0,97	1,94
250	0,32	0,15	0,022	0,002	0,014	0,019	0,039	0,35	0,71
315	0,41	0,29	0,023	0,002	0,014	0,019	0,033	0,50	1,01
400	0,33	0,06	0,024	0,001	0,013	0,019	0,028	0,34	0,68
500	0,20	0,10	0,024	0,001	0,013	0,019	0,021	0,23	0,47
630	0,19	0,16	0,024	0,001	0,013	0,019	0,018	0,25	0,50
800	0,20	0,05	0,025	0,001	0,013	0,019	0,015	0,21	0,41
1000	0,23	0,15	0,025	0,000	0,013	0,019	0,011	0,28	0,55
1250	0,19	0,17	0,025	0,000	0,013	0,019	0,009	0,26	0,51
1600	0,21	0,07	0,026	0,000	0,013	0,019	0,008	0,23	0,45
2000	0,19	0,13	0,026	0,000	0,013	0,019	0,006	0,23	0,47
2500	0,18	0,19	0,026	0,000	0,013	0,019	0,005	0,27	0,54
3150	0,19	0,19	0,026	0,000	0,012	0,019	0,004	0,27	0,54
4000	0,19	0,36	0,027	0,001	0,012	0,019	0,003	0,41	0,82
5000	0,19	0,20	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,28	0,56
6300	0,23	0,11	0,028	0,001	0,012	0,019	0,002	0,26	0,52
8000	0,28	0,06	0,028	0,002	0,012	0,019	0,002	0,29	0,57
10000	0,35	0,06	0,028	0,002	0,012	0,019	0,001	1,02	2,05

As equações usadas para calcular as incertezas apresentadas na Tabela 4.14 são detalhadas nas Subseções 4.1.3.1.2 e 4.1.3.1.3. No cálculo das incertezas expandidas, U , foi considerado fator de abrangência $k = 2,0$.

Observando os resultados encontrados para a banda de 10 kHz, nas Tabelas 4.14 e 4.15, pode-se notar que devido ao baixo valor de nível de potência sonora, e conseqüentemente baixo valor do coeficiente c_j , a contribuição de incerteza $(c_j u_c)^2$ torna-se praticamente nula. Isto ocorre a despeito do erro grosseiro no processo de determinação dos tempos de reverberação que elevou acentuadamente os valores das estimativas de incerteza u_{Trev} e u_c na banda de 10 kHz.

Além da grande concordância entre os valores de níveis globais de pressão sonora, L_{WA} em dB(A), entre a **primeira** e **segunda** baterias de ensaio, há semelhança entre os indicadores e/ou parâmetros obtidos nas investigações de incertezas; ver Tabela 4.15 e Tabela 4.10 na Subseção 4.1.3.1.3. Por exemplo, os coeficientes de sensibilidade c_j apresentados na Tabela 4.10, considerando bandas de 800 a 2500 Hz, {0,069; 0,114; 0,152; 0,153; 0,131; 0,094}, são valores semelhantes aos encontrados nos cálculos referentes a esta segunda bateria de ensaios, {0,073; 0,108; 0,156; 0,159; 0,143; 0,090}. Os valores seguiram um mesmo “perfil”, da mesma forma os indicadores “ $1/c_j$ ” têm um comportamento semelhante se comparados a

partir dos valores contidos nas tabelas acima citadas. Os indicadores “ $1/c_j$ ” ficaram entre 6,6 e 8,8 nas bandas de 1000 a 2000 Hz na primeira bateria de ensaios, ver Tabela 4.10 na Subseção 4.1.3.1.3, enquanto que na segunda bateria resultaram em valores entre 6,3 e 9,2 nas respectivas bandas de terço de oitava.

Tabela 4.15 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 193 m³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 sob teste (2ª bateria de ensaios), **julho 2005**.

Frequência central (Hz)	Ponderação curva "A" (dB)	L_{w_j} dB	c_j	$u_c(L_{w_j})$ (dB)	$c_j u_c$ (dB)	$(c_j u_c)^2$ (dB) ²	$1 / c_j$
100	-19,1	75,72	0,000	1,31	0,000	0,0000	5932,8
125	-16,1	77,42	0,000	0,94	0,000	0,0000	2009,5
160	-13,4	77,65	0,001	0,77	0,001	0,0000	1022,9
200	-10,9	78,60	0,002	0,97	0,002	0,0000	462,8
250	-8,6	80,49	0,006	0,35	0,002	0,0000	176,2
315	-6,6	79,86	0,008	0,50	0,004	0,0000	128,6
400	-4,8	80,03	0,012	0,34	0,004	0,0000	81,7
500	-3,2	79,97	0,017	0,23	0,004	0,0000	57,3
630	-1,9	80,66	0,028	0,25	0,007	0,0000	36,2
800	-0,8	83,78	0,073	0,21	0,015	0,0002	13,7
1000	0	84,69	0,108	0,28	0,030	0,0009	9,2
1250	0,6	85,69	0,156	0,26	0,040	0,0016	6,4
1600	1	85,36	0,159	0,23	0,036	0,0013	6,3
2000	1,2	84,69	0,143	0,23	0,033	0,0011	7,0
2500	1,3	82,59	0,090	0,27	0,024	0,0006	11,1
3150	1,2	81,02	0,061	0,27	0,016	0,0003	16,3
4000	1	80,92	0,057	0,41	0,023	0,0006	17,5
5000	0,5	80,09	0,042	0,28	0,012	0,0001	23,8
6300	-0,1	78,35	0,025	0,26	0,006	0,0000	40,8
8000	-1,1	75,24	0,010	0,28	0,003	0,0000	104,8
10000	-2,5	70,58	0,002	1,02	0,002	0,0000	423,6
					$u_c(L_{WA})$	$U(L_{WA})$	
Global					0,082 dB	0,17 dB	$k = 2,0$

A incerteza expandida U (ou $U_{95\%}$) do nível de potência sonora global, que na primeira bateria de ensaios foi estimada¹⁰⁶ em 0,15 dB(A), resultou em 0,17 dB(A) para esta segunda bateria de ensaios. O aumento é atribuído aos valores das dispersões (desvios padrão experimentais) dos tempos de reverberação, os quais tiveram um aumento significativo de uma bateria de ensaio a outra, dentre outros fatores que podem ter influenciado as estimativas de incertezas.

A deriva inerente ao calibrador de nível sonoro, utilizado para o ajuste da escala do analisador de sinais, foi incluída na estimativa de incerteza de forma sistemática, ou seja, através de soma algébrica. A estimativa da deriva (*Deriva_cal*) somada à incerteza expandida, $U(L_{WA})$ da Tabela 4.15, resulta no parâmetro aqui denominado $U_{(L_{WA})Total}$. Este último é uma

¹⁰⁶ Sem considerar a incerteza inerente à deriva do calibrador de nível sonoro.

espécie de “estimativa final” de incerteza de medição do nível de potência sonora global, neste caso calculado para a segunda bateria de ensaios de determinação de L_{WA} .

$$U_{(L_{WA})Total} = U(L_{WA}) + Deriva_{cal} = 0,17 + 0,10 = 0,27 \text{ dB(A)}$$

Assim, o resultado desta determinação de nível de potência sonora foi: $L_{WA} = 94,35 \pm 0,27 \text{ dB(A)}$, considerando a faixa de frequência de 100 Hz a 10 kHz e intervalo de confiança de aproximadamente 95 %. Com a fonte sonora (padrão de referência) BK 4204 ensaiada na câmara de 193 m³ do LVA-UFSC.

O gráfico de barras da Figura 30 mostra o perfil da incertezas de medição estimadas para cada banda de terço de oitava, em caráter individual, ou seja, são “incertezas” em dB² as quais estão relacionadas com cada respectiva banda de frequência. Se a fonte sonora tivesse um espectro de potência plano, ou seja, todos os níveis de potência sonora tivessem o mesmo valor, então as barras na Figura 30 representariam as contribuições de incertezas (ou pelo menos a relação entre as contribuições de incertezas entre as bandas) para a incerteza de medição do nível de potência sonora global em dB(A). Entretanto, estas últimas são representadas pelas barras do gráfico da Figura 31, onde nota-se a predominância das contribuições de incertezas nas bandas de 1000 a 2000 Hz, além de contribuições significativas nas bandas de 2500 a 5000 Hz e 800 Hz.

Na comparação entre os gráficos de barras da Figura 29 na Subseção 4.1.3.1.3 e Figura 31, pode-se observar que neste último a contribuição de incerteza dos tempos de reverberação, u_{Trev}^2 , alcançou uma proporção maior do que na bateria de ensaio anterior. Isto pode ser facilmente visualizado nas barras que representam a contribuição para o valor de nível de potência sonora global; barras denominadas “Incert soma” e “Incert somada” nas figuras citadas.

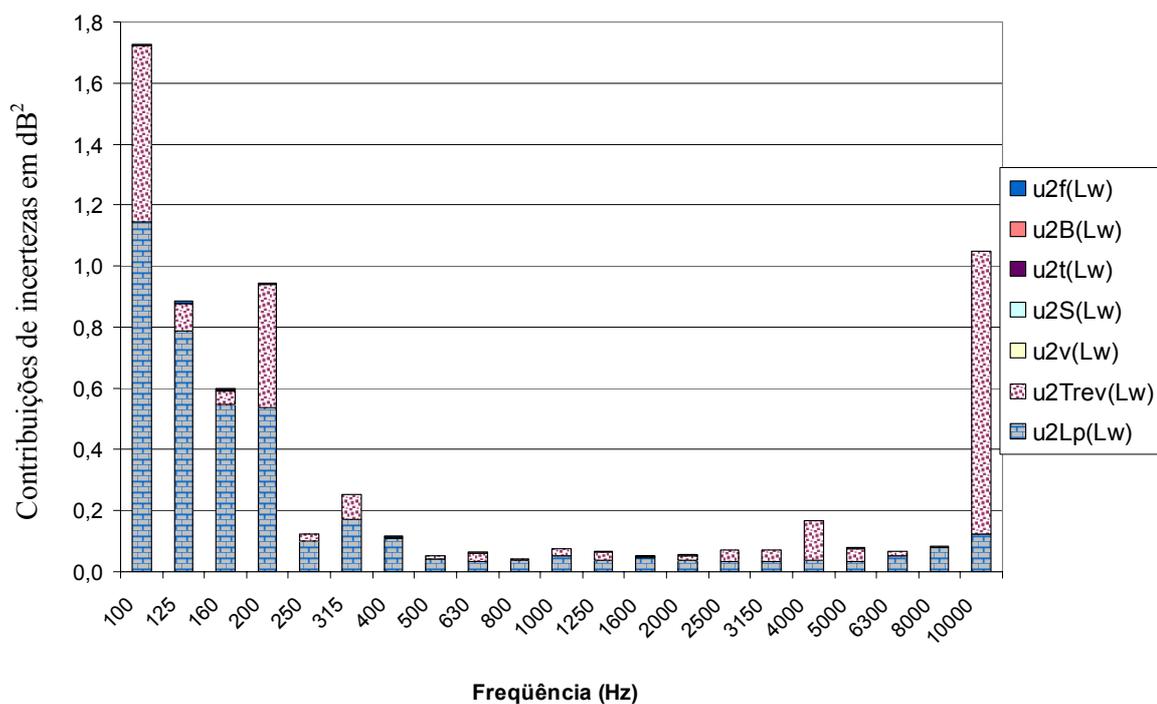


Figura 30 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara de $193\ m^3$ do LVA-UFSC (2ª bateria de ensaios), julho 2005.

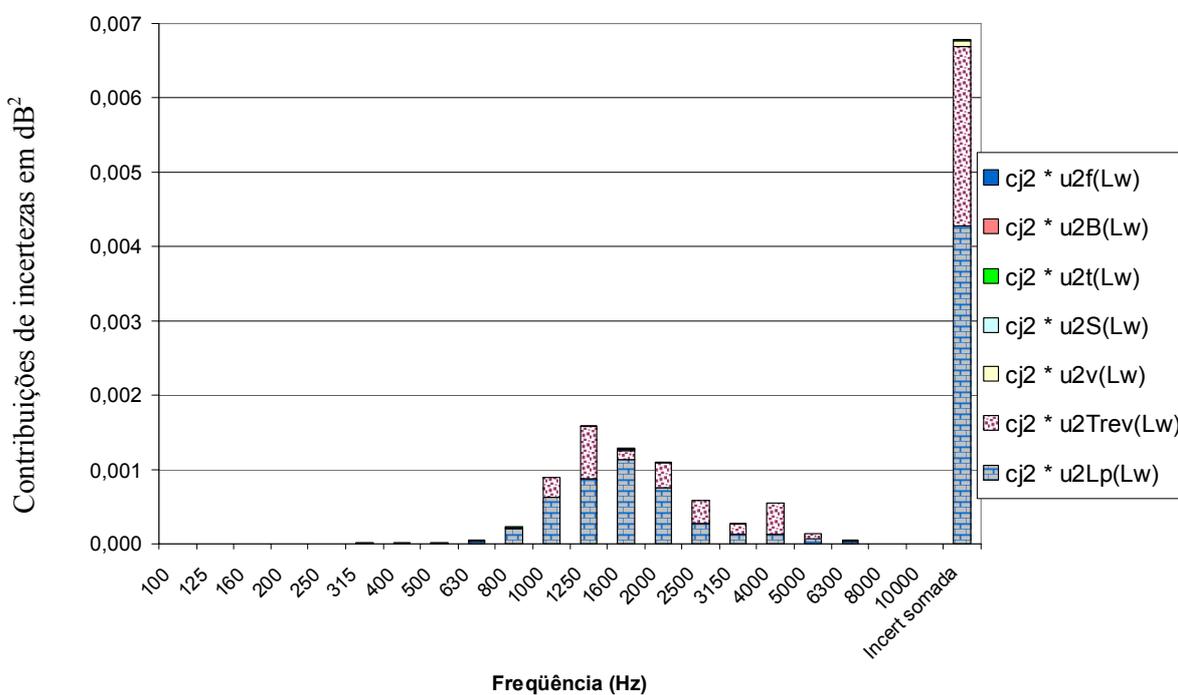


Figura 31 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em $dB(A)$. Fonte sonora BK 4204 sob teste na câmara reverberante de $193\ m^3$ do LVA-UFSC (2ª bateria de ensaios), julho 2005.

4.1.3.3 Terceira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, câmara de 193 m³

Nesta bateria de ensaios realizada em agosto de 2005 os níveis de pressão sonora L_p gerados dentro da câmara reverberante de 193 m³ (nominal) pela fonte sonora BK 4204 foram medidos simultaneamente através de dois microfones capacitivos GRAS modelo 40AE. Os microfones com seus respectivos pré-amplificadores foram conectados ao analisador dinâmico de sinais PULSE (Brüel & Kjær) através dois canais 1 e 2, assim foi possível realizar medições em duas posições de microfones simultaneamente. Aproveitando esta facilidade proporcionada pelo equipamento de medição, alguns dos parâmetros de determinação de níveis de potência sonora e incertezas de medição foram calculados separadamente. Isto com objetivo de obter um valor de nível de potência sonora global e respectiva incerteza para cada um dos dois microfones (canais de medição) usados nas medições dos L_p .

Tabela 4.16 - Níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A). Incertezas expandidas $U_{95\%}$ estimadas para os L_{WA} em dB(A). Medições de L_p feitas em dois canais simultaneamente. Fonte sonora BK 4204 (3ª bateria de ensaios) na câmara reverberante de 193 m³ do LVA-UFSC, agosto de 2005.

Canal 1 (microfone 1)											
Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
L_{WF} dB	77,38	76,85	77,26	78,51	80,20	80,24	79,91	80,07	80,71	83,67	84,60
L_{WA} dB(A)	58,28	60,75	63,86	67,61	71,60	73,64	75,11	76,87	78,81	82,87	84,60
$U_{95\%}$ dB(A)	3,36	2,42	1,75	2,06	0,79	0,76	0,59	0,55	0,60	0,51	0,48
Frequência (Hz)	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	Global
L_{WF} dB	85,52	85,27	84,74	82,89	81,85	81,96	81,23	79,85	77,41	73,34	94,88
L_{WA} dB(A)	86,12	86,27	85,94	84,19	83,05	82,96	81,73	79,75	76,31	70,84	94,58
$U_{95\%}$ dB(A)	0,56	0,41	0,49	0,57	0,59	0,85	0,65	0,61	0,61	2,08	0,17
Canal 2 (microfone 2)											
Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
L_{WF} dB	77,59	77,04	77,27	78,68	80,31	80,44	79,89	80,22	80,83	83,87	84,68
L_{WA} dB(A)	58,49	60,94	63,87	67,78	71,71	73,84	75,09	77,02	78,93	83,07	84,68
$U_{95\%}$ dB(A)	3,39	2,52	1,81	1,91	0,77	0,71	0,52	0,56	0,60	0,54	0,56
Frequência (Hz)	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	Global
L_{WF} dB	85,58	85,35	84,91	83,13	81,87	81,75	81,11	79,75	77,27	73,01	94,96
L_{WA} dB(A)	86,18	86,35	86,11	84,43	83,07	82,75	81,61	79,65	76,17	70,51	94,65
$U_{95\%}$ dB(A)	0,65	0,51	0,59	0,58	0,59	0,87	0,62	0,61	0,68	2,08	0,19
Incerteza $U_{95\%}$ (ou U_C) sem considerar a estimativa de deriva do calibrador de nível sonoro.											
Volume da câmara: $V = 192,67 \text{ m}^3$, superfície: $S = 208,11 \text{ m}^2$, temperatura: $\theta = 25,9 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão atmosférica: $B = 1,011 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Valores médios aproximados.											
Foram usados os tempos de reverberação T_{20} para obter estes níveis de potência sonora.											

Os níveis de potência sonora e incertezas estimadas, por bandas de terço de oitava e valores globais em dB e em dB(A), são apresentados na Tabela 4.16. As colunas correspondentes aos níveis de potência sonora mais elevados e valores globais foram realçadas.

Novamente as incertezas dos níveis de pressão sonora foram estimados através dos desvios padrão experimentais e incertezas da cadeia de medição (u_{ccm}), porém a partir de dois canais; dois microfones de medição. Os resultados destes cálculos estão na Tabela 4.17 e as equações usadas foram as mesmas apresentadas na Subseção 4.1.3.1.2.

As linhas realçadas correspondem às bandas de 1250 a 2000 Hz, nas quais ocorreram indicadores “ $1/c_j$ ” da ordem de 7,0, enquanto que nas bandas imediatamente inferior e superior os indicadores “ $1/c_j$ ” foram maiores que 10,0; ver Tabela 4.19. Isto demonstra que estas bandas de terço de oitava são as que mais influenciam no cálculo da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A).

Especificamente nas bandas de 1250 a 2000 Hz, os desvios padrão experimentais dos L_p medidos através do microfone 2 foram mais elevados que os desvios padrão obtidos através do microfone 1 (canal 1); ver Tabela 4.17. Em algumas das outras bandas ocorreu o contrário, o canal 1 apresentou desvios padrão experimentais maiores, e também ocorreram valores iguais de desvios padrão (entre canais 1 e 2) em algumas das bandas de terço de oitava. As incertezas padrão estimadas para os níveis de pressão sonora, $u_{L_p}(L_w)$ em dB, resultaram em valores mais elevados para o canal 2, isto nas bandas de 1000 a 2500 Hz dentre outras.

Tabela 4.17 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , sem considerar deriva do calibrador de nível sonoro. Dois canais (microfones) de medição simultâneos. Câmara reverberante de 193 m³ do LVA-UFSC. Fonte sonora **BK 4204** sob teste (3ª bateria de ensaios), agosto 2005.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)		u_{ccm} (dB)	$X_{L_p, aleatório}$ (dB)		c_1	d_{L_p}	$u_{L_p}(L_w)$ [dB]	
	Canal 1	Canal 2		Canal 1	Canal 2			Canal 1	Canal 2
100	1,49	1,50	0,172	1,50	1,51	1,0	1,0	1,50	1,51
125	1,16	1,21	0,172	1,17	1,22	1,0	1,0	1,17	1,22
160	0,83	0,86	0,172	0,84	0,88	1,0	1,0	0,84	0,88
200	0,79	0,69	0,172	0,81	0,71	1,0	1,0	0,81	0,71
250	0,32	0,31	0,172	0,36	0,35	1,0	1,0	0,36	0,35
315	0,17	0,11	0,172	0,24	0,20	1,0	1,0	0,24	0,20
400	0,23	0,18	0,172	0,29	0,25	1,0	1,0	0,29	0,25
500	0,19	0,19	0,172	0,25	0,26	1,0	1,0	0,25	0,26
630	0,18	0,18	0,172	0,25	0,25	1,0	1,0	0,25	0,25
800	0,18	0,20	0,172	0,25	0,26	1,0	1,0	0,25	0,26
1000	0,08	0,16	0,172	0,19	0,24	1,0	1,0	0,19	0,24
1250	0,14	0,21	0,172	0,22	0,27	1,0	1,0	0,22	0,27
1600	0,09	0,17	0,172	0,19	0,24	1,0	1,0	0,19	0,24
2000	0,11	0,20	0,172	0,21	0,26	1,0	1,0	0,21	0,26
2500	0,12	0,13	0,172	0,21	0,22	1,0	1,0	0,21	0,22
3150	0,14	0,14	0,172	0,22	0,22	1,0	1,0	0,22	0,22
4000	0,14	0,17	0,172	0,22	0,24	1,0	1,0	0,22	0,24
5000	0,18	0,16	0,172	0,25	0,23	1,0	1,0	0,25	0,23
6300	0,18	0,18	0,215	0,28	0,28	1,0	1,0	0,28	0,28
8000	0,21	0,25	0,215	0,30	0,33	1,0	1,0	0,30	0,33
10000	0,32	0,33	0,215	0,39	0,39	1,0	1,0	0,39	0,39

Doze amostras de L_p para cada microfone. Duas posições de fonte sonora, 6 posições p/ cada microfone (canal).

No ensaio de medição dos tempos de reverberação na câmara de 193 m³ em agosto de 2005, houve problema durante a excitação acústica da câmara. Um eventual problema elétrico ou eletrônico na fonte sonora eletroacústica que resultou no comprometimento da qualidade dos resultados encontrados na ocasião. Por isto foi decidido descartar tais valores. Os valores de **tempos de reverberação**, T_{rev} , e suas estimativas de incertezas usados nos cálculos desta terceira bateria de ensaios são os mesmos obtidos na segunda bateria (julho 2005); ver valores de T_{rev} , X_{Trev} e u_{Trev} na Tabela 4.13, na Subseção 4.1.3.2.

As incertezas padrão combinadas $u_c(L_w)$ foram calculadas para os canais 1 e 2, que representam medições que foram realizadas simultaneamente, mas com diferentes posições dos dois microfones utilizados. Na Tabela 4.18 são apresentados os valores das incertezas padrão das diversas fontes de incertezas, sendo que as incertezas padrão dos níveis de pressão sonora u_{Lp} estimadas para os dois canais de medição tornam possível fazer estimativas $u_c(L_w)$ diferentes para cada um dos dois canais, em cada banda de terço de oitava. Para estes cálculos foi usada a Equação 4.14.

Tabela 4.18 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava; para dois canais de medição de L_p . Fonte sonora BK 4204 sob teste. Câmara de 193 m³ LVA-UFSC, (3ª bateria de ensaios) agosto de 2005.

Frequência central (Hz)	Canal 1 $u_{Lp}(L_w)$ [dB]	Canal 2 $u_{Lp}(L_w)$ [dB]	$u_{Trev}(L_w)$ [dB]	$u_v(L_w)$ [dB]	$u_s(L_w)$ [dB]	$u_i(L_w)$ [dB]	$u_B(L_w)$ [dB]	$u_f(L_w)$ [dB]	Canal 1 $u_c(L_w)$ [dB]	Canal 2 $u_c(L_w)$ [dB]
100	1,50	1,51	0,76	0,018	0,006	0,015	0,019	0,080	1,68	1,69
125	1,17	1,22	0,30	0,019	0,005	0,015	0,019	0,068	1,21	1,26
160	0,84	0,88	0,21	0,020	0,004	0,014	0,019	0,062	0,87	0,91
200	0,81	0,71	0,64	0,021	0,003	0,014	0,019	0,048	1,03	0,95
250	0,36	0,35	0,15	0,022	0,002	0,014	0,019	0,040	0,40	0,39
315	0,24	0,20	0,29	0,023	0,002	0,013	0,019	0,033	0,38	0,35
400	0,29	0,25	0,06	0,024	0,002	0,013	0,019	0,028	0,29	0,26
500	0,25	0,26	0,10	0,024	0,001	0,013	0,019	0,021	0,28	0,28
630	0,25	0,25	0,16	0,024	0,001	0,013	0,019	0,018	0,30	0,30
800	0,25	0,26	0,05	0,025	0,001	0,013	0,019	0,015	0,26	0,27
1000	0,19	0,24	0,15	0,025	0,000	0,013	0,019	0,011	0,24	0,28
1250	0,22	0,27	0,17	0,025	0,000	0,013	0,019	0,009	0,28	0,32
1600	0,19	0,24	0,07	0,026	0,000	0,013	0,019	0,008	0,21	0,25
2000	0,21	0,26	0,13	0,026	0,000	0,013	0,019	0,006	0,24	0,30
2500	0,21	0,22	0,19	0,026	0,000	0,012	0,019	0,005	0,29	0,29
3150	0,22	0,22	0,19	0,026	0,000	0,012	0,019	0,004	0,29	0,30
4000	0,22	0,24	0,36	0,027	0,001	0,012	0,019	0,003	0,43	0,44
5000	0,25	0,23	0,20	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,33	0,31
6300	0,28	0,28	0,11	0,028	0,001	0,012	0,019	0,002	0,30	0,31
8000	0,30	0,33	0,06	0,028	0,002	0,012	0,019	0,002	0,31	0,34
<i>10000</i>	<i>0,39</i>	<i>0,39</i>	<i>0,96</i>	<i>0,028</i>	<i>0,002</i>	<i>0,012</i>	<i>0,019</i>	<i>0,001</i>	<i>1,04</i>	<i>1,04</i>

De fato, os valores de T_{rev} e u_{Trev} são os mesmos que foram obtidos na bateria de ensaios anterior (julho), e por isto ocorreu o mesmo erro grosseiro na banda de 10 kHz onde a incerteza combinada $u_c(L_w)$ resultou num valor muito além do esperado. Existem pelo menos

dois modos de obter um “valor corrigido” para T_{rev} e u_{Trev} no caso da banda de 10 kHz; ao se excluir amostras consideradas “erradas” por avaliação subjetiva ou corrigindo a avaliação das curvas de decaimentos consideradas inconsistentes e refazendo os cálculos das amostras de T_{rev} . Porém, neste caso o erro grosseiro na banda de 10 kHz foi mantido com objetivo de se analisar o efeito que tem sobre a incerteza do nível de potência sonora global.

As incertezas relativas ao nível de potência sonora global em dB(A) foram calculadas através das Equações 4.36 e 4.37, ver Subseção 4.1.3.1.3. Os valores relacionados com estes cálculos e resultados, $u_c(L_{WA})$ e $U(L_{WA})$, são apresentados na Tabela 4.19. Os valores dos indicadores “ $1/c_j$ ” de ambos os canais mostram grande concordância, nas bandas de 1250 a 2000 Hz estes valores apresentam diferenças de apenas 0,1 (dB/dB), sendo da ordem de 1,37 a 1,47 % de diferença entre os indicadores de ambos os canais. De forma semelhante, os coeficientes de sensibilidade c_j apresentaram valores muito similares em ambos os canais e em praticamente todas as bandas de terço de oitava.

Tabela 4.19 - Valores do cálculo das incertezas dos valores globais de níveis de potência sonora em dB(A), câmara de 193 m³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 sob teste, (3ª bateria de ensaios); dois canais de microfones. **Agosto 2005.**

Frequência central (Hz)	L_{WA} dB(A)		c_j		$u_c(L_w)$ (dB)		$(c_j u_c)^2$ (dB ²)		$1 / c_j$	
	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2
100	58,28	58,49	0,000	0,000	1,68	1,69	0,00000	0,00000	4268,9	4339,6
125	60,75	60,94	0,000	0,000	1,21	1,26	0,00000	0,00000	2415,5	2455,5
160	63,86	63,87	0,001	0,001	0,87	0,91	0,00000	0,00000	1182,1	1201,7
200	67,61	67,78	0,002	0,002	1,03	0,95	0,00000	0,00000	497,8	506,0
250	71,60	71,71	0,005	0,005	0,40	0,39	0,00000	0,00000	198,8	202,1
315	73,64	73,84	0,008	0,008	0,38	0,35	0,00001	0,00001	124,3	126,4
400	75,11	75,09	0,011	0,011	0,29	0,26	0,00001	0,00001	88,5	90,0
500	76,87	77,02	0,017	0,017	0,28	0,28	0,00002	0,00002	59,0	60,0
630	78,81	78,93	0,026	0,026	0,30	0,30	0,00006	0,00006	37,8	38,4
800	82,87	83,07	0,067	0,066	0,26	0,27	0,00030	0,00032	14,8	15,1
1000	84,60	84,68	0,100	0,099	0,24	0,28	0,00059	0,00078	10,0	10,1
1250	86,12	86,18	0,142	0,140	0,28	0,32	0,00159	0,00207	7,0	7,1
1600	86,27	86,35	0,147	0,145	0,21	0,25	0,00093	0,00135	6,8	6,9
2000	85,94	86,11	0,137	0,135	0,24	0,30	0,00112	0,00159	7,3	7,4
2500	84,19	84,43	0,091	0,090	0,29	0,29	0,00069	0,00069	10,9	11,1
3150	83,05	83,07	0,070	0,069	0,29	0,30	0,00043	0,00042	14,2	14,5
4000	82,96	82,75	0,069	0,068	0,43	0,44	0,00086	0,00088	14,5	14,8
5000	81,73	81,61	0,052	0,051	0,33	0,31	0,00029	0,00025	19,3	19,6
6300	79,75	79,65	0,033	0,032	0,30	0,31	0,00010	0,00010	30,5	31,0
8000	76,31	76,17	0,015	0,015	0,31	0,34	0,00002	0,00002	67,1	68,2
10000	70,84	70,51	0,004	0,004	1,04	1,04	0,00002	0,00002	236,5	240,4
$u_c(L_{WA})$ [dB(A)]							0,084	0,093		
$U(L_{WA})$ [dB(A)]							0,17	0,19	k=2,0	

As estimativas de incertezas dos valores globais L_{WA} em dB(A) tiveram aumento relativo desde a primeira bateria de ensaios, a qual resultou em $U(L_{WA})$ de 0,15 dB(A). Na

segunda bateria resultou¹⁰⁷ em $U(L_{WA}) = 0,17 \text{ dB(A)}$, e $U(L_{WA})$ estimados em 0,17 e 0,19 dB(A), nesta que é a terceira bateria de ensaios realizada na câmara reverberante de 193 m^3 .

A deriva inerente ao calibrador de nível sonoro, utilizado para o ajuste da escala do analisador de sinais, foi incluída na estimativa de incerteza de forma sistemática, ou seja, através de soma algébrica. A estimativa da deriva (*Deriva_cal*) foi somada a cada valor de incerteza expandida, $U(L_{WA})$ da Tabela 4.19, para encontrar as “estimativas finais” de incerteza das medições de nível de potência sonora global aqui denominada de $U_{1_{(LWA)Total}}$ e $U_{2_{(LWA)Total}}$.

$$U_{1_{(LWA)Total}} = U_{1c(LWA)} + \textit{Deriva_cal} = 0,17 + 0,10 = 0,27 \text{ dB(A)}$$

$$U_{2_{(LWA)Total}} = U_{2c(LWA)} + \textit{Deriva_cal} = 0,19 + 0,10 = 0,29 \text{ dB(A)}$$

Desta forma, pode-se atribuir dois resultados a esta bateria de ensaios com a fonte sonora BK 4204; câmara de 193 m^3 do LVA-UFSC. Níveis de potência sonora globais estimados em: $L_{WA_1} = 94,58 \pm 0,27 \text{ dB(A)}$ e $L_{WA_2} = 94,65 \pm 0,29 \text{ dB(A)}$, considerando a faixa de frequência de 100 Hz a 10 kHz e intervalo de confiança de aproximadamente 95 %.

As contribuições das fontes de incertezas¹⁰⁸ foram plotadas em gráficos de barras, nas figuras 33 e 34, onde se pode observar as predominâncias das grandezas representadas por “ $u2Lp(Lw)$ ”, “ $u2Trev(Lw)$ ”, “ $cj2*u2Lp(Lw)$ ” e “ $cj2*u2Trev(Lw)$ ” que são as incertezas padrão elevadas ao quadrado dos L_p e T_{rev} ; sem e com ponderação dos respectivos coeficientes de sensibilidade c_j .

As medições de níveis de pressão sonora foram executadas simultaneamente e em posições de microfones distintas dentro da câmara reverberante, por isso, as incertezas calculadas diferem; como se pode observar nos gráficos das figuras 33 e 34. Este tipo de diferença entre estimativas de incertezas é chamada de “incerteza da incerteza” no caso de estimativas “Tipo A”¹⁰⁹; expressão citada pelo ISO GUIA ao se referir a qualidade dos diferentes métodos de estimar incertezas, “Tipo A” e “Tipo B”. De qualquer maneira, os gráficos de barras das figuras 33 e 34 demonstram que há boa concordância entre os perfis das contribuições de incertezas apresentados no caso de medições de L_p efetuadas em dois canais.

¹⁰⁷ Incertezas expandidas sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro.

¹⁰⁸ Valores ao quadrado; em dB^2 .

¹⁰⁹ Método de obtenção de estimativas de incertezas através de observações de resultados experimentais.

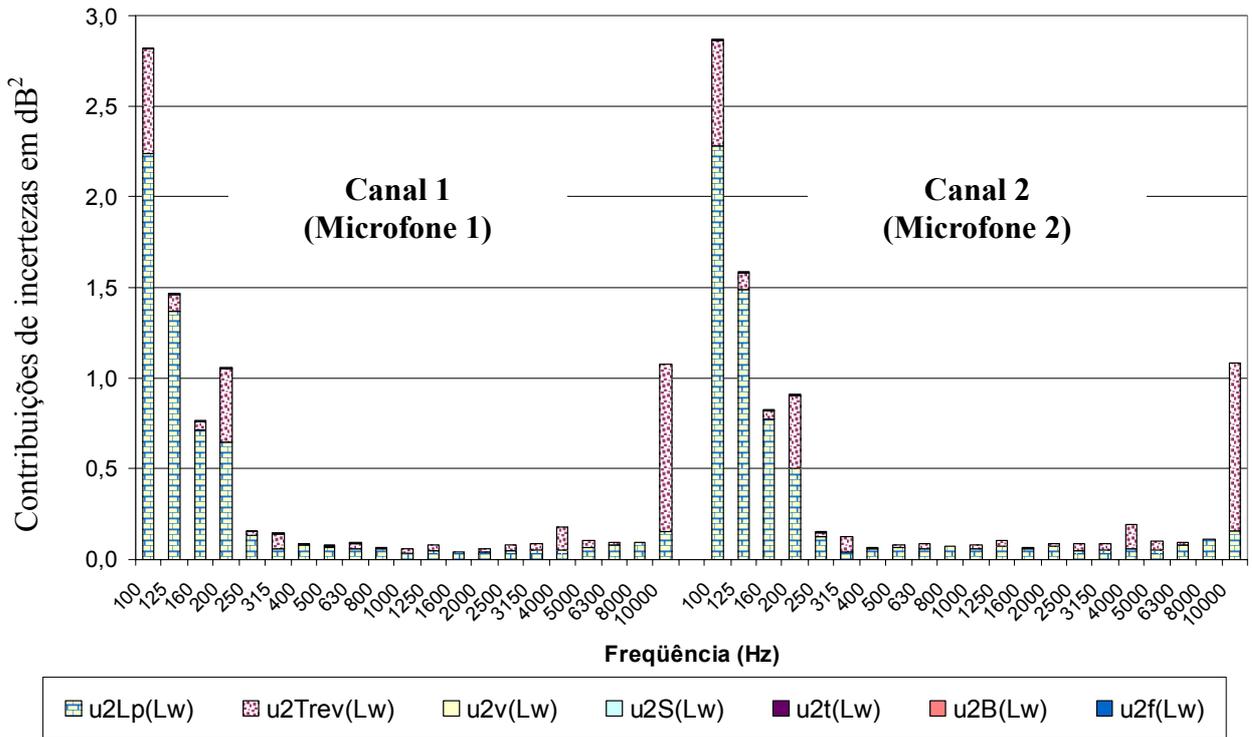


Figura 32 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para cada banda de terço de oitava. Microfones 1 e 2. Fonte sonora **BK 4204** ensaiada na câmara de $193\ m^3$ (3ª bateria de ensaios), LVA-UFSC **agosto 2005**.

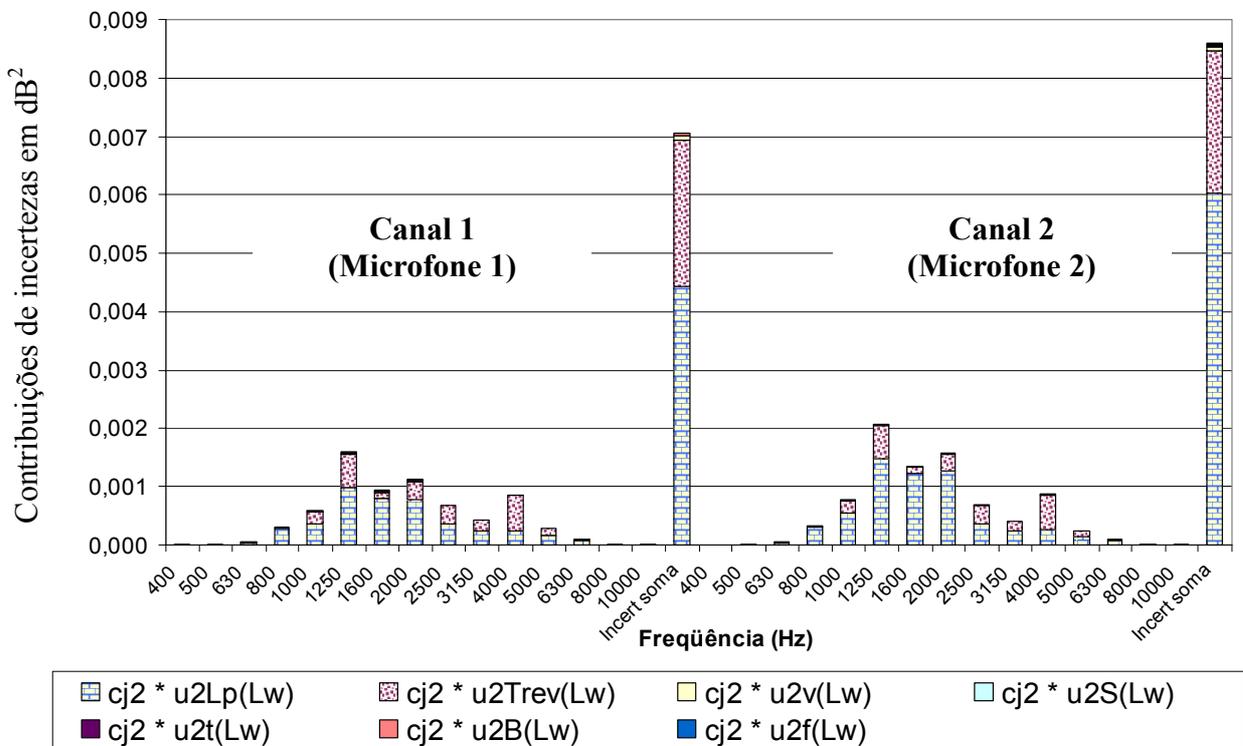


Figura 33 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza dos dois níveis de potência sonora global em $dB(A)$. Microfones 1 e 2, (dois canais de medição). Fonte sonora **BK 4204** sob teste na câmara reverberante de $193\ m^3$ (3ª bateria de ensaios), LVA-UFSC, **agosto 2005**.

4.1.3.4 Quarta bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204, câmara de 193 m³

A quarta e última bateria de ensaios com a fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m³ no contexto deste trabalho foi realizada em novembro de 2005. Novamente os resultados obtidos experimentalmente foram concordantes em comparação com as baterias de ensaios anteriores. Também houve concordância entre os valores de incerteza expandida¹¹⁰ estimada em 0,17 dB(A) para o nível de potência sonora global; ver Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A). Incertezas expandidas $U_{95\%}$ estimadas para os L_W em dB. Fonte sonora **BK 4204** ensaiada na câmara reverberante de 193 m³ (4ª bateria de ensaios) LVA-UFSC. **Novembro** de 2005.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
L_{WF} em dB	75,49	76,40	77,99	78,24	79,98	80,07	79,95	79,82	80,66	83,47	84,70
L_{WA} dB(A)	56,39	60,30	64,59	67,34	71,38	73,47	75,15	76,62	78,76	82,67	84,70
$U_{95\%}$ dB	3,37	2,85	1,88	2,51	1,18	1,31	0,67	0,85	0,42	0,53	0,47
Frequência (Hz)	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	Global
L_{WF} em dB	85,58	85,08	84,43	82,86	81,12	81,16	80,14	78,36	75,74	71,86	94,59 ± 0,18
L_{WA} dB(A)	86,18	86,08	85,63	84,16	82,32	82,16	80,64	78,26	74,64	69,36	94,28 ± 0,17
$U_{95\%}$ dB	0,54	0,46	0,46	0,55	0,52	0,53	0,55	0,60	1,23	5,18	
Incerteza $U_{95\%}$ ou $U(L_{WA})$ sem considerar a estimativa de deriva do calibrador de nível sonoro.											
Volume da câmara: $V = 192,67 \text{ m}^3$, superfície: $S = 208,11 \text{ m}^2$, temperatura: $\theta = 24,6 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão atmosférica: $B = 1,012 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.											
Foram usados os tempos de reverberação T_{20} para obter estes níveis de potência sonora.											

As incertezas expandidas estimadas nas baterias de ensaios anteriores: 0,15 dB(A), 0,17 dB(A), 0,17 dB(A), e 0,19 dB(A), e a estimada nesta última 0,17 dB(A) vem a demonstrar boa concordância entre as baterias de testes experimentais na câmara reverberante de 193 m³. Em outras palavras, as dispersões dos resultados experimentais apresentaram estabilidade razoável, pelo menos se tratando da incerteza global $U(L_{WA})$, apesar do tempo decorrido entre os ensaios; vários meses durante o ano de 2005.

Os desvios padrão experimentais obtidos nas medições de L_p , nas bandas de 1250 a 2000 Hz variaram entre 0,10 e 0,15 dB, ver Tabela 4.21. Em comparação com a bateria de ensaios anterior, terceira bateria, os desvios padrão encontrados nas mesmas bandas de terço de oitava resultaram na faixa de 0,09 a 0,21 dB; sendo que estes últimos foram obtidos em medições com dois microfones (dois canais do analisador de sinais) simultaneamente¹¹¹. Estas diferenças de ordem de grandeza dos desvios padrão de L_p obtidos experimentalmente têm influência significativa sobre o resultado final das estimativas de incertezas dos níveis de

¹¹⁰ Valor sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro. $U_{95\%}$ ou $U(L_{WA})$.

¹¹¹ Tabela 4.17 na Subseção 4.1.3.3.

potência sonora, por bandas de terço de oitava e valor global em dB(A). As equações utilizadas para calcular as estimativas u_{Lp} dadas na Tabela 4.21 estão na Subseção 4.1.3.1.2, Equações 4.21, 4.22 e 4.23.

Tabela 4.21 - Incertezas padrão u_{Lp} calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , câmara de 193 m³ do LVA-UFSC, (4ª bateria de ensaios) fonte sonora BK 4204, novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)	u_{ccm} (dB)	$X_{Lp_aleatório}$ (dB)	c_1	d_{Lp}	$u_{Lp}(L_w)$ [dB]
100	1,64	0,172	1,65	1,0	1,0	1,65
125	1,31	0,172	1,32	1,0	1,0	1,32
160	0,55	0,172	0,58	1,0	1,0	0,58
200	1,11	0,172	1,12	1,0	1,0	1,12
250	0,35	0,172	0,39	1,0	1,0	0,39
315	0,51	0,172	0,54	1,0	1,0	0,54
400	0,23	0,172	0,29	1,0	1,0	0,29
500	0,20	0,172	0,26	1,0	1,0	0,26
630	0,08	0,172	0,19	1,0	1,0	0,19
800	0,16	0,172	0,24	1,0	1,0	0,24
1000	0,12	0,172	0,21	1,0	1,0	0,21
1250	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23
1600	0,10	0,172	0,20	1,0	1,0	0,20
2000	0,13	0,172	0,22	1,0	1,0	0,22
2500	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23
3150	0,17	0,172	0,24	1,0	1,0	0,24
4000	0,19	0,172	0,26	1,0	1,0	0,26
5000	0,20	0,172	0,26	1,0	1,0	0,26
6300	0,19	0,215	0,29	1,0	1,0	0,29
8000	0,27	0,215	0,35	1,0	1,0	0,35
10000	0,38	0,215	0,44	1,0	1,0	0,44

Medições de L_p com seis posições de microfone e uma posição de fonte sonora. Desvios padrão de seis amostras.

Na Tabela 4.22 são apresentados os tempos de reverberação T_{rev} medidos através do método da interrupção do ruído nesta quarta bateria de ensaios, além das respectivas estimativas de incertezas. As estimativas de incertezas padrão dos tempos de reverberação u_{Trev} foram calculadas através das Equações 4.24 e 4.25 da Subseção 4.1.3.1.2.

Comparando-se as incertezas padrão u_{Trev} especificamente nas bandas de 1000 a 2500 Hz obtidas na bateria de ensaios anterior, julho de 2005, com os respectivos valores de u_{Trev} obtidos nesta bateria de ensaios, concluí-se que os valores têm ordem de grandeza similar. No ensaio anterior os valores ficaram entre 0,07 e 0,19 dB nas bandas de 1000 a 2500 Hz, enquanto que neste ensaio ocorreram u_{Trev} de 0,08 a 0,15 dB nas respectivas bandas de terço de oitava, ver Tabela 4.22 e Tabela 4.13 na Subseção 4.1.3.2.

Como se pode notar através dos valores acentuados das incertezas de tempos de reverberação nas bandas de 8 e 10 kHz, mostrados na Tabela 4.22, ocorreram erros de avaliação de curvas de decaimentos. Os respectivos valores foram mantidos com objetivo de verificar qual seria a extensão da influência sobre o resultado final da estimativa de incerteza.

Tabela 4.22 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m³ do LVA-UFSC (4ª bateria de ensaios), **novembro** de 2005. As estimativas de incertezas $X_{T_{rev}}$ foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor $d_{T_{rev}}$ e incertezas padrão combinada $u_{T_{rev}}(L_W)$.

Frequência central (Hz)	T_{rev} (s) *	$X_{T_{rev}}$ (s)	c_2 (dB/s)	$d_{T_{rev}}$	$u_{T_{rev}}(L_W)$ [dB]
100	10,47	0,81	-0,42	1,0	0,34
125	9,97	1,22	-0,44	1,0	0,54
160	8,53	1,43	-0,52	1,0	0,74
200	6,90	0,87	-0,64	1,0	0,56
250	6,77	0,67	-0,66	1,0	0,44
315	6,12	0,50	-0,73	1,0	0,36
400	7,02	0,26	-0,63	1,0	0,16
500	7,83	0,59	-0,56	1,0	0,33
630	7,82	0,15	-0,57	1,0	0,08
800	7,53	0,20	-0,59	1,0	0,12
1000	7,21	0,16	-0,61	1,0	0,10
1250	6,83	0,21	-0,65	1,0	0,13
1600	6,52	0,16	-0,68	1,0	0,11
2000	5,95	0,10	-0,75	1,0	0,08
2500	5,17	0,17	-0,86	1,0	0,15
3150	4,56	0,09	-0,98	1,0	0,09
4000	3,90	0,05	-1,16	1,0	0,05
5000	3,31	0,06	-1,37	1,0	0,08
6300	2,64	0,05	-1,74	1,0	0,09
8000	2,13	0,23	-2,18	1,0	0,51
10000	2,04	1,12	-2,28	1,0	2,55

* T_{rev} são os tempos de reverberação T_{20} .

Medições de T_{rev} com 3 posições de microfone e 2 de fonte sonora; com 5 decaimentos em cada posição. Total de 30 decaimentos. Médias e desvios padrão de 6 amostras.

As incertezas padrão combinadas $u_c(L_W)$ apresentadas na Tabela 4.23 foram calculadas através da Equação 4.14 da Subseção 4.1.3.1.3. Ao se analisar especificamente os valores de $u_c(L_W)$ nas bandas de 1000 a 2500 Hz, nota-se que eles têm praticamente a mesma ordem de grandeza; entre 0,23 e 0,27 dB.

A predominância das contribuições de incertezas é atribuída às medições de níveis de pressão sonora (incertezas padrão u_{L_p} em dB) nas bandas de terço de oitava de 80 Hz a 6300 Hz. Nas bandas de 8 e 10 kHz as incertezas atribuídas aos tempos de reverberação predominam sobre as demais; isto é devido à erros de avaliações de curvas de decaimentos que foram mantidos propositalmente. Ver Tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 sob teste, câmara de 193 m³ LVA-UFSC (4ª bateria de ensaios), **novembro** de 2005.

Frequência central (Hz)	$u_{Lp}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_i(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_f(L_W)$ [dB]	$u_c(L_W)$ [dB]	$U(L_W)$ [dB]
100	1,65	0,34	0,018	0,005	0,015	0,019	0,080	1,68	3,37
125	1,32	0,54	0,019	0,005	0,015	0,019	0,068	1,43	2,85
160	0,58	0,74	0,020	0,004	0,014	0,019	0,062	0,94	1,88
200	1,12	0,56	0,021	0,003	0,014	0,019	0,047	1,26	2,51
250	0,39	0,44	0,022	0,002	0,014	0,019	0,039	0,59	1,18
315	0,54	0,36	0,023	0,002	0,014	0,019	0,033	0,65	1,31
400	0,29	0,16	0,024	0,001	0,013	0,019	0,028	0,33	0,67
500	0,26	0,33	0,024	0,001	0,013	0,019	0,021	0,42	0,85
630	0,19	0,08	0,024	0,001	0,013	0,019	0,018	0,21	0,42
800	0,24	0,12	0,025	0,001	0,013	0,019	0,015	0,27	0,53
1000	0,21	0,10	0,025	0,000	0,013	0,019	0,011	0,24	0,47
1250	0,23	0,13	0,025	0,000	0,013	0,019	0,009	0,27	0,54
1600	0,20	0,11	0,026	0,000	0,013	0,019	0,008	0,23	0,46
2000	0,22	0,08	0,026	0,000	0,013	0,019	0,006	0,23	0,46
2500	0,23	0,15	0,026	0,000	0,013	0,019	0,005	0,27	0,55
3150	0,24	0,09	0,026	0,000	0,012	0,019	0,004	0,26	0,52
4000	0,26	0,05	0,026	0,000	0,012	0,019	0,003	0,26	0,53
5000	0,26	0,08	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,28	0,55
6300	0,29	0,09	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,30	0,60
8000	0,35	0,51	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,62	1,23
10000	0,44	2,55	0,027	0,001	0,012	0,019	0,001	2,59	5,18

Da mesma forma que foi feito para as baterias de ensaios anteriores, a incerteza combinada, $u_c(L_{WA})$, relativa ao nível de potência sonora global em dB(A) foi calculada através das Equações 4.36 e 4.37 da Subseção 4.1.3.1.3. Nota-se através dos valores do indicador “ $1/c_j$ ” e de $(c_j u_c)^2$ que as maiores contribuições de incertezas estão na faixa entre 1000 e 2500 Hz, além de bandas adjacentes que contribuem com valores menos significativos na combinação de incertezas, a qual produz $u_c(L_{WA})$.

A incerteza expandida com fator de abrangência $k = 2,0$ resultou em 0,163 dB que foi arredondado para cima com duas casas decimais, produzindo $U(L_{WA}) = 0,17$ dB(A). Portanto, considerando-se a deriva do calibrador sonoro (devida a efeito sistemático) com valor 0,1 dB, o resultado desta quarta bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m³ (nominal) é $L_{WA} = 94,28 \pm 0,27$ dB(A) com nível de confiança de aproximadamente 95%. Sendo que este último valor de incerteza foi obtido através da soma algébrica de $U(L_{WA})$ e a estimativa da deriva do calibrador.

Tabela 4.24 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 193 m³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora **BK 4204** sob teste (4ª bateria de ensaios), **novembro 2005**.

Frequência central (Hz)	Ponderação curva "A" (dB)	L _{wj} dB	c _j	u _c (L _{wj}) (dB)	c _j u _c (dB)	(c _j u _c) ² (dB) ²	1 / c _j
100	-19,1	75,49	0,000	1,68	0,000	0,0000	6162,5
125	-16,1	76,40	0,000	1,43	0,001	0,0000	2500,5
160	-13,4	77,99	0,001	0,94	0,001	0,0000	932,0
200	-10,9	78,24	0,002	1,26	0,003	0,0000	494,5
250	-8,6	79,98	0,005	0,59	0,003	0,0000	195,1
315	-6,6	80,07	0,008	0,65	0,005	0,0000	120,6
400	-4,8	79,95	0,012	0,33	0,004	0,0000	82,0
500	-3,2	79,82	0,017	0,42	0,007	0,0001	58,4
630	-1,9	80,66	0,028	0,21	0,006	0,0000	35,7
800	-0,8	83,47	0,069	0,27	0,018	0,0003	14,5
1000	0	84,70	0,110	0,24	0,026	0,0007	9,1
1250	0,6	85,58	0,155	0,27	0,042	0,0017	6,5
1600	1	85,08	0,151	0,23	0,035	0,0012	6,6
2000	1,2	84,43	0,136	0,23	0,032	0,0010	7,3
2500	1,3	82,86	0,097	0,27	0,027	0,0007	10,3
3150	1,2	81,12	0,064	0,26	0,016	0,0003	15,7
4000	1	81,16	0,061	0,26	0,016	0,0003	16,3
5000	0,5	80,14	0,043	0,28	0,012	0,0001	23,1
6300	-0,1	78,36	0,025	0,30	0,008	0,0001	40,0
8000	-1,1	75,74	0,011	0,62	0,007	0,0000	92,2
10000	-2,5	71,86	0,003	2,59	0,008	0,0001	310,5
				u _c (L _{WA})		U(L _{WA})	
Global				0,082		0,17	
				dB(A)		dB(A)	
				k = 2,0			

O gráfico de barras na Figura 34 mostra amplitudes das contribuições de incertezas em cada banda de terço de oitava, de maneira individual. As contribuições de incertezas para a incerteza do nível de potência sonora global, ponderadas pelos¹¹² coeficientes de sensibilidade c_j, foram plotadas na Figura 35 através de gráfico de barras. Nota-se que houve um “impacto” quase imperceptível das contribuições de incertezas atribuídas às bandas de 8 e 10 kHz em relação ao valor de incerteza do nível global de potência sonora em dB(A), apesar dos erros grosseiros nas avaliações de decaimentos de tempos de reverberação. Isto pode ser percebido ao se compararem os gráficos da figuras 35 e 36; nas bandas de 8 e 10 kHz, com relação às contribuições de incertezas das outras bandas.

¹¹² Os coeficientes c_j foram calculados através da Equação 4.36 apresentada na Subseção 4.1.3.1.3.

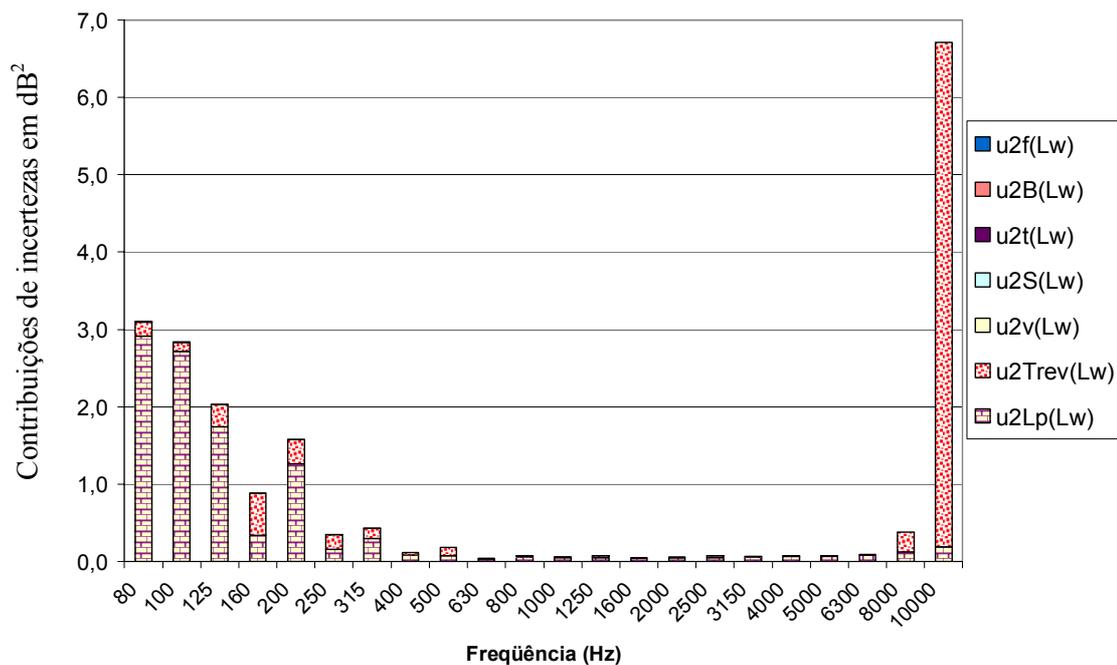


Figura 34 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para o nível de potência sonora de cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 (4ª bateria de ensaios) na câmara de 193 m^3 do LVA-UFSC, novembro 2005.

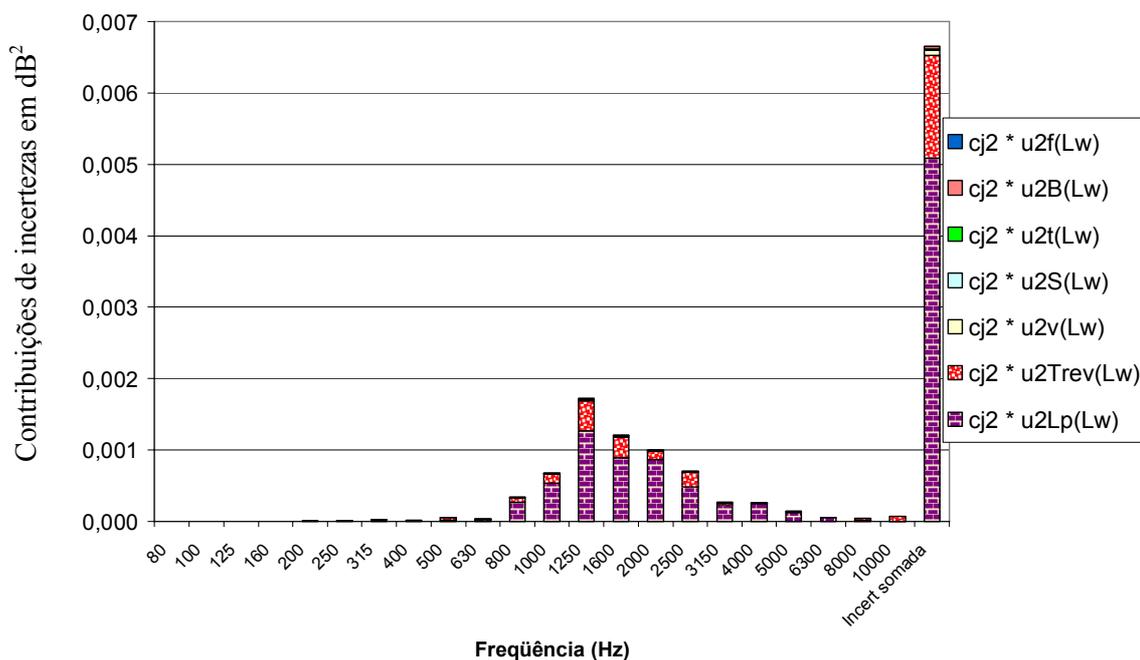


Figura 35 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A) . Fonte sonora BK 4204 sob teste (4ª bateria de ensaios) na câmara reverberante de 193 m^3 do LVA-UFSC, novembro 2005.

4.1.4 Resultados experimentais e incertezas de medição obtidos com a fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC

As características da câmara reverberante de 145 m³, que são o volume (V), a área das superfícies internas (S) e as estimativas de incertezas, foram dadas na Subseção 4.1.1.2. Foram realizadas duas baterias de ensaios, uma em agosto e outra em novembro de 2005. Os equipamentos utilizados nestas duas baterias de ensaios são os mesmos descritos na Subseção 4.1.1, os quais foram usados nos ensaios na câmara reverberante de 193 m³ nominal. Também foi realizado um ensaio de determinação de níveis de potência sonora em 2001, no contexto de uma disciplina de pós-graduação de engenharia mecânica, cujos resultados são apresentados na Subseção 4.1.8, porém os detalhes daquelas medições não estão disponíveis. Além disto, em 2001 a câmara de 145 m³ nominal não tinha portas na lateral (acesso entre as câmaras de 145 m³ e 193 m³) e o volume era ligeiramente menor. O que certamente muda os tempos de reverberação da câmara, sendo que as superfícies das portas metálicas têm absorção acústica diferente do concreto que havia antes da colocação das portas entre as câmaras reverberantes.

4.1.4.1 Primeira bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 145 m³

Esta primeira bateria de ensaios na câmara reverberante de 145 m³ com fonte sonora BK 4204 é reportada de forma similar aos resultados dados na Subseção 4.1.3.1 e suas subseções. Com detalhes da obtenção dos níveis de potência sonora (L_W), e incertezas de todos os parâmetros diretamente envolvidos na determinação dos L_W . Os ensaios de medições de tempos de reverberação e dos níveis de pressão sonora foram desenvolvidos em agosto de 2005.

4.1.4.1.1 A determinação de níveis de potência sonora na primeira bateria de ensaios

Os parâmetros TFS, FAA, FW e FCTP são as parcelas da equação de determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto¹¹³ da norma ISO 3741 de 1999. Na verdade as siglas foram atribuídas no contexto deste trabalho para fins de investigar e/ou detalhar os passos dos cálculos de determinação dos níveis de potência sonora L_W .

¹¹³ Ver Equações 4.4 e 4.16 na Subseção 4.1.3.1.1.

Os níveis de pressão sonora L_p foram medidos em dois canais simultaneamente e em posições aleatórias de microfones dentro da câmara reverberante; de forma similar ao procedimento adotado nas medições na câmara reverberante de 193 m³ em agosto de 2005. A partir disto foi possível calcular os níveis de potência sonora também em separado, como apresentado na Tabela 4.25. Além disto, os desvios padrão dos L_p , as estimativas de incertezas dos L_p e as incertezas por bandas de terço de oitava e valores globais de L_W puderam ser calculadas em relação aos dois canais de medição utilizados. Os respectivos valores encontram-se nas próximas subseções.

Tabela 4.25 - Parâmetros detalhando o cálculo de determinação dos níveis de potência sonora. Medições de L_p em dois canais distintos. Fonte sonora **BK 4204**, 1ª bateria de ensaios na câmara reverberante de 145 m³ (LVA-UFSC), agosto de 2005.

Frequência central (Hz)	A (m ²) Sabine	$\overline{L_p}$ mic 1 (canal 1) (dB)	$\overline{L_p}$ mic 2 (canal 2) (dB)	TFS (dB)	FAA (dB)	FW (dB)	FCTP (dB)	L_{WF} (1) dB	L_{WF} (2) dB	L_W (1) dB(A)	L_W (2) dB(A)
100	3,536	73,07	72,97	5,485	0,081	1,930	-0,349	74,22	74,12	55,12	55,02
125	3,299	75,84	75,46	5,183	0,076	1,607	-0,349	76,36	75,97	60,26	59,87
160	4,056	76,01	76,22	6,081	0,093	1,302	-0,349	77,14	77,34	63,74	63,94
200	3,725	77,57	78,09	5,711	0,086	1,071	-0,349	78,09	78,61	67,19	67,71
250	4,169	78,91	79,13	6,200	0,096	0,877	-0,349	79,73	79,96	71,13	71,36
315	4,919	77,67	77,93	6,919	0,113	0,710	-0,349	79,07	79,33	72,47	72,73
400	6,428	77,27	77,38	8,081	0,148	0,569	-0,349	79,72	79,83	74,92	75,03
500	6,267	77,51	77,73	7,971	0,144	0,461	-0,349	79,74	79,96	76,54	76,76
630	5,271	79,12	79,21	7,219	0,121	0,370	-0,349	80,49	80,57	78,59	78,67
800	4,626	82,65	82,76	6,652	0,106	0,294	-0,349	83,35	83,47	82,55	82,67
1000	4,258	84,09	84,11	6,292	0,098	0,236	-0,349	84,37	84,38	84,37	84,38
1250	4,487	84,83	85,04	6,519	0,103	0,190	-0,349	85,29	85,51	85,89	86,11
1600	4,839	84,12	84,31	6,847	0,111	0,149	-0,349	84,88	85,07	85,88	86,07
2000	5,414	83,20	83,40	7,335	0,125	0,120	-0,349	84,44	84,63	85,64	85,83
2500	6,167	80,89	81,18	7,901	0,142	0,096	-0,349	82,68	82,97	83,98	84,27
3150	7,504	78,83	78,96	8,753	0,173	0,076	-0,349	81,49	81,61	82,69	82,81
4000	9,094	78,13	78,00	9,587	0,209	0,060	-0,349	81,64	81,51	82,64	82,51
5000	11,571	76,08	76,04	10,634	0,266	0,048	-0,349	80,68	80,64	81,18	81,14
6300	14,015	73,29	73,14	11,466	0,323	0,038	-0,349	78,77	78,62	78,67	78,52
8000	20,665	69,86	69,67	13,152	0,476	0,030	-0,349	77,17	76,98	76,07	75,88
10000	28,400	65,86	65,52	14,533	0,654	0,024	-0,349	74,72	74,39	72,22	71,89
Global								94,51	94,64	94,26	94,38

Volume da câmara: $V = 145,09 \text{ m}^3$, superfície: $S = 188,54 \text{ m}^2$, temperatura: $\theta = 22,2 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão atmosférica: $B = 1,019 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Valores médios aproximados.

Foram usados os tempos de reverberação T_{20} para obter estes níveis de potência sonora.

Medições de L_p : 3 posições de fonte sonora, 5 posições de cada um dos dois microfones; sendo 15 amostras para cada canal de medição (cada microfone).

Medições de T_{rev} (T_{20}): 2 posições de fonte e 4 de microfones, com 5 decaimentos em cada posição. Médias e desvios padrão de 8 amostras. Total de 40 decaimentos.

Semelhantemente aos resultados experimentais reportados nas subseções anteriores, relativos à fonte BK 4204 na câmara reverberante de 193 m³, as bandas de terço de oitava que obtiveram os valores mais elevados de níveis de potência sonora em dB(A) foram as

de 1250 a 2000 Hz. Estas bandas de frequência foram realçadas na Tabela 4.25 e nas tabelas seguintes devido aos elevados L_W .

As diferenças entre os dois canais (microfones 1 e 2) com relação aos valores médios¹¹⁴ de L_p , nas bandas de 1000 a 2500 Hz, variaram entre 0,02 dB e 0,29 dB. E, devido à natureza do cálculo de determinação de níveis de potência sonora, os L_W em dB e também os L_W em dB(A) seguem as mesmas diferenças¹¹⁵ entre os dois canais de medição que ocorreram nos valores de L_p . As bandas de terço de oitava que apresentaram maior grau de concordância foram 1000 e 5000 Hz, com diferenças de L_p entre os dois canais de medição de 0,02 e 0,04 dB; ver Tabela 4.25. Apesar destas pequenas diferenças entre as médias energéticas das medições em dois canais, nota-se que os desvios padrão de L_p nas bandas de 1000 e 5000 Hz são da ordem de 0,12 a 0,21 dB, valores que dizem respeito às dispersões das amostras dos valores medidos; ver Tabela 4.26 na Subseção 4.1.4.1.2. Portanto, a concordância entre os valores médios de L_p não significa que as dispersões serão igualmente pequenas.

4.1.4.1.2 Detalhamento das estimativas das fontes de incertezas

A seguir, os parâmetros de entrada L_p , T_{rev} , V , S , θ , f , e B são avaliados, e apresentados com detalhes de valores intermediários dos cálculos. Com relação às incertezas padrão dos níveis de pressão sonora $u_{Lp}(L_W)$, nota-se que há diferenças entre as incertezas dadas em ambos os canais na Tabela 4.26. As diferenças entre os desvios padrão de L_p nos dois canais de medição são maiores que as diferenças entre os respectivos $u_{Lp}(L_W)$ em dB. Isto é devido à combinação de incertezas com o parâmetro u_{ccm} . A combinação de incertezas para obter $X_{Lp_aleatório}$ e conseqüentemente $u_{Lp}(L_W)$ é dada através da Equação 4.22 na Subseção 4.1.3.1.2. O cálculo de $u_{Lp}(L_W)$, também denominado u_{Lp} , é dado pela Equação 4.21 na Subseção 4.1.3.1.2. De fato, houve coincidências de valores entre os $u_{Lp}(L_W)$ dos dois canais de medição em algumas bandas de terço de oitavas, tais como: 630, 4000 e 6300 Hz, entretanto, as demais bandas apresentaram estimativas incertezas experimentais diferentes entre os canais de medição.

Ao se comparar a ordem de grandeza dos desvios padrão de L_p , especificamente nas bandas de 1000 a 2500 Hz, entre os resultados dos ensaios realizados em agosto de 2005 nas câmaras reverberantes de 145 e 193 m³, Tabela 4.26 e Tabela 4.17 na Subseção 4.1.3.3, nota-se que os desvios de maneira geral ficaram entre 0,08 e 0,21 dB. Além disto, pode-se observar que em ambos os ensaios os desvios padrão de L_p em algumas bandas apresentaram diferenças entre

¹¹⁴ Média energética de L_p representada pelo símbolo $\overline{L_p}$. E é calculada através da Equação 4.1, Subseção 4.1.1.

¹¹⁵ Exceto em alguns casos devido ao arredondamento em duas casas decimais. Isto porque os valores originais foram calculados em planilha com mais de duas casas decimais.

os dois canais que são o dobro ou quase o dobro do valor em dB. Ou seja, o dobro da dispersão dos valores experimentais de um microfone para o outro no mesmo ensaio; com medições simultâneas. Isto mostra que o “comportamento acústico” das duas câmaras reverberantes é similar, pelo menos no parâmetro relacionado com as dispersões dos níveis de pressão sonora medidos em posições aleatórias de microfone(s) e fonte sonora. Sendo assim, a “incerteza da incerteza” que se refere às diferenças entre estimativas de incertezas “Tipo A” é um fator importante, e não deve ser desprezado neste tipo de investigação experimental na área de acústica.

Tabela 4.26 - Incertezas padrão u_{L_p} calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , medidos em duas posições de microfones, (dois canais). Câmara de 145 m³ do LVA-UFSC, fonte sonora **BK 4204**, agosto 2005.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)		u_{ccm} (dB)	$X_{L_p, \text{aleatório}}$ (dB)		c_1	d_{L_p}	$u_{L_p}(L_w)$ [dB]	
	Canal 1	Canal 2		Canal 1	Canal 2			Canal 1	Canal 2
100	1,38	1,03	0,172	1,39	1,04	1,0	1,0	1,39	1,04
125	1,47	0,60	0,172	1,48	0,62	1,0	1,0	1,48	0,62
160	1,27	1,19	0,172	1,28	1,20	1,0	1,0	1,28	1,20
200	0,70	0,52	0,172	0,73	0,55	1,0	1,0	0,73	0,55
250	0,41	0,48	0,172	0,44	0,51	1,0	1,0	0,44	0,51
315	0,21	0,29	0,172	0,28	0,33	1,0	1,0	0,28	0,33
400	0,43	0,17	0,172	0,46	0,24	1,0	1,0	0,46	0,24
500	0,35	0,33	0,172	0,39	0,37	1,0	1,0	0,39	0,37
630	0,22	0,25	0,172	0,28	0,30	1,0	1,0	0,28	0,30
800	0,30	0,29	0,172	0,34	0,34	1,0	1,0	0,34	0,34
1000	0,21	0,12	0,172	0,27	0,21	1,0	1,0	0,27	0,21
1250	0,15	0,10	0,172	0,23	0,20	1,0	1,0	0,23	0,20
1600	0,12	0,09	0,172	0,21	0,19	1,0	1,0	0,21	0,19
2000	0,09	0,09	0,172	0,19	0,20	1,0	1,0	0,19	0,20
2500	0,10	0,15	0,172	0,20	0,23	1,0	1,0	0,20	0,23
3150	0,09	0,11	0,172	0,19	0,21	1,0	1,0	0,19	0,21
4000	0,09	0,08	0,172	0,19	0,19	1,0	1,0	0,19	0,19
5000	0,14	0,11	0,172	0,22	0,20	1,0	1,0	0,22	0,20
6300	0,14	0,14	0,215	0,26	0,26	1,0	1,0	0,26	0,26
8000	0,20	0,21	0,215	0,29	0,30	1,0	1,0	0,29	0,30
10000	0,22	0,30	0,215	0,31	0,37	1,0	1,0	0,31	0,37

Medições de L_p : 3 posições de fonte sonora, 5 posições de cada um dos dois microfones; sendo 15 amostras para cada canal de medição (cada microfone).

Com relação às incertezas estimadas para os tempos de reverberação, $X_{T_{rev}}$, os valores variaram de 0,03 a 0,60 segundo nas bandas entre 100 Hz e 10 kHz; estes valores foram estimados através de desvios padrão experimentais. E correspondem a incertezas padrão $u_{T_{rev}}(L_w)$ de 0,14, 0,18 e 0,40 dB, ver Tabela 4.27. O menor valor de incerteza padrão $u_{T_{rev}}(L_w)$ ocorreu em 4000 Hz; 0,07 dB, e o maior ocorreu na banda de 250 Hz; 0,44 dB. Especificamente nas bandas de 1000 a 2500 Hz, os desvios padrão (dados por $X_{T_{rev}}$) variaram entre 0,11 e 0,22 segundo, e as incertezas padrão $u_{T_{rev}}(L_w)$ variaram entre 0,12 e 0,19 dB, mas não há correspondência direta entre estes valores mínimos e máximos. Isto é devido a conversão dos

valores em segundo para decibéis feita através dos coeficientes de sensibilidade c_2 , que apresentam variação significativa em função das bandas de frequências; ver Tabela 4.27.

A Equação 4.43, rerepresentada a seguir, mostra que o valor do tempo de reverberação T_{rev} atribuído a determinada banda de terço de oitava tem grande influência sobre o valor do coeficiente de sensibilidade c_2 . As incertezas padrão $u_{T_{rev}}$ ou $u_{T_{rev}}(L_W)$ foram calculadas através da Equação 4.29 na Subseção 4.1.3.1.2.

$$c_2 = \frac{\partial L_W}{\partial T_{rev}} = \frac{-4,3429}{T_{rev}} - \frac{11,96V}{T_{rev}^2 S \sqrt{273 + \theta}} \quad \text{em dB/s} \quad (4.43)$$

Tabela 4.27 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 145 m³ do LVA-UFSC em **agosto** de 2005. As estimativas de incertezas $X_{T_{rev}}$ foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor $d_{T_{rev}}$ e incertezas padrão combinadas $u_{T_{rev}}(L_W)$.

Frequência central (Hz)	T_{rev} (s) *	$X_{T_{rev}}$ (s)	c_2 (dB/s)	$d_{T_{rev}}$	$u_{T_{rev}}(L_W)$ [dB]
100	6,58	0,60	-0,67	1,0	0,40
125	7,06	0,51	-0,63	1,0	0,32
160	5,74	0,52	-0,77	1,0	0,40
200	6,25	0,55	-0,71	1,0	0,39
250	5,58	0,55	-0,80	1,0	0,44
315	4,73	0,24	-0,94	1,0	0,23
400	3,62	0,16	-1,24	1,0	0,20
500	3,71	0,30	-1,21	1,0	0,36
630	4,42	0,20	-1,01	1,0	0,20
800	5,03	0,13	-0,88	1,0	0,11
1000	5,47	0,19	-0,81	1,0	0,16
1250	5,19	0,22	-0,86	1,0	0,19
1600	4,81	0,13	-0,93	1,0	0,12
2000	4,30	0,16	-1,04	1,0	0,16
2500	3,77	0,11	-1,19	1,0	0,14
3150	3,10	0,13	-1,46	1,0	0,18
4000	2,56	0,04	-1,78	1,0	0,07
5000	2,01	0,07	-2,29	1,0	0,17
6300	1,66	0,15	-2,81	1,0	0,41
8000	1,13	0,03	-4,28	1,0	0,14
10000	0,82	0,03	-6,10	1,0	0,18

* T_{rev} são os tempos de reverberação T_{20} .

Medições de T_{rev} (T_{20}): 2 posições de fonte e 4 de microfones, com 5 decaimentos em cada posição. Médias e desvios padrão de 8 amostras. Total de 40 decaimentos.

Na Tabela 4.27, na linha correspondente à banda de 6300 Hz, nota-se que as estimativas de incertezas, tanto $X_{T_{rev}}$ quanto $u_{T_{rev}}$, têm valores relativamente altos se comparados com as bandas adjacentes. De fato, as bandas de 8 e 10 kHz apresentaram problema de amostras ruins de T_{rev} , os quais foram contornados com eficácia ao se descartar algumas das amostras de T_{rev} . Porém na banda de 6300 Hz o problema não foi tão aparente quanto nas bandas de 8 e

10 kHz, de forma que não foi tomada providência para contornar qualquer eventual problema nas amostras experimentais.

Este tipo de problema é atribuído aos baixos níveis de pressão sonora de excitação da câmara reverberante nas bandas de altas frequências produzidos pela fonte sonora eletroacústica. No método de interrupção do ruído é requerido que o nível de pressão sonora seja elevado o suficiente para que a curva de decaimento possa ser avaliada corretamente; caso contrário, podem ocorrer avaliações de tempos de reverberação com variações indesejáveis. As avaliações das curvas de decaimentos foram feitas por processo automático através do software Pulse Labshop 9.0 e 10.0 de Brüel & Kjær.

Nas bandas de 8 e 10 kHz as amostras de T_{rev} julgadas incorretas foram descartadas. Desta forma os resultados correspondem aos esperados, nestas bandas de frequências. Isto foi feito com o objetivo de diminuir os altos desvios padrão que ocorreram e encontrar valores de T_{rev} aceitáveis. De fato, os desvios padrão se tornaram várias vezes menores com o descarte de determinadas amostras de T_{rev} , o que confirma a concordância entre os valores que foram mantidos como sendo as amostras “corretas”.

Foram calculadas as estimativas de incertezas relativas aos parâmetros volume, superfície, da câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC. Estas estimativas, os coeficientes de sensibilidade c_4 e c_5 , e as respectivas incertezas padrão em dB são apresentadas na Tabela 4.28.

Ao se compararem as incertezas padrão $u_V(L_W)$ e $u_S(L_W)$ obtidas nos cálculos referentes às câmaras de 145 m³ e a de 193 m³, ver Tabela 4.6 na Subseção 4.1.3.1.2 e Tabela 4.28, percebe-se que os valores calculados para a câmara de 145 m³ em geral são ligeiramente maiores que os calculados segundo os parâmetros da câmara de 193 m³. Mas, de um modo geral, as incertezas de ambas as câmaras seguem os mesmos padrões. Por exemplo, a incerteza padrão $u_S(L_W)$ na banda de 2000 Hz, tem valor estimado praticamente nulo; isto aconteceu nos resultados de ambas as câmaras reverberantes.

De qualquer maneira, as contribuições de incertezas em dB dadas por $u_V(L_W)$ e $u_S(L_W)$ são pouco significativas quando comparadas com as contribuições de incertezas de L_p e de T_{rev} . As influências inerentes às medições de volume e de área das superfícies da câmara de 145 m³ apresentaram valores relativamente insignificantes, semelhantemente à câmara reverberante de 193 m³ nominal do LVA-UFSC. Em outras palavras, as incertezas relativas ao volume e área da superfície das câmaras reverberantes produzem pouco efeito sobre a incerteza global dos níveis de potência sonora. Nas bandas de 1000 a 2500 Hz a incerteza padrão estimada

$u_V(L_W)$ varia relativamente muito pouco, entre 0,033 dB e 0,034 dB. Na faixa de frequências testada, bandas de terço de oitava de 100 Hz a 10 kHz, a variação das estimativas de incertezas padrão $u_V(L_W)$ está entre 0,021 dB e 0,039 dB, que são contribuições de incertezas pouco significativas se comparadas com as contribuições de incertezas atribuídas à L_p ou à T_{rev} .

Foi considerada a estimativa de incerteza de volume X_V dada na Subseção 4.1.1.2 que trata das medições dimensionais das câmaras reverberantes do LVA-UFSC, ver Tabela 4.28. Tanto a estimativa de incerteza de volume quanto a estimativa de incerteza de área de superfície são constantes, ou seja, não variam com a frequência; neste caso $X_V = 0,14 \text{ m}^3$ e $X_S = 0,84 \text{ m}^2$, Tabela 4.28.

Os coeficientes de sensibilidade relacionados ao volume (V) e área de superfície (S) da câmara reverberante de 145 m^3 nominal, c_3 e c_4 , são dados através das Equações 4.31 e 4.34 da Subseção 4.1.3.1.2, onde se encontram mais detalhes das etapas do cálculo de $u_V(L_W)$. As Equações 4.44 e 4.45 são rerepresentadas a seguir:

$$c_3 = \frac{\partial L_W}{\partial V} = \frac{4,3429}{V} + \frac{11,96}{T_{rev} S \sqrt{273 + \theta}} - \frac{10,883 \cdot S \sqrt{273 + \theta}}{(Vf + 2,506 \cdot S \cdot \sqrt{273 + \theta}) \cdot V} \quad \text{em dB/m}^3 \quad (4.44)$$

$$c_4 = \frac{\partial L_W}{\partial S} = \frac{-11,96V}{S^2 T_{rev} \sqrt{273 + \theta}} + \frac{10,883 \sqrt{273 + \theta}}{Vf + 2,506 \cdot S \cdot \sqrt{273 + \theta}} \quad \text{em dB/m}^2 \quad (4.45)$$

A estimativa de incerteza da temperatura X_t inclui a variação de temperatura ambiente e também o “erro” (ou tolerância) dada pelo fabricante do termo-higrômetro (MT-242) utilizado dentro da câmara reverberante. Sendo o valor $\pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ atribuído à X_t . As incertezas relativas às medições de **temperatura** (θ em $^\circ\text{C}$) e **frequências centrais das bandas de terço de oitavas** (f em Hz) são dadas na Tabela 4.29. Mais detalhes do equacionamento usado nos cálculos e do dimensionamento das estimativas de incertezas são dados na Subseção 4.1.3.1.2.

Tabela 4.28 - Estimativas de incertezas padrão relativas ao **volume** da câmara reverberante, u_v . E estimativas de incertezas padrão, u_s , relativas à área da superfície interna da câmara reverberante de 145 m³ nominal do LVA-UFSC.

Frequência central (Hz)	X_V (m ³)	c_3 (dB/m ³)	d_V	$u_v(L_w)$ [dB]	X_S (m ²)	c_4 (dB/m ²)	d_S	$u_s(L_w)$ [dB]
100	1,14	0,0198	1,0	0,023	0,86	0,0078	1,0	0,0067
125	1,14	0,0212	1,0	0,024	0,86	0,0067	1,0	0,0058
160	1,14	0,0228	1,0	0,026	0,86	0,0055	1,0	0,0047
200	1,14	0,0240	1,0	0,027	0,86	0,0046	1,0	0,0039
250	1,14	0,0251	1,0	0,029	0,86	0,0037	1,0	0,0032
315	1,14	0,0262	1,0	0,030	0,86	0,0029	1,0	0,0025
400	1,14	0,0273	1,0	0,031	0,86	0,0020	1,0	0,0018
500	1,14	0,0279	1,0	0,032	0,86	0,0016	1,0	0,0013
630	1,14	0,0283	1,0	0,032	0,86	0,0012	1,0	0,0011
800	1,14	0,0287	1,0	0,033	0,86	0,0009	1,0	0,0008
1000	1,14	0,0290	1,0	0,033	0,86	0,0007	1,0	0,0006
1250	1,14	0,0294	1,0	0,033	0,86	0,0004	1,0	0,0004
1600	1,14	0,0297	1,0	0,034	0,86	0,0002	1,0	0,0002
2000	1,14	0,0300	1,0	0,034	0,86	0,0000	1,0	0,0000
2500	1,14	0,0303	1,0	0,034	0,86	-0,0002	1,0	0,0002
3150	1,14	0,0306	1,0	0,035	0,86	-0,0005	1,0	0,0004
4000	1,14	0,0310	1,0	0,035	0,86	-0,0008	1,0	0,0007
5000	1,14	0,0314	1,0	0,036	0,86	-0,0012	1,0	0,0010
6300	1,14	0,0319	1,0	0,036	0,86	-0,0015	1,0	0,0013
8000	1,14	0,0330	1,0	0,038	0,86	-0,0024	1,0	0,0020
10000	1,14	0,0343	1,0	0,039	0,86	-0,0033	1,0	0,0029

Tabela 4.29 - Estimativas de Incertezas padrão relacionadas às variações de temperatura ambiente, estimadas em $\pm 2^\circ$ C, câmara reverberante de 145 m³ nominal do LVA-UFSC. E incertezas padrão estimadas (superestimadas) para as frequências centrais das bandas de terço de oitavas.

Frequência central (Hz)	X_t (°C)	c_5 (dB/°C)	d_t	$u_t(L_w)$ [dB]	X_f (Hz)	c_7 (dB/Hz)	d_f	$u_f(L_w)$ [dB]
100	2,0	0,0135	1,73	0,016	10,0	-0,01558	1,73	0,090
125	2,0	0,0132	1,73	0,015	12,5	-0,01074	1,73	0,078
160	2,0	0,0128	1,73	0,015	17,5	-0,00703	1,73	0,071
200	2,0	0,0125	1,73	0,014	20,0	-0,00475	1,73	0,055
250	2,0	0,0122	1,73	0,014	25	-0,00318	1,73	0,046
315	2,0	0,0120	1,73	0,014	33	-0,00208	1,73	0,039
400	2,0	0,0117	1,73	0,013	43	-0,00133	1,73	0,033
500	2,0	0,0115	1,73	0,013	50	-0,00087	1,73	0,025
630	2,0	0,0114	1,73	0,013	65	-0,00056	1,73	0,021
800	2,0	0,0113	1,73	0,013	85	-0,00035	1,73	0,017
1000	2,0	0,0113	1,73	0,013	100	-0,00023	1,73	0,013
1250	2,0	0,0112	1,73	0,013	125	-0,00015	1,73	0,011
1600	2,0	0,0111	1,73	0,013	175	-0,00009	1,73	0,009
2000	2,0	0,0110	1,73	0,013	200	-0,00006	1,73	0,007
2500	2,0	0,0110	1,73	0,013	250	-0,00004	1,73	0,005
3150	2,0	0,0109	1,73	0,013	325	-0,00002	1,73	0,005
4000	2,0	0,0108	1,73	0,012	425	-0,00001	1,73	0,004
5000	2,0	0,0107	1,73	0,012	500	-0,00001	1,73	0,003
6300	2,0	0,0106	1,73	0,012	650	-0,00001	1,73	0,002
8000	2,0	0,0103	1,73	0,012	850	0,00000	1,73	0,002
10000	2,0	0,0100	1,73	0,012	1000	0,00000	1,73	0,001

No dia das medições de níveis de pressão sonora (L_p) a pressão atmosférica foi estimada em $B = 1,019 \cdot 10^5$ Pa. Isto através de sites de institutos de pesquisas meteorológicas. E as variações foram estimadas em ± 300 Pa. A Equação 4.46 que determina o coeficiente de sensibilidade do nível de potência sonora em função da pressão atmosférica é rerepresentada a seguir¹¹⁶. A incerteza padrão atribuída à medição da pressão atmosférica $u_B(L_W)$, convertida em dB através do uso do coeficiente c_6 , foi inferior a 0,02 dB, sendo pouco significativa em comparação com as fontes de incertezas predominantes; L_p e T_{rev} . Ver Tabela 4.30.

$$c_6 = \frac{\partial L_W}{\partial B} = \frac{-10,857}{B} \quad (4.46)$$

Tabela 4.30 - Estimativa de incerteza padrão, u_B , (em dB), devido às variações da pressão atmosférica (pressão barométrica) em Pascal.

X_B (Pa)	c_6 (dB/Pa)	d_B	$u_B(L_W)$ [dB]
300	-0,000107	1,73	0,0185

4.1.4.1.3 Incertezas relativas ao nível de potência sonora global em dB(A)

As combinações de incertezas referente a cada banda de terço de oitava foram calculadas através da Equação 4.14 da Subseção 4.1.3.1.3, ou seja, a combinação de incerteza é dada pela raiz quadrada do “somatório quadrático” (a “soma geométrica”) dos valores referentes a cada fonte de incerteza e em cada banda de frequência. Como as medições dos níveis de pressão sonora, L_p , foram feitas e reportadas em dois canais diferentes (para fins de comparações), as combinações de incertezas também são referentes a cada um dos dois canais, ou seja, $u_c(L_W)$ do canal 1 e do canal 2; ver Tabela 4.31.

Na Tabela 4.31 é possível notar a predominância das incertezas padrão dos níveis de pressão sonora, u_{L_p} , e também nota-se as contribuições significativas das incertezas padrão dos tempos de reverberação, $u_{T_{rev}}$. Isto acontece em todas as bandas de frequência investigadas. Nas bandas de 1000 a 2500 Hz, por exemplo, as incertezas padrão u_{L_p} estão na faixa de 0,19 a 0,27 dB considerando ambos os canais, enquanto que os valores de $u_{T_{rev}}$ se encontram na faixa de 0,12 a 0,19 dB. Os valores de $u_c(L_{WA})$, que são os resultados da combinação das diversas fontes de incertezas, foram estimados na faixa de 0,23 a 0,32 dB, nas bandas de 1000 a 2500 Hz. Estes últimos são os que mais influenciam (contribuem para) a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A).

¹¹⁶ Esta equação também se encontra na Subseção 4.1.3.1.2.

Tabela 4.31 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Dois canais de medição de L_p . Câmara reverberante de 145 m³, fonte sonora BK 4204, agosto de 2005, LVA-UFSC.

Frequência central (Hz)	Canal 1 $u_{Lp}(L_W)$ [dB]	Canal 2 $u_{Lp}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_i(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_f(L_W)$ [dB]	Canal 1 $u_c(L_W)$ [dB]	Canal 2 $u_c(L_W)$ [dB]
100	1,39	1,04	0,40	0,023	0,007	0,016	0,018	0,090	1,45	1,12
125	1,48	0,62	0,32	0,024	0,006	0,015	0,018	0,078	1,52	0,71
160	1,28	1,20	0,40	0,026	0,005	0,015	0,018	0,071	1,35	1,27
200	0,73	0,55	0,39	0,027	0,004	0,014	0,018	0,055	0,83	0,67
250	0,44	0,51	0,44	0,029	0,003	0,014	0,018	0,046	0,62	0,67
315	0,28	0,33	0,23	0,030	0,002	0,014	0,018	0,039	0,36	0,41
400	0,46	0,24	0,20	0,031	0,002	0,013	0,018	0,033	0,51	0,32
500	0,39	0,37	0,36	0,032	0,001	0,013	0,018	0,025	0,54	0,52
630	0,28	0,30	0,20	0,032	0,001	0,013	0,018	0,021	0,35	0,36
800	0,34	0,34	0,11	0,033	0,001	0,013	0,018	0,017	0,37	0,36
1000	0,27	0,21	0,16	0,033	0,001	0,013	0,018	0,013	0,32	0,27
1250	0,23	0,20	0,19	0,033	0,000	0,013	0,018	0,011	0,30	0,28
1600	0,21	0,19	0,12	0,034	0,000	0,013	0,018	0,009	0,24	0,23
2000	0,19	0,20	0,16	0,034	0,000	0,013	0,018	0,007	0,26	0,26
2500	0,20	0,23	0,14	0,034	0,000	0,013	0,018	0,005	0,24	0,27
3150	0,19	0,21	0,18	0,035	0,000	0,013	0,018	0,005	0,27	0,28
4000	0,19	0,19	0,07	0,035	0,001	0,012	0,018	0,004	0,21	0,21
5000	0,22	0,20	0,17	0,036	0,001	0,012	0,018	0,003	0,28	0,27
6300	0,26	0,26	0,41	0,036	0,001	0,012	0,018	0,002	0,48	0,48
8000	0,29	0,30	0,14	0,038	0,002	0,012	0,018	0,002	0,33	0,33
10000	0,31	0,37	0,18	0,039	0,003	0,012	0,018	0,001	0,36	0,41

Alguns valores de parâmetros indicam a predominância das incertezas correspondentes às bandas de 1000 a 2500 Hz. Isto pode ser visto na Tabela 4.32, através do indicador “ $1/c_j$ ”, que varia de 6,8 a 10,7 nas bandas citadas. De fato, as contribuições de incertezas dadas por $(c_j u_c)^2$ são as mais elevadas nas bandas de 1000 a 2500 Hz e bandas adjacentes.

As incertezas expandidas $U(L_{WA})$, ou $U_{95\%}$, calculadas para esta bateria de ensaios na câmara reverberante de 145 m³, apresentaram boa concordância com as incertezas $U(L_{WA})$ encontradas segundo os parâmetros dos ensaios¹¹⁷ da câmara reverberante de 193 m³ do LVA-UFSC. Por exemplo, enquanto nesta bateria de ensaios (agosto 2005) na câmara de 145 m³ a incerteza expandida estimada para os níveis de potência sonora globais de ambos os canais resultaram em $U(L_{WA}) = 0,18$ dB(A), para a câmara de 193 m³ em julho e agosto de 2005 resultaram em 0,17 dB(A) e 0,19 dB(A), respectivamente.

¹¹⁷ Até esta etapa dos cálculos de incertezas não é considerada a deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro.

Tabela 4.32 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 145 m³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 sob teste; dois canais de microfones. **Agosto 2005.**

Frequência central (Hz)	L _{WA} dB(A)		c _j		u _c (L _w) (dB)		(c _j u _c) ² (dB ²)		1 / c _j	
	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2
100	55,12	55,02	0,000	0,000	1,45	1,12	0,00000	0,00000	8197,8	8637,0
125	60,26	59,87	0,000	0,000	1,52	0,71	0,00000	0,00000	2511,3	2821,8
160	63,74	63,94	0,001	0,001	1,35	1,27	0,00000	0,00000	1126,0	1105,3
200	67,19	67,71	0,002	0,002	0,83	0,67	0,00000	0,00000	509,0	464,0
250	71,13	71,36	0,005	0,005	0,62	0,67	0,00001	0,00001	205,2	200,6
315	72,47	72,73	0,007	0,007	0,36	0,41	0,00001	0,00001	150,9	146,4
400	74,92	75,03	0,012	0,012	0,51	0,32	0,00003	0,00001	85,8	86,1
500	76,54	76,76	0,017	0,017	0,54	0,52	0,00008	0,00008	59,1	57,8
630	78,59	78,67	0,027	0,027	0,35	0,36	0,00009	0,00009	36,9	37,2
800	82,55	82,67	0,068	0,067	0,37	0,36	0,00061	0,00058	14,8	14,8
1000	84,37	84,38	0,103	0,100	0,32	0,27	0,00105	0,00071	9,7	10,0
1250	85,89	86,11	0,146	0,149	0,30	0,28	0,00194	0,00171	6,9	6,7
1600	85,88	86,07	0,145	0,148	0,24	0,23	0,00125	0,00114	6,9	6,8
2000	85,64	85,83	0,137	0,140	0,26	0,26	0,00124	0,00131	7,3	7,2
2500	83,98	84,27	0,094	0,098	0,24	0,27	0,00052	0,00069	10,7	10,3
3150	82,69	82,81	0,070	0,070	0,27	0,28	0,00036	0,00038	14,4	14,3
4000	82,64	82,51	0,069	0,065	0,21	0,21	0,00021	0,00018	14,5	15,4
5000	81,18	81,14	0,049	0,047	0,28	0,27	0,00019	0,00016	20,3	21,1
6300	78,67	78,52	0,028	0,026	0,48	0,48	0,00018	0,00016	36,2	38,6
8000	76,07	75,88	0,015	0,014	0,33	0,33	0,00002	0,00002	65,9	70,7
10000	72,22	71,89	0,006	0,006	0,36	0,41	0,00000	0,00001	159,9	177,5
Global	94,26	94,38			u _c (L _{WA}) [dB]		0,088	0,085		
					U(L _{WA})		0,18 dB	0,18 dB	k=2,0	

Incertezas expandidas U(L_{WA}), ou U_{95%}, arredondadas para cima com duas casas decimais.

Com o objetivo de computar a incerteza referente à deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro, foi necessário fazer a soma algébrica¹¹⁸ da estimativa desta deriva com as incertezas expandidas calculadas no balanço de incertezas que foi apresentado nas Tabelas 4.31 e 4.32 dentre outras anteriores. Resultando em:

$$U_{1,(L_{WA})Total} = U_{1c}(L_{WA}) + Deriva_cal = 0,18 + 0,10 = 0,28 \text{ dB(A)}$$

$$U_{2,(L_{WA})Total} = U_{2c}(L_{WA}) + Deriva_cal = 0,18 + 0,10 = 0,28 \text{ dB(A)}$$

Portanto, os resultados que podem ser atribuídos a estas determinações de níveis de potência sonora, acompanhados de suas incertezas associadas, são: **L_{WA_1} = 94,26 ± 0,28 dB(A)** e **L_{WA_2} = 94,38 ± 0,28 dB(A)**, considerando a faixa de frequência de 100 Hz a 10 kHz e intervalo de confiança de aproximadamente 95 %. Tais resultados foram obtidos com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 145 m³ nominal do LVA-UFSC.

Se os resultados de ambos os canais, L_{WA_1} e L_{WA_2}, forem submetidos a um teste de conformidade, então a deriva do calibrador de nível sonoro **não** deve ser levada em

¹¹⁸ Porque a deriva foi considerada um efeito sistemático.

consideração. De fato, os resultados foram obtidos por medições simultâneas e a partir de dois microfones conectado aos canais de medição do analisador de sinais os quais foram ajustados usando-se o mesmo calibrador de nível sonoro. Portanto, a deriva deste calibrador não deve ser computada entre os canais, pelo menos neste tipo de situação. De qualquer forma, a diferença entre L_{WA_1} e L_{WA_2} é de apenas 0,12 dB(A), que é menor que $U_{1c}(L_{WA}) + U_{2c}(L_{WA}) = 0,36$ dB(A); calculada sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro. Portanto há conformidade entre os dois canais.

Os gráficos de barras das figuras 37 e 38 apresentam as incertezas¹¹⁹ individuais de cada banda de terço de oitava, e as contribuições de incertezas de algumas bandas mais significativas para a incerteza dos dois níveis globais de potência sonora calculados. Na Figura 36 nota-se que as incertezas dos tempos de reverberação, representadas na legenda por “u2Trev(Lw)”, são mais elevadas nas bandas de 250 Hz e inferiores, bandas de 500 Hz e 6300 Hz. As contribuições de incertezas das medições dos **níveis de pressão sonora** L_p são representadas por “u2Lp(Lw)” na legenda. São predominantemente mais elevadas nas baixas frequências e tendem a ter um ligeiro aumento nas bandas de altas frequências (6,3 a 10 kHz) em relação às médias frequências. Os perfis das contribuições de incertezas de ambos os canais de medição apresentados na Figura 37 são consideravelmente similares. Conclui-se que o desempenho metrológico de ambos os canais que mediram os L_p são similares, e pelo menos neste caso específico o canal denominado “canal 2” teve um desempenho ligeiramente melhor; incertezas menores. Os L_p foram medidos simultaneamente, mas em posições de microfones distantes uma das outras em torno de 2 a 5 metros.

¹¹⁹ Na verdade, os valores estão em decibel ao quadrado, ou seja, são incertezas elevadas ao quadrado.

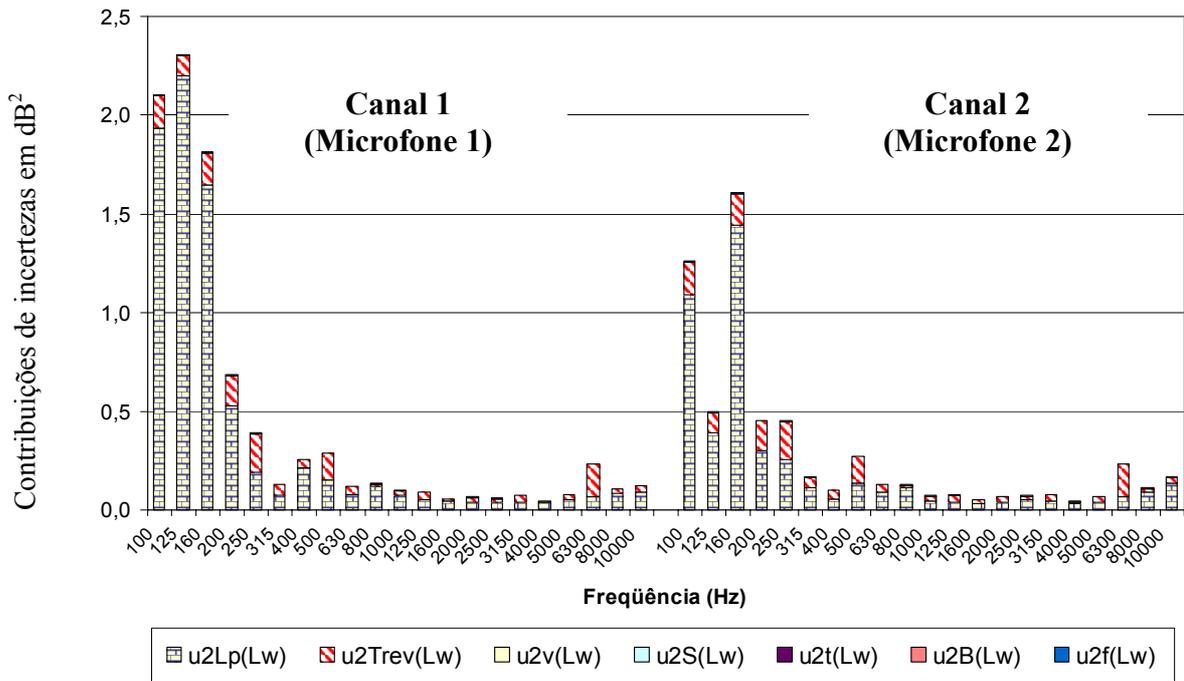


Figura 36 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para os níveis de potência sonora de cada banda de terço de oitava. Microfones 1 e 2 em separado. Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara de $145\ m^3$ do LVA-UFSC, agosto 2005.

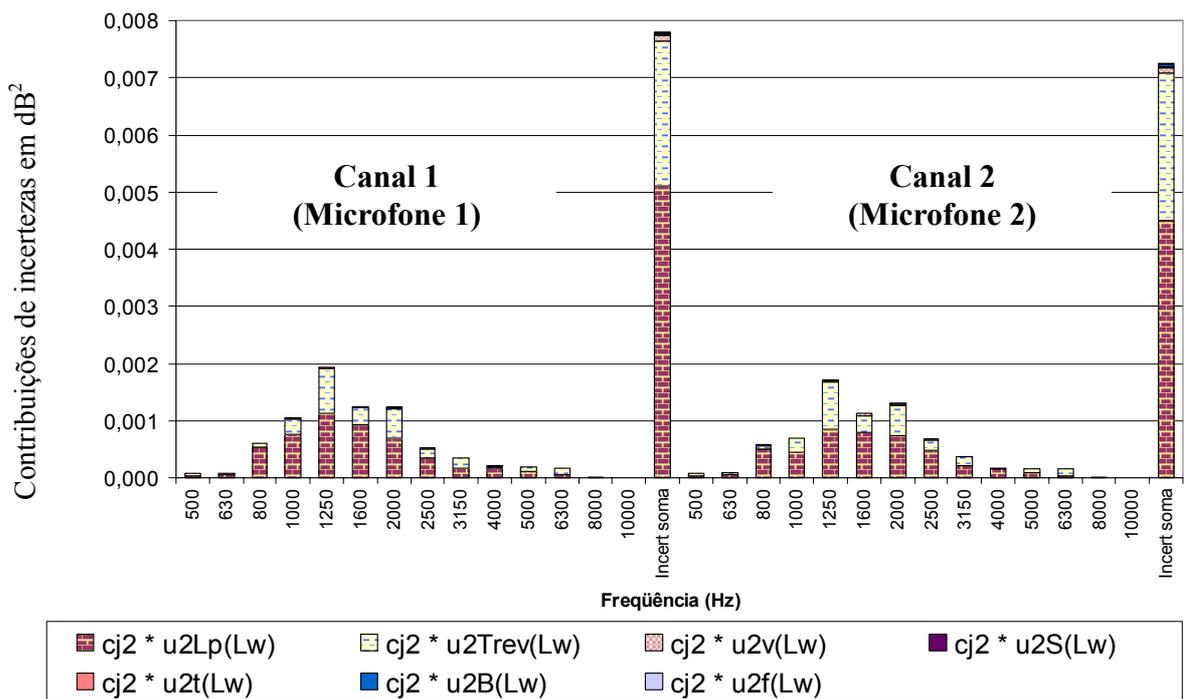


Figura 37 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza dos dois níveis de potência sonora global em $dB(A)$. Microfones 1 e 2 em separado, (dois canais de medição). Fonte sonora BK 4204 sob teste na câmara reverberante de $145\ m^3$ do LVA-UFSC, agosto 2005.

4.1.4.2 Segunda bateria de ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 145 m³

Esta segunda bateria de ensaios para a determinação dos níveis de potência sonora da fonte BK 4204 é reportada com menos detalhes de etapas dos cálculos em comparação com a primeira bateria de ensaios. Os níveis de potência sonora por bandas de terço de oitava, valores globais em dB e em dB(A), e incertezas expandidas $U(L_{WA})$ também chamadas $U_{95\%}$ são apresentados na Tabela 4.33.

Os níveis de potência sonora mais elevados novamente se encontram nas bandas de terço de oitava de 1250 a 2000 Hz e bandas adjacentes; valores em torno de 86 dB(A). E o nível de potência sonora global atingiu 94,46 dB(A). Estes valores são apresentados na Tabela 4.33, além das condições ambientais, volume e superfície da câmara reverberante que são declaradas na parte inferior da tabela.

Tabela 4.33 - Níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A). Incertezas expandidas $U_{95\%}$ estimadas para os L_{WA} em dB(A). Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC. **Novembro** de 2005.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
L_{WF} em dB	71,48	74,86	76,34	77,62	80,02	79,77	79,92	80,13	80,46	83,63	84,63
L_{WA} dB(A)	52,38	58,76	62,94	66,72	71,42	73,17	75,12	76,93	78,56	82,83	84,63
$U_{95\%}$ dB	1,41	2,63	1,68	1,07	1,39	0,87	1,07	0,93	0,64	0,99	0,79
Frequência (Hz)	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	Global
L_{WF} em dB	85,30	85,48	84,89	83,03	81,22	81,47	80,82	79,07	75,81	71,23	94,63 ± 0,20
L_{WA} dB(A)	85,90	86,48	86,09	84,33	82,42	82,47	81,32	78,97	74,71	68,73	94,46 ± 0,20
$U_{95\%}$ dB	0,48	0,59	0,51	0,54	0,62	0,60	0,74	0,61	2,80	7,43	
Incerteza $U_{95\%}$ ou $U(L_{WA})$ sem considerar a estimativa de deriva do calibrador de nível sonoro.											
Volume da câmara: $V = 145,1 \text{ m}^3$, superfície: $S = 188,5 \text{ m}^2$, temperatura: $\theta = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão atmosférica: $B = 1,009 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.											
Foram usados os tempos de reverberação T_{20} para obter estes níveis de potência sonora.											

Comparando-se com os resultados obtidos em agosto de 2005 na mesma câmara reverberante, nas bandas de 1250 a 2000 Hz e valor global de L_W em dB(A), houve concordância que pode ser observada através de teste de conformidade; ver Tabelas 4.34 e 4.35. A conformidade destas bandas de terço de oitava, consideradas mais importantes nas medições com a fonte BK 4204, foi atestada usando valores de incertezas que **não** consideram a deriva inerente ao calibrador de nível sonoro.

Nos testes de conformidade a seguir, se a soma das incertezas expandidas for maior que a diferença entre os resultados das duas medições comparadas, então há conformidade. É um teste de conformidade simples e direto, no qual a “região de dúvida de conformidade” simplesmente não existe, ou seja, os dois resultados sob comparação serão

somente “conformes” ou “não-conformes”.

Nas Tabelas 4.34 e 4.35 “Ensaio 1” significa a bateria de ensaios feita em agosto de 2005 na câmara reverberante de 145 m³ nominal com dois canais de medição de L_p ; microfones 1 e 2. “Ensaio 2” se refere à bateria de ensaios feita em novembro de 2005. Os testes apresentados nestas tabelas resultaram em conformidade. Por exemplo, o nível de potência sonora global em dB(A) do ensaio 1 com microfone 1 e ensaio 2 diferem em 0,20 dB(A); valor absoluto. Sendo que a soma das respectivas incertezas expandidas resulta em 0,38 dB(A) que é maior que a diferença 0,20 dB(A), logo os resultados destas medições está em conformidade. Ver Tabela 4.34 última linha.

Tabela 4.34 - Teste de conformidade entre resultados (parciais) dos ensaios realizados em agosto e novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC, com fonte sonora BK 4204. Somente bandas de 1000 a 2500 Hz e valor global em dB(A). “Ensaio 1” com microfone 1 em agosto; “ensaio 2” em novembro.

Frequência (Hz)	Ensaio 1 Mic. 1 dB(A)	U(L _{WA})	Ensaio 2 dB(A)	U(L _{WA})	Diferenças entre L _{WA}	Soma das incertezas	Conforme?
1000	84,37	0,63	84,63	0,79	-0,26	1,42	sim
1250	85,89	0,60	85,90	0,48	-0,01	1,08	sim
1600	85,88	0,49	86,48	0,59	-0,60	1,08	sim
2000	85,64	0,51	86,09	0,51	-0,45	1,02	sim
2500	83,98	0,49	84,33	0,54	-0,35	1,03	sim
Global	94,26	0,18	94,46	0,20	-0,20	0,38	sim

Tabela 4.35 - Teste de conformidade entre resultados (parciais) dos ensaios realizados em agosto e novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC, com fonte sonora BK 4204. Somente bandas de 1000 a 2500 Hz e valor global em dB(A). “Ensaio 1” com microfone 2 em agosto; “ensaio 2” em novembro.

Frequência (Hz)	Ensaio 1 Mic. 2 dB(A)	U(L _{WA})	Ensaio 2 dB(A)	U(L _{WA})	Diferenças entre L _{WA}	Soma das incertezas	Conforme?
1000	84,38	0,53	84,63	0,79	-0,25	1,32	sim
1250	86,11	0,56	85,90	0,48	0,21	1,04	sim
1600	86,07	0,46	86,48	0,59	-0,41	1,05	sim
2000	85,83	0,52	86,09	0,51	-0,26	1,03	sim
2500	84,27	0,54	84,33	0,54	-0,06	1,08	sim
Global	94,38	0,18	94,46	0,20	-0,08	0,38	sim

As fontes de incertezas que mais influenciaram os resultados são os níveis de pressão sonora medidos, L_p , e os tempos de reverberação T_{rev} da câmara reverberante de 145 m³ nominal. Os parâmetros usados para calcular as incertezas padrão de L_p e de T_{rev} , tais como: desvios padrão experimentais, coeficientes de sensibilidade, e divisores são apresentados na Tabela 4.36. Os divisores são dados em função da distribuição de probabilidade. A distribuição de probabilidade pode ser atribuída à determinada fonte de incerteza; nestes casos, os valores 1,0 se referem às distribuições que foram consideradas normais.

De forma semelhante ao ocorrido em outros ensaios, houve alguns erros nas avaliações das curvas de decaimentos, no método de interrupção do ruído, relacionados às medições dos tempos de reverberação nas bandas de 8 e 10 kHz. Ao se observar as Tabelas 4.36 e 4.37 nas linhas correspondentes a 8 e 10 kHz as disparidades ficam evidentes. Sendo que os resultados são realmente distantes dos esperados. Tanto os valores médios, quanto os desvios padrão, dos T_{rev} em 8 e 10 kHz divergem dos valores *normalmente esperados*. Entretanto, estes resultados experimentais foram mantidos propositadamente para verificar seus efeitos nos cálculos de incertezas; especialmente com relação à incerteza do L_{WA} global em dB(A).

Tabela 4.36 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p ; tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 145 m³ (nominal) do LVA-UFSC, fonte sonora **BK 4204**, novembro 2005. Coeficientes de sensibilidade c_1 e c_2 , divisores d_{Lp} e d_{Trev} e incertezas padrão combinadas $u_{Lp}(L_W)$ e $u_{Trev}(L_W)$.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)	u_{ccm} (dB)	$X_{Lp,aleatório}$ (dB)	c_1	d_{Lp}	$u_{Lp}(L_W)$ [dB]	T_{rev} (s)	X_{Trev} (s)	c_2 (dB/s)	d_{Trev}	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]
100	0,67	0,172	0,70	1,0	1,0	0,70	10,16	0,17	-0,43	1,0	0,07
125	1,24	0,172	1,25	1,0	1,0	1,25	7,64	0,68	-0,58	1,0	0,39
160	0,72	0,172	0,74	1,0	1,0	0,74	7,19	0,63	-0,61	1,0	0,39
200	0,37	0,172	0,40	1,0	1,0	0,40	8,05	0,63	-0,55	1,0	0,35
250	0,59	0,172	0,61	1,0	1,0	0,61	5,24	0,39	-0,85	1,0	0,33
315	0,38	0,172	0,42	1,0	1,0	0,42	4,65	0,09	-0,96	1,0	0,09
400	0,37	0,172	0,41	1,0	1,0	0,41	3,53	0,27	-1,27	1,0	0,35
500	0,26	0,172	0,31	1,0	1,0	0,31	3,73	0,29	-1,20	1,0	0,34
630	0,20	0,172	0,26	1,0	1,0	0,26	4,48	0,18	-0,99	1,0	0,18
800	0,34	0,172	0,38	1,0	1,0	0,38	4,85	0,34	-0,92	1,0	0,31
1000	0,29	0,172	0,33	1,0	1,0	0,33	5,29	0,25	-0,84	1,0	0,21
1250	0,16	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23	5,40	0,05	-0,82	1,0	0,04
1600	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23	4,57	0,19	-0,98	1,0	0,19
2000	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23	4,23	0,10	-1,06	1,0	0,11
2500	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23	3,87	0,11	-1,16	1,0	0,13
3150	0,18	0,172	0,25	1,0	1,0	0,25	3,46	0,14	-1,30	1,0	0,18
4000	0,24	0,172	0,29	1,0	1,0	0,29	2,93	0,03	-1,55	1,0	0,05
5000	0,28	0,172	0,33	1,0	1,0	0,33	2,34	0,08	-1,95	1,0	0,16
6300	0,18	0,215	0,28	1,0	1,0	0,28	1,89	0,05	-2,45	1,0	0,12
8000	0,23	0,215	0,31	1,0	1,0	0,31	1,77	0,52	-2,62	1,0	1,37
10000	0,23	0,215	0,32	1,0	1,0	0,32	2,01	1,62	-2,29	1,0	3,70

T_{rev} são os tempos de reverberação T_{20} .

Os valores intermediários dos cálculos de *incerteza do nível de potência sonora global* em dB(A) são mostrados na Tabela 4.38. As linhas realçadas correspondem as bandas de terço de oitava com mais energia sonora e que mais contribuem para a *incerteza do L_{WA} global* em dB(A). São as bandas de 1250 a 2000 Hz cujos indicadores “1/cj” estão na faixa de 6,3 a 7,2. As bandas adjacentes (próximas as de maior energia sonora) também têm contribuições significativas de incertezas para a incerteza do L_{WA} global.

Tabela 4.37 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 sob teste. Câmara de 145 m³ LVA-UFSC, novembro de 2005.

Frequência central (Hz)	$u_{Lp}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_i(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_f(L_W)$ [dB]	$u_c(L_W)$ [dB]	$U(L_W)$ [dB]
100	0,70	0,07	0,021	0,007	0,016	0,019	0,090	0,71	1,41
125	1,25	0,39	0,023	0,006	0,015	0,019	0,078	1,31	2,63
160	0,74	0,39	0,024	0,005	0,015	0,019	0,071	0,84	1,68
200	0,40	0,35	0,026	0,004	0,014	0,019	0,055	0,54	1,07
250	0,61	0,33	0,027	0,003	0,014	0,019	0,046	0,70	1,39
315	0,42	0,09	0,028	0,002	0,014	0,019	0,039	0,43	0,87
400	0,41	0,35	0,029	0,002	0,013	0,019	0,033	0,54	1,07
500	0,31	0,34	0,030	0,001	0,013	0,019	0,025	0,47	0,93
630	0,26	0,18	0,030	0,001	0,013	0,019	0,021	0,32	0,64
800	0,38	0,31	0,031	0,001	0,013	0,019	0,017	0,49	0,99
1000	0,33	0,21	0,031	0,001	0,013	0,019	0,013	0,40	0,79
1250	0,23	0,04	0,031	0,000	0,013	0,019	0,011	0,24	0,48
1600	0,23	0,19	0,032	0,000	0,013	0,019	0,009	0,30	0,59
2000	0,23	0,11	0,032	0,000	0,013	0,019	0,007	0,25	0,51
2500	0,23	0,13	0,032	0,000	0,013	0,019	0,006	0,27	0,54
3150	0,25	0,18	0,033	0,000	0,012	0,019	0,005	0,31	0,62
4000	0,29	0,05	0,033	0,001	0,012	0,019	0,004	0,30	0,60
5000	0,33	0,16	0,033	0,001	0,012	0,019	0,003	0,37	0,74
6300	0,28	0,12	0,034	0,001	0,012	0,019	0,002	0,30	0,61
8000	0,31	1,37	0,034	0,001	0,012	0,019	0,002	1,40	2,80
10000	0,32	3,70	0,034	0,001	0,012	0,019	0,001	3,71	7,43

Tabela 4.38 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 145 m³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204 sob teste, novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Ponderação curva "A" (dB)	L_{Wj} dB	c_j	$u_c(L_{Wj})$ (dB)	$c_j u_c$ (dB)	$(c_j u_c)^2$ (dB) ²	$1 / c_j$
100	-19,1	71,48	0,000	0,71	0,000	0,0000	16155,5
125	-16,1	74,86	0,000	1,31	0,000	0,0000	3714,5
160	-13,4	76,34	0,001	0,84	0,001	0,0000	1417,9
200	-10,9	77,62	0,002	0,54	0,001	0,0000	593,9
250	-8,6	80,02	0,005	0,70	0,003	0,0000	201,1
315	-6,6	79,77	0,007	0,43	0,003	0,0000	134,4
400	-4,8	79,92	0,012	0,54	0,006	0,0000	85,9
500	-3,2	80,13	0,018	0,47	0,008	0,0001	56,6
630	-1,9	80,46	0,026	0,32	0,008	0,0001	38,8
800	-0,8	83,63	0,069	0,49	0,034	0,0011	14,6
1000	0	84,63	0,104	0,40	0,041	0,0017	9,6
1250	0,6	85,30	0,139	0,24	0,034	0,0011	7,2
1600	1	85,48	0,159	0,30	0,047	0,0022	6,3
2000	1,2	84,89	0,146	0,25	0,037	0,0014	6,9
2500	1,3	83,03	0,097	0,27	0,026	0,0007	10,3
3150	1,2	81,22	0,063	0,31	0,019	0,0004	16,0
4000	1	81,47	0,063	0,30	0,019	0,0004	15,8
5000	0,5	80,82	0,049	0,37	0,018	0,0003	20,6
6300	-0,1	79,07	0,028	0,30	0,009	0,0001	35,4
8000	-1,1	75,81	0,011	1,40	0,015	0,0002	94,4
10000	-2,5	71,23	0,003	3,71	0,010	0,0001	374,2
Global				$u_c(L_{WA})$	$U(L_{WA})$		$k = 2,0$
				0,099 dB	0,20 dB		

Em comparação com a incerteza expandida global em dB(A) encontrada para bateria de ensaios anterior¹²⁰, 0,18 dB(A), houve um ligeiro aumento do valor da incerteza $U(L_{WA})$ o qual atingiu 0,20 dB(A); assim mesmo considera-se que há boa concordância entre estas duas estimativas¹²¹.

Para computar a incerteza referente à deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro, a mesma foi somada algebricamente à estimativa de incerteza expandida calculada no balanço de incertezas apresentado na Tabela 4.38. Resultando em:

$$U_{(L_{WA})Total} = U(L_{WA}) + Deriva_{cal} = 0,20 + 0,10 = 0,30 \text{ dB(A)}$$

Desta forma o resultado final desta bateria de ensaios para a determinação de nível de potência sonora da fonte BK 4204 é $L_{WA} = 94,46 \pm 0,30 \text{ dB(A)}$. Considerando a faixa de frequências de 100 Hz a 10 kHz medidas em bandas de terço de oitavas, e intervalo de confiança de aproximadamente 95 %.

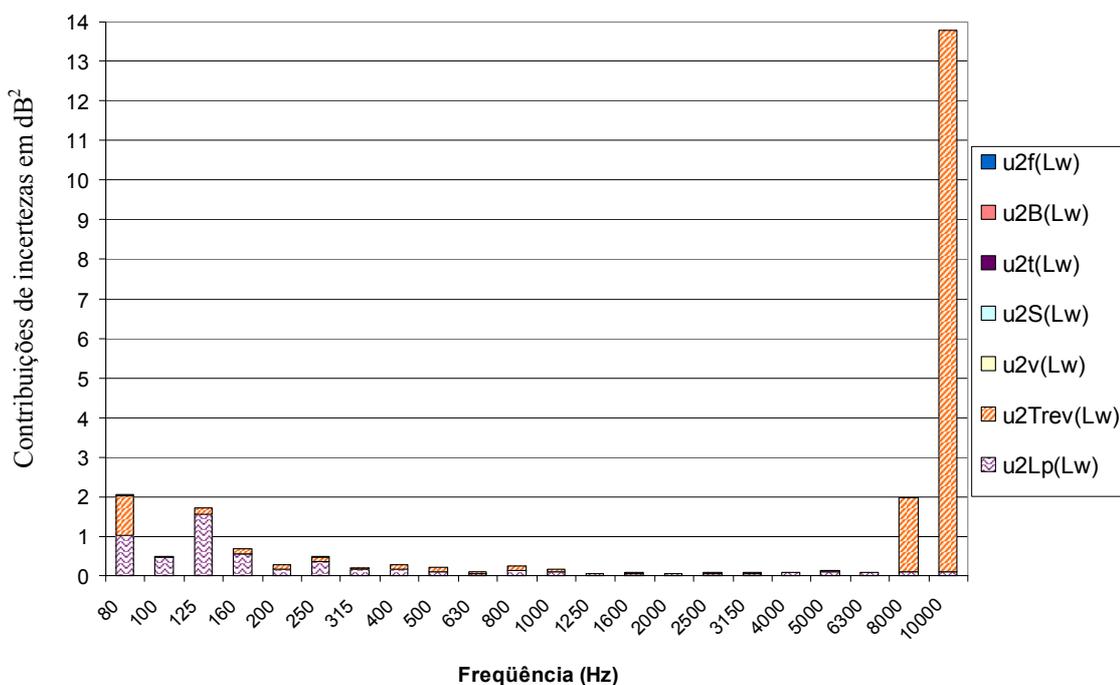


Figura 38 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para os níveis de potência sonora de cada banda de terço de oitava. Fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara de 145 m^3 do LVA-UFSC, novembro 2005.

Na Figura 38 o gráfico de barras demonstra que houve algum problema (erro grosseiro) no processo de estimativa de incerteza dos tempos de reverberação nas bandas de 8 e 10 kHz. Os valores dados em decibéis ao quadrado e legendados por “ $u_{2Trev}(L_w)$ ” têm comportamento “aceitável” de 100 a 6300 Hz, mas em 10 kHz o valor da contribuição de incerteza chega a um patamar extremamente alto; quase 14 dB^2 .

¹²⁰ Agosto 2005, câmara reverberante de 145 m^3 nominal.

¹²¹ Até esta etapa dos cálculos de incertezas não é considerada a deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro.

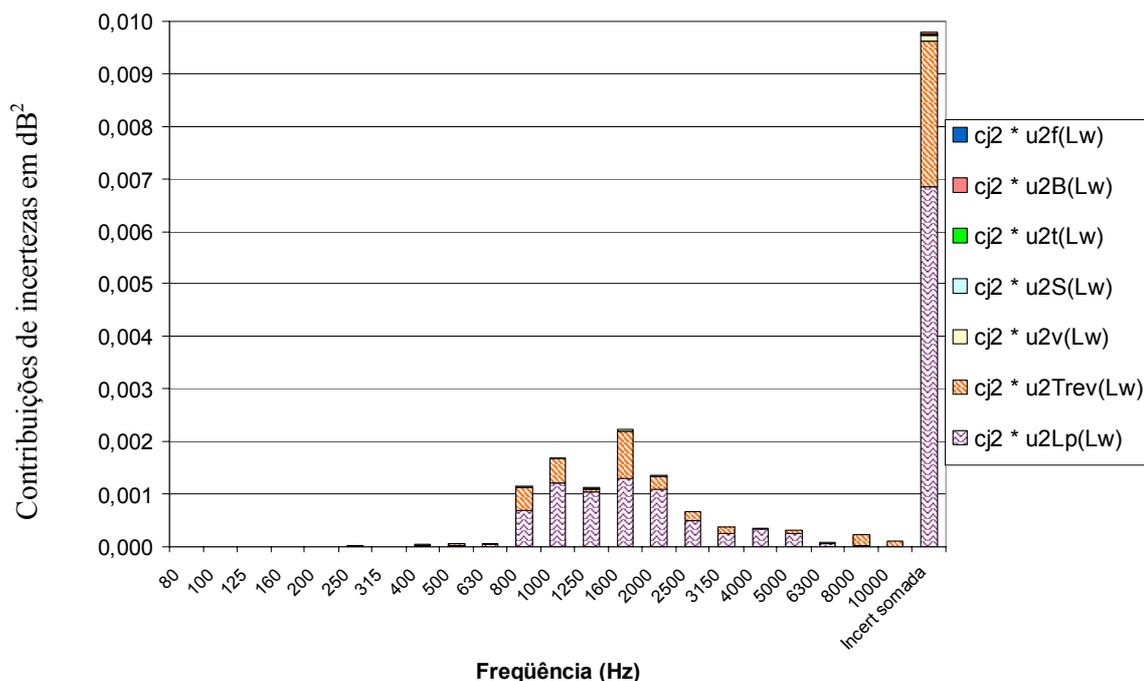


Figura 39 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Fonte sonora BK 4204 sob teste na câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC, **novembro 2005**.

O efeito do erro grosseiro na banda de 10 kHz, com relação à incerteza u_{Trev} , tornar-se desastroso no caso da determinação do L_W especificamente em 10 kHz. Porém, como se pode ver no gráfico de barras da Figura 39, as bandas de 8 e 10 kHz contribuem relativamente pouco para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A) da fonte BK 4204. As causas destas pequenas contribuições de incertezas são, sem dúvida, os baixos níveis de potência sonora gerados nas bandas de 8 e 10 kHz pela fonte sonora BK 4204. Caso estes níveis de potência sonora fossem relativamente altos, seria necessário repensar (e refazer) determinados cálculos de avaliação de incertezas. Isto seria imprescindível para evitar que o erro grosseiro se propagasse de forma significativa, tornando a estimativa de $U(L_{WA})$ extremamente alta.

4.1.5 Resultados experimentais obtidos com a fonte sonora BK 4204 na câmara semi-anechoica do LVA-UFSC

Para calcular os níveis de potência sonora apresentados na Tabela 4.39 foram usadas as Equações 4.1, 4.2 e 4.3, apresentadas na Subseção 4.1.1. A distância entre fonte sonora e microfone, dada pelo raio r que define a semi-esfera imaginária, foi definido em 1,50 m. A temperatura média foi estimada em 26,2 °C. O valor da pressão atmosférica B a ser aplicado na Equação 4.3 (Subseção 4.1.1) deve ser fornecido em milibar e não em Pascal, sendo que B foi estimada em 1014 milibar.

Os equipamentos usados na cadeia de medição foram: analisador dinâmico de sinais Pulse 3560-C, marca Brüel & Kjær, microfone de medição capacitivo de meia polegada marca GRAS modelo 40AE, pré-amplificador GRAS 26CA, e calibrador de nível sonoro GRAS 42AB. Medições segundo a norma ISO 3745:1977, e em vinte posições de microfone¹²².

Em relação aos resultados das medições com fonte BK 4204 na câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC, os níveis de potência sonora de 95,16 dB e de 94,74 dB(A) que foram obtidos na câmara semi-aneecóica se apresentam ligeiramente superiores. Na câmara reverberante de 145 m³ os L_W globais obtidos foram: 94,51 e 94,64 dB, 94,26 e 94,38 dB(A) em agosto; 94,72 dB e 94,46 dB(A) em novembro. Comparando-se estes valores conclui-se que o ensaio na câmara semi-aneecóica proporcionou os valores mais elevados de níveis de potência sonora, tanto em dB e dB(A); sem e com ponderação da “curva A” respectivamente.

Tabela 4.39 - Níveis de pressão sonora médios em dB; níveis de potência sonora L_{WF} em dB e L_{WA} em dB(A) obtidos com a fonte sonora BK 4204 ensaiada na câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC. **Novembro** de 2005.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
L_p médio	67,48	66,62	66,93	67,60	68,92	68,56	68,01	67,55	68,08	71,33	72,67
L_{WF} dB	78,97	78,11	78,42	79,09	80,41	80,05	79,50	79,03	79,57	82,82	84,16
L_{WA} dB(A)	59,87	62,01	65,02	68,19	71,81	73,45	74,70	75,83	77,67	82,02	84,16
Frequência (Hz)	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	Global
L_p médio	73,50	74,51	74,32	71,88	69,59	70,70	69,89	69,15	66,70	65,24	***
L_{WF} dB	84,99	86,00	85,81	83,37	81,08	82,19	81,38	80,64	78,18	76,73	95,16
L_{WA} dB(A)	85,59	87,00	87,01	84,67	82,28	83,19	81,88	80,54	77,08	74,23	94,74

Temperatura: $\theta = 26,2$ °C, pressão atmosférica: $B = 1,014 \cdot 10^5$ Pa. Valores médios aproximados.
Distância entre fonte sonora e microfone: $r = 1,50$ m.

4.1.5.1 Comparação dos resultados obtidos nas câmaras reverberantes e semi-aneecóica do LVA-UFSC

As incertezas associadas às medições na câmara semi-aneecóica **não** foram estimadas. Por este motivo não há barras de erros correspondentes à “semi-aneec” no gráfico da Figura 40. Os resultados dos três ensaios representados no gráfico foram obtidos em novembro de 2005 nas câmaras acústicas do LVA-UFSC. A visualização das barras referentes aos níveis de potência sonora globais representadas por “ L_W global” (em dB) e “ L_{WA} _global” (em dB(A)) se torna difícil devido às diferenças pequenas entre os L_W globais e incertezas relativamente

¹²² Mais detalhes na Subseção 5.1.1.

pequenas se comparadas com as variações de L_W encontradas nas bandas de terço de oitavas. Nota-se que há incertezas relativamente muito elevadas nas bandas de baixas e altas frequências as quais não tiveram grande influência sobre as incertezas dos L_W globais e L_{WA} globais apresentados no gráfico da Figura 40. Isto se deve aos coeficientes de sensibilidade c_j que são usados no cálculo de incerteza de $L_{Wglobal}$ e L_{WA_global} .

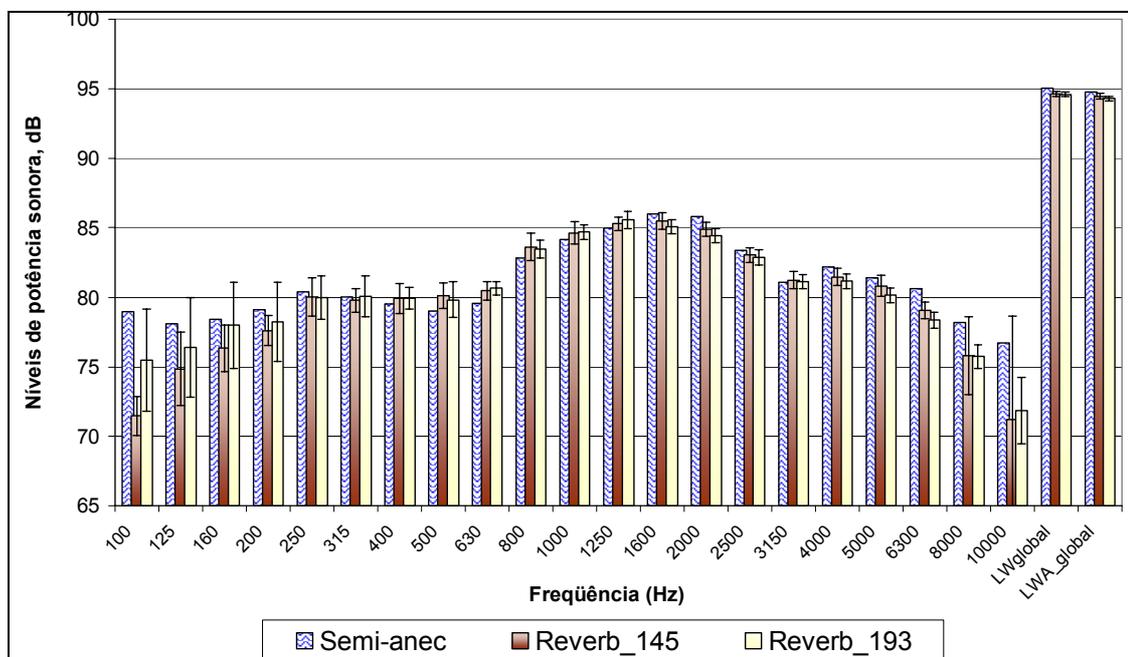


Figura 40 - Gráfico de barras. Comparações entre os níveis de potência sonora obtidos nas câmaras acústicas do LVA-UFSC com a fonte sonora BK 4204: câmara semi-anechoica e câmaras reverberantes de 145 e 193 m³. Barras de erros representam as estimativas de incertezas expandidas $U_{95\%}$. L_{WA_global} em dB(A). Medições em novembro de 2005.

O resultado obtido na câmara semi-anechoica é ligeiramente superior aos obtidos nas câmaras reverberantes de 145 e 193 m³ em novembro de 2005. Fato que se pode visualizar mais facilmente na Figura 41 que no gráfico de barras na Figura 40. Nesta última figura, os resultados obtidos na câmara semi-anechoica são denotados por “Câmara 3”. Semelhantemente, “Câmara 1” representa a câmara reverberante de 145 m³, e “Câmara 2” representa a câmara reverberante de 193 m³.

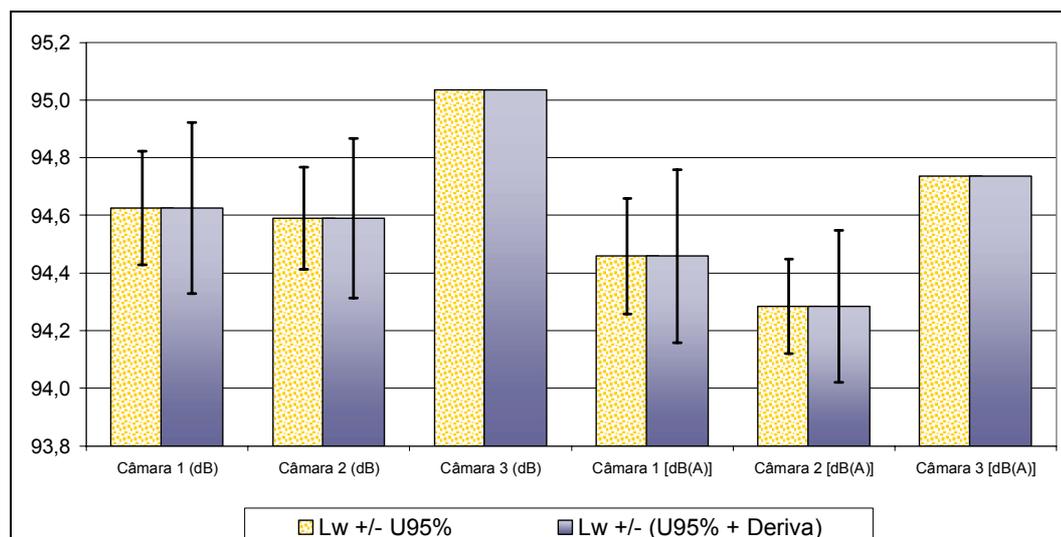


Figura 41 - Representação gráfica dos níveis de potência sonora globais em dB e dB(A), e respectivas incertezas expandidas, obtidos com a fonte BK 4204 em câmaras acústicas do LVA-UFSC. Câmaras 1 e 2 são as reverberantes de 145 e 193 m³, e câmara 3 representa a câmara semi-aneecóica. Novembro 2005.

Os causadores das diferenças entre os resultados experimentais representados na Figura 41 estão associados a: reflexões das ondas sonoras no piso da câmara semi-aneecóica, reflexões indesejáveis nas cunhas de absorção sonora da câmara semi-aneecóica, diferenças entre os princípios de medição, tipos de campos sonoros diferentes em câmaras reverberantes e câmara semi-aneecóica, absorção sonora do ar, a resposta do microfone dentro do campo sonoro e as correções aplicadas, dentre outros fatores. A absorção sonora do ar, mesmo sendo corrigida, pode apresentar contribuição de variação nos resultados obtidos.

A resposta em frequência do microfone de medição em campo sonoro difuso foi corrigida somente como se fosse campo livre. Desta forma, a consideração de omnidirecionalidade do microfone em relação aos ângulos de incidência das ondas sonoras influencia os resultados. As conseqüências deste tipo de consideração são efeitos de caráter sistemático as quais tendem a diminuir os valores dos L_p medidos em câmaras reverberantes. Conseqüentemente o $L_{WA} global^{123}$ obtido será menor que o realmente irradiado pela fonte sonora. Mais detalhes sobre a consideração de omnidirecionalidade da resposta do microfone de medição são apresentados na Subseção 4.1.1.1, especialmente figuras 20 e 23.

De maneira geral, espera-se que os valores de $L_{WA} global$, que poderiam ser encontrados na câmara semi-aneecóica, sejam menores ao se aprimorar a absorção sonora do revestimento da câmara. Ao evitar reflexões indesejáveis os L_p medidos deverão ser ligeiramente menores. Também se espera que os valores de $L_{WA} globais$ encontrados experimentalmente nas câmaras reverberantes aumentem. Isto ao ser feita a calibração do microfone para campo difuso e

¹²³ Também nas bandas de terço de oitavas, especialmente nas de frequências mais elevadas, devido à resposta do microfone no campo sonoro difuso.

aplicadas as correções conforme a norma IEC 1183 de 1994 (também denominada IEC 61183). A partir destas considerações, o que se deseja é o aumento do grau de concordância entre os resultados das determinações de níveis de potência sonora entre as câmaras acústicas cujos métodos de medição são realmente distintos.

4.1.6 Investigações adicionais nos ensaios de determinação de níveis de potência sonora

Dos parâmetros de entrada da determinação de níveis de potência sonora pelo método direto em câmaras reverberantes destacam-se L_p e T_{rev} . Os resultados das investigações experimentais junto com os cálculos de incertezas padrão combinadas evidenciam a importância destes dois parâmetros, principalmente com respeito às contribuições de incertezas de medição. A seguir são apresentadas duas investigações experimentais extras sobre estes parâmetros.

4.1.6.1 Medições com dois microfones próximos e afastados, investigações das curvas de respostas em frequência e da difusividade da câmara reverberante de 145 m³

Adicionalmente aos ensaios de medições de níveis de pressão sonora necessários para a determinação de níveis de potência sonora, foram realizadas medições investigativas em função das posições dos microfones. Um dos focos deste experimento está no campo sonoro reverberante e suas características de difusividade dentro da câmara reverberante. Esta última tem variações significativas em função da banda de frequência analisada. Outra questão importante é a resposta dos microfones em campo sonoro considerado difuso¹²⁴.

Na câmara reverberante de 145 m³, em agosto de 2005, foram feitas nove medições de L_p com dois microfones (dois canais simultâneos em cada uma das nove medições), posicionando os microfones com distâncias (entre si) de no mínimo dois metros; “microfones separados”. As diferenças entre os resultados, em dB, foram plotadas em bandas de terço de oitava no gráfico da Figura 42; ver “9x L_p mic separados” na legenda. Ou seja, a diferença entre as médias energéticas de L_p de nove amostras obtidas com dois microfones em posições afastadas. Na sequência foram feitas seis medições nas quais os microfones estiveram próximos “quase juntos”, com distâncias entre 1 e 3 cm e com ângulos de orientação similares. As diferenças das médias energéticas dos L_p medidos desta forma também foram plotadas no gráfico de barras da Figura 42; legendadas por “6x L_p mic juntos”. As diferenças das médias energéticas

¹²⁴ Esta questão foi abordada na Subseção 4.1.1.1.

de L_p dos dois canais e do total de quinze medições foram plotadas na Figura 42, legendadas por “15x L_p geral”.

Nota-se na Figura 42 que existem tendências mais definidas em altas frequências e que, em baixas frequências, especialmente 200 Hz e inferiores, ocorreram diferenças superiores a 0,5 dB no caso de microfones posicionados afastadamente. Mas qual seria a causa das tendências apresentadas nas bandas de alta frequência? Pelo menos parte da explicação está na resposta dos dois microfones em campo sonoro livre. Os microfones usados têm suas respostas em frequência em campo livre dadas pelo fabricante, e são apresentadas nas figuras 24 e 25 da Subseção 4.1.1.1. Ao se observar as curvas, notam-se as tendências do microfone GRAS 40AE número de série 34581 que é menos sensível em frequências entre 2 e 7 kHz, e mais sensível em 9 e 10 kHz aproximadamente¹²⁵. Portanto, os valores tendenciosos a partir de 1 kHz até 10 kHz têm forte correlação com a resposta em campo livre dos microfones usados em ambos os canais do analisador de sinais. Outro fato notável é a concordância na banda de 1 kHz. Sendo que o calibrador de nível sonoro usado no ajuste da cadeia de medição (ambos os canais) foi o GRAS 42AB que gera sinal padrão na frequência de 1 kHz.

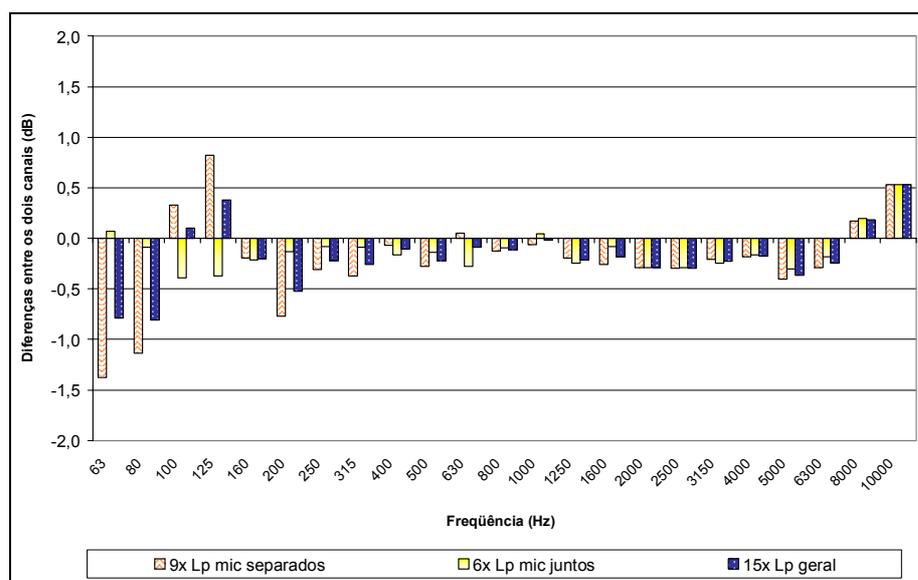


Figura 42 - Gráfico de barras. Diferenças dos níveis de pressão sonora, L_p em dB, de dois canais de medição. Medições simultâneas com microfones separados, e microfones “juntos” (distância de 1 a 4 cm). Total de 15 medições, em 30 posições de microfones. Câmara reverberante de 145 m³, LVA-UFSC, agosto 2005.

Para demonstrar a ordem de grandeza das diferenças encontradas com os microfones de ambos os canais afastados, ou em posições próximas “microfones quase juntos”, foram plotados os gráficos das figuras 44 e 45. Cada um dos gráficos nas figuras representa as

¹²⁵ As curvas fornecidas pelo fabricante apenas dão idéia das respostas dos microfones, além de ser de difícil observação.

diferenças algébricas entre os resultados dos dois canais (dois microfones), em três medições consecutivas com a fonte sonora BK 4204.

As amplitudes das barras são, de modo geral, menores no gráfico da Figura 43 que diz respeito às medições com ambos os microfones próximos, em posições quase idênticas. Este fato já era esperado antes mesmo da execução do procedimento de medição. Também houve notável semelhança entre os perfis das medições a partir de 1 kHz até 10 kHz, independentemente das posições dos microfones estarem muito próximas ou afastadas, ver figuras 44 e 45. De fato, se as medições fossem “perfeitas”, no sentido de ter microfones com respostas perfeitamente planas, e a difusividade do campo sonoro na câmara reverberante fosse tão plena que os L_p fossem iguais em todos os pontos, então as barras nos gráficos 4.29, 4.30 e 4.31 deveriam ser nulas.

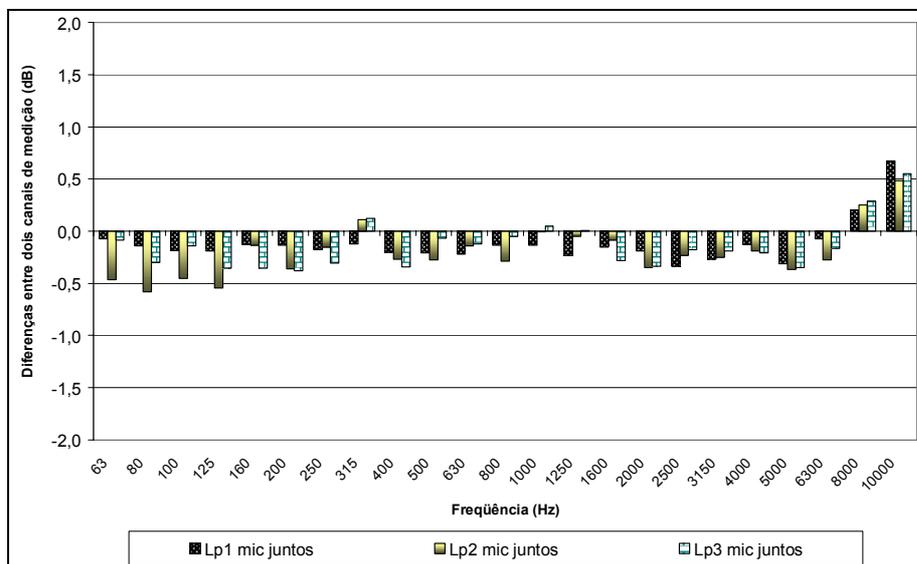


Figura 43 - Gráfico de barras. Diferenças dos níveis de pressão sonora, L_p em dB, de dois canais de medição (simultâneos). Três medições consecutivas com os dois microfones próximos; “juntos” (distância de 1 a 4 cm). Câmara reverberante de 145 m³, LVA-UFSC, agosto 2005.

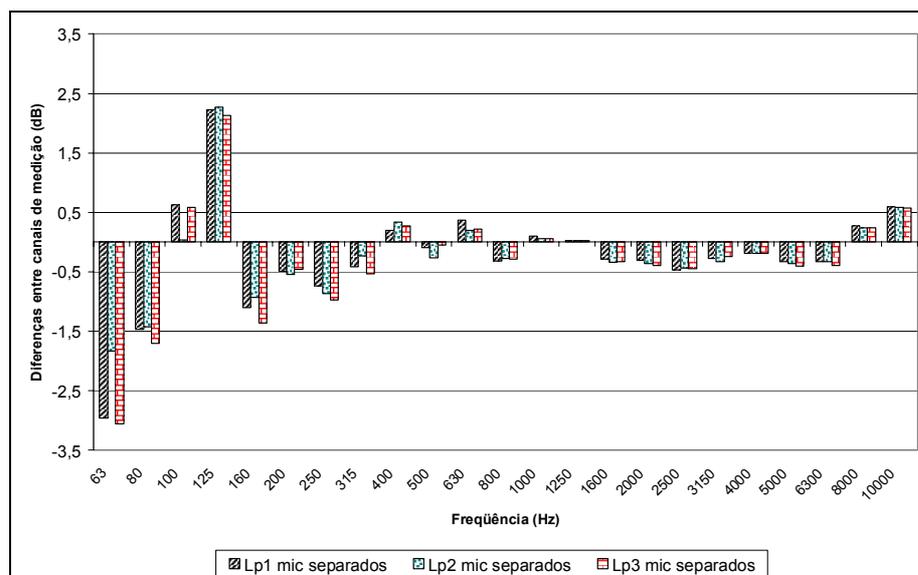


Figura 44 - Gráfico de barras. Diferenças dos níveis de pressão sonora, L_p em dB, de dois canais de medição (simultâneos). Três medições consecutivas com os dois microfones separados (distância mínima de 2 m). Câmara reverberante de 145 m³, LVA-UFSC, agosto 2005.

Uma conclusão a respeito dos resultados destes ensaios investigativos é que as respostas de microfones em campo sonoro difuso em médias e altas frequências se assemelham às respostas em campo sonoro livre, pelo menos no caso da comparação de dois microfones. Sendo importante aplicar no mínimo as correções disponíveis fornecidas pelo fabricante, neste caso, através de gráfico de curva de resposta (calibração fornecida pelo fabricante do microfone).

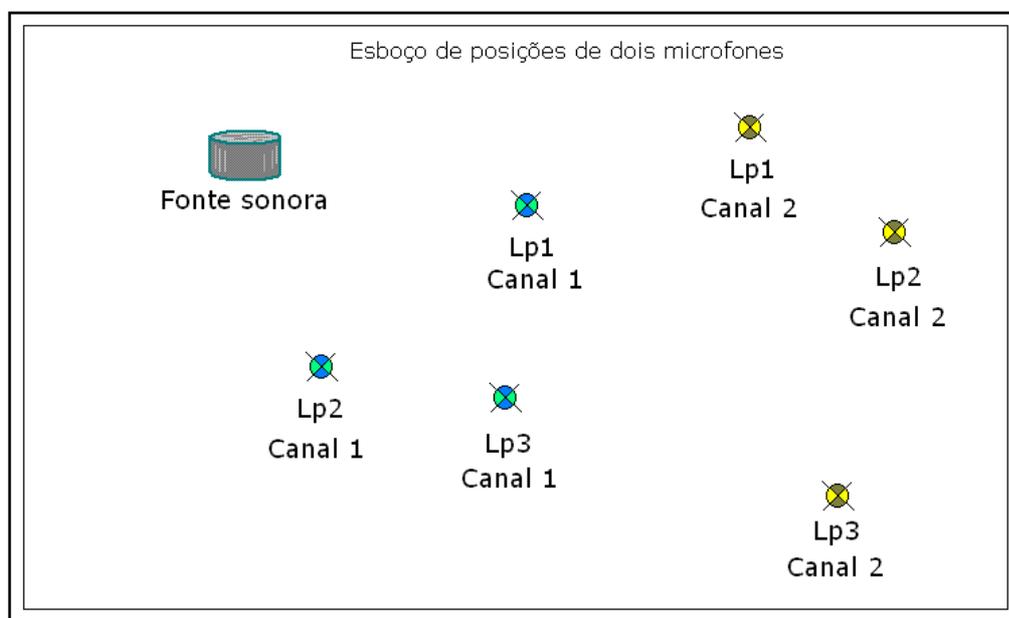


Figura 45 - Esboço dos arranjos de posições de dois microfones. A área retangular representa o piso da câmara reverberante de 145 m³ do LVA. “Lp1” a “Lp3” esboçam as posições referentes às três primeiras medições com os microfones de ambos os canais afastados.

No gráfico de barras da Figura 44 nota-se que em cada banda de terço de oitava, nas frequências baixas, as barras têm amplitudes que tendem a valores similares. Por exemplo,

na banda de 125 Hz todas as barras têm amplitudes positivas e parecidas, enquanto que na banda seguinte, de 160 Hz, as amplitudes das três barras são negativas e de ordem de grandeza similar. Estes tipos de tendências também ocorreram nas outras seis medições com microfones separados, cujos gráficos não foram apresentados. De fato, se as posições dos microfones fossem totalmente aleatórias este tipo de tendência mostrada na Figura 44 **não** deveria ocorrer. A explicação do fenômeno (proposital) está no esboço apresentado na Figura 45. São posições dos dois microfones de medição as quais foram escolhidas sob critérios subjetivos do operador do ensaio. Isto foi feito com base em conhecimento prévio do comportamento do campo sonoro da câmara. O objetivo era mostrar que o campo sonoro dentro da câmara reverberante tem tendências localizadas e que estas são de maiores amplitudes nas frequências baixas. E isto é confirmado no gráfico da Figura 44.

4.1.6.2 Comparação entre os níveis de potência sonora calculados usando os tempos de reverberação T_{15} e T_{20}

A partir de algumas das curvas de decaimentos obtidas através do método da interrupção do ruído foram estimados os tempos de reverberação T_{15} , além dos tempos de reverberação T_{20} e T_{30} . A aquisição das curvas de decaimentos foi feita em fevereiro de 2005 na câmara reverberante de 193 m³ com analisador de sinais Pulse 3560-C de Brüel & Kjær. As curvas foram gravadas em computador através do software Pulse Labshop. Sendo que a partir da mesma curva¹²⁶ podem ser avaliadas as faixas de decaimento correspondentes a T_{15} , T_{20} e T_{30} , dentre outras. As faixas de avaliação dos tempos de reverberação correspondentes à T_{20} e T_{30} são avaliadas por processos totalmente automatizados pelo software. No caso da avaliação das curvas para obtenção dos T_{15} foram necessárias intervenções manuais nos gráficos das curvas. A consequência disto é imprecisão nas faixas de decaimentos avaliadas, que variaram entre 14 e 16 dB aproximadamente. Exemplos das curvas de decaimentos são mostrados na Figura 46.

¹²⁶ Uma curva de decaimento pode ser obtida através da média de diversas curvas de decaimentos. Esta “curva média” é calculada por software, no caso do sistema de medição adotado.

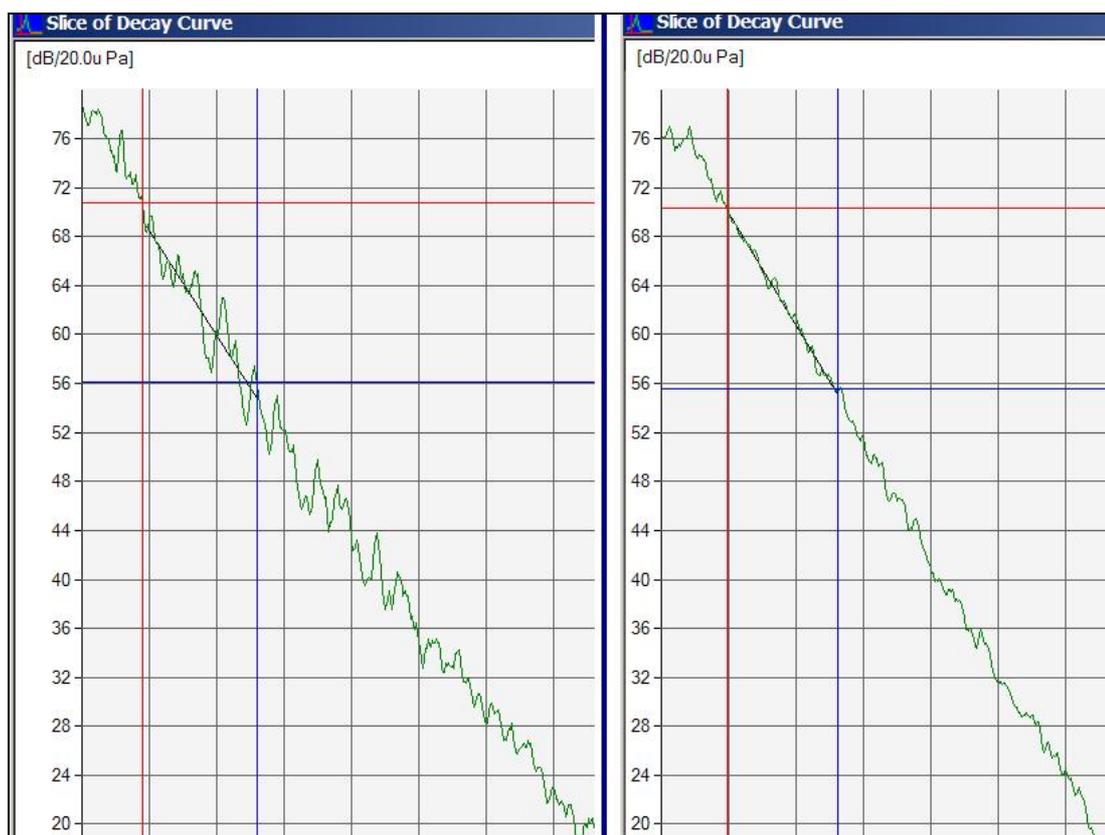


Figura 46 - Curvas de decaimentos das bandas de 250 Hz e 1600 Hz obtidas em fevereiro de 2005 na câmara reverberante de 193 m³ nominal do LVA-UFSC. Ajustes “manuais” das faixas de avaliação dos decaimentos para obtenção dos tempos de reverberação T₁₅.

A comparação entre os resultados obtidos através das avaliações das curvas de decaimentos nas faixas de 15, 20 e 30 dB pode ser vista através do gráfico de barras da Figura 47, onde foram plotados os tempos de reverberação experimentais T₁₅, T₂₀ e T₃₀. Nota-se que **não** há um padrão totalmente definido. De forma que em algumas bandas de terço de oitava os T₁₅ são mais elevados, em outras bandas os T₃₀ são mais elevados. Em bandas de altas frequências, a partir de 4 kHz, os tempos de reverberação apresentaram melhor concordância entre os valores de T₁₅, T₂₀ e T₃₀. Nas bandas de 1600 a 3150 Hz ocorreu um padrão no qual quanto maior a faixa de avaliação do decaimento, menor o tempo de reverberação estimado; sendo que os T₃₀ tiveram os menores valores em relação aos respectivos T₂₀ e T₁₅. De maneira oposta, nas bandas de 125 a 200 Hz, houve um padrão no qual quanto maior a faixa de avaliação de decaimento, maior foram os tempos de reverberação; assim os T₃₀ resultaram maiores que os T₂₀ e T₁₅. Estas variações de padrão apresentadas no gráfico da Figura 47, são devidas às curvas de decaimento que não têm inclinação (ou inclinações) constante(s), ou com variações de inclinações constantes, em toda a faixa de seus decaimentos.

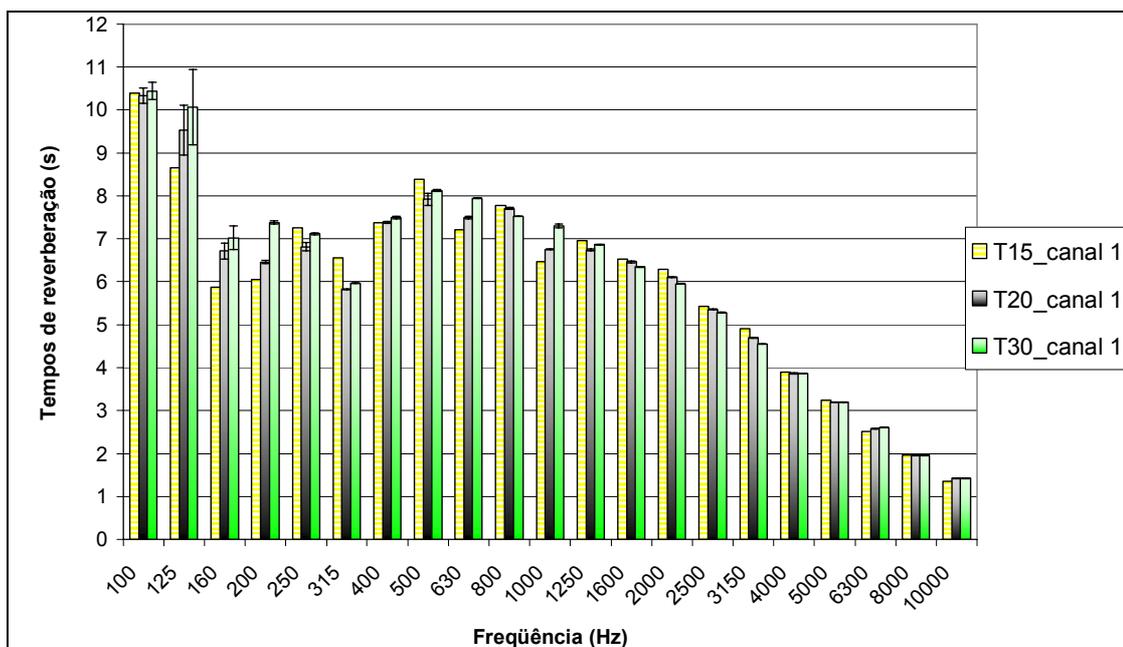


Figura 47 - Comparação entre os tempos de reverberação T_{15} , T_{20} e T_{30} obtidos a partir do mesmo conjunto de curvas de decaimentos. Câmara reverberante de 193 m^3 nominal do LVA-UFSC, fevereiro de 2005.

Esta investigação **não** teve um bom desempenho com relação à concordância entre os valores das diferenças entre os T_{15} , T_{20} e T_{30} e os desvios padrão experimentais que foram plotados através de barras de erros no gráfico da Figura 47. Sendo que as diferenças entre os tempos de reverberação T_{15} , T_{20} e T_{30} (em cada banda de terço de oitava) superaram significativamente os desvios padrão estimados individualmente para cada faixa de decaimento. De fato, em fevereiro de 2005 foram apenas quatro posições de microfones e uma posição de fonte sonora para determinação dos tempos de reverberação, com cinco decaimentos em cada posição de microfone(s), totalizando 20 decaimentos. Além disto, o gráfico comparativo da Figura 47 foi elaborado com os resultados de um canal de medição exclusivamente. De maneira que são resultados de apenas duas posições de microfone¹²⁷, e que têm características similares, haja vista os pequenos desvios padrão representados pelas barras de erros. Se estas últimas forem comparadas com as barras de erros na Figura 48, pode-se notar que os desvios padrão encontrados nas medições em duas posições de microfone (canal 1) são realmente pequenos.

¹²⁷ Duas posições de microfone, com cinco decaimentos em cada posição, totalizando 10 decaimentos. Apenas uma posição de fonte sonora.

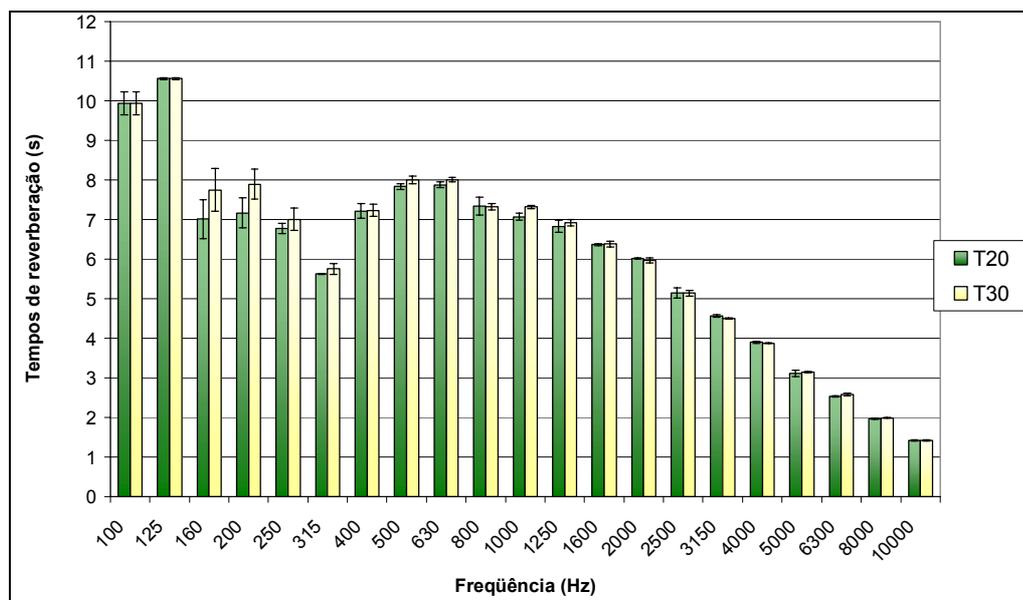


Figura 48 - Gráfico de barras dos tempos de reverberação T_{20} e T_{30} obtidos através do mesmo conjunto de curvas de decaimentos, e através do método de integração reversa. Uso do Software Pulse Labshop 9.0 para obtenção dos valores. Câmara reverberante de 193 m^3 nominal, fevereiro de 2005.

Os tempos de reverberação e os desvios padrão plotados no gráfico de barras da Figura 48 foram obtidos através dos resultados de quatro posições de microfone e uma de fonte sonora. O método de avaliação das curvas de decaimentos usado foi o método de integração reversa, implementado no software Pulse Labshop. Diferentemente dos tempos de reverberação da Figura 47 que foram obtidos por reta de mínimos quadrados calculados a partir de faixas das curvas de decaimentos. Devido ao número maior de posições de microfone(s), e distribuição destas, os desvios padrão representados pelas barras de erros na Figura 48 tiveram valores mais elevados. Considerando-se as amplitudes das barras e os desvios padrão relativos aos T_{20} e T_{30} representados na Figura 48, conclui-se que houve boa concordância entre estas duas faixas de avaliação dos tempos reverberação em praticamente todas as bandas de frequências.

Nota-se nos gráficos de barras das figuras 49 e 50 que houve concordância entre os tempos de reverberação obtidos através do método da integração reversa e através do método de reta de mínimos quadrados. Também houve boa concordância entre os tempos de reverberação T_{20} e T_{30} resultantes da avaliação por método dos mínimos quadrados, como se pode ver no gráfico da Figura 49.

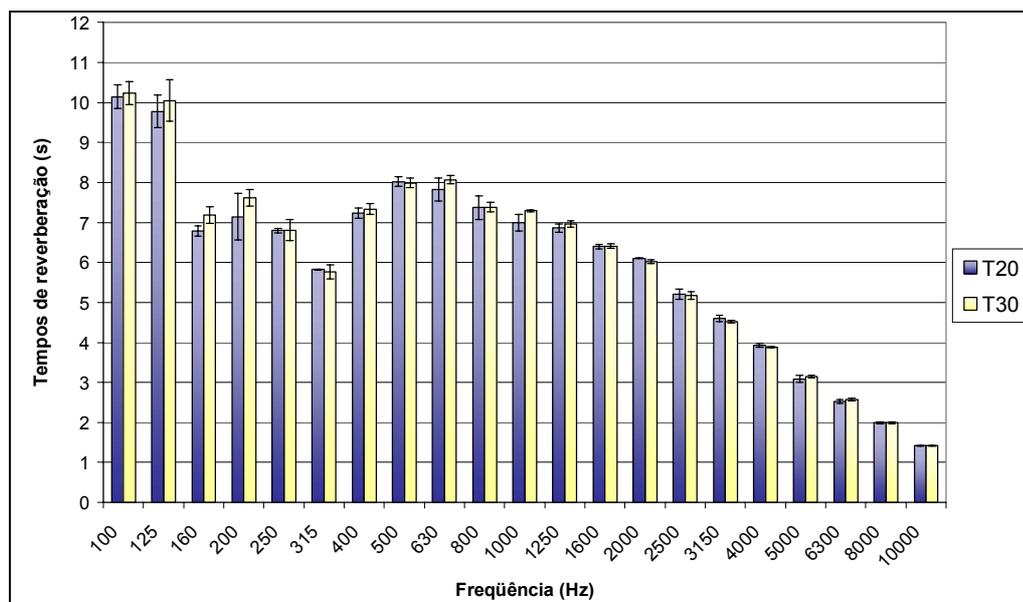


Figura 49 - Gráfico de barras dos tempos de reverberação T_{20} e T_{30} obtidos pelo método da interrupção do ruído. Avaliação dos decaimentos através de mínimos quadrados. Câmara reverberante de 193 m^3 , com cinco painéis de absorção sonora, fevereiro de 2005.

Os níveis de potência sonora globais, em dB e em dB(A), foram calculados a partir dos mesmos níveis de pressão sonora¹²⁸ medidos nos ensaios, porém com tempos de reverberação T_{15} , T_{20} e T_{30} obtidos das mesmas curvas de decaimentos. Os L_W globais da fonte sonora BK 4204 calculados com os tempos de reverberação T_{20} em fevereiro de 2005 foram: 94,71 dB e 94,34 dB(A). Além disto, foram calculados os L_W globais com os tempos de reverberação T_{15} de apenas duas posições de microfone (dez decaimentos) cujas curvas são as mesmas usadas para obter os T_{20} e T_{30} , porém um número menor de amostras; por isso usou-se a denominação “T15_canal 1” no gráfico da Figura 47. Ao se calcular os L_W globais a partir dos T_{15} obtiveram-se: 94,70 dB e 94,29 dB(A). Os valores correspondentes aos L_W globais usando-se T_{15} apresentaram boa concordância com os calculados com base em T_{20} , com diferenças da ordem de 0,01 dB e 0,05 dB(A).

As comparações entre os resultados de níveis de potência por bandas e globais podem ser vistos no gráfico de barras da Figura 50, onde os valores em dB dos L_W calculados a partir de T_{15} , T_{20} e T_{30} foram plotados. Os L_W globais calculados com base nos tempos de reverberação T_{30} , e com os mesmos níveis de pressão sonora L_p , resultaram em: 94,67 dB e 94,31 dB(A), o que demonstra concordância com os outros valores calculados, havendo diferenças da ordem de 0,04 dB e 0,03 dB(A).

As bandas de terço de oitava que apresentaram resultados com muito boa concordância entre os valores de L_W calculados a partir de T_{15} , T_{20} e T_{30} foram: 100 Hz, 400 Hz, 1250 Hz, 1600 Hz, 4 kHz, 6,3 kHz, e 8 kHz. A banda de 1250 Hz apresentou as maiores

¹²⁸ Médias energéticas no tempo e no espaço por bandas de terço de oitava.

quantidades de energia acústica. As barras de erros de “LwF (T20)” na Figura 50 são as estimativas das incertezas padrão dos tempos de reverberação (u_{Trev}). As estimativas de incertezas padrão u_{Trev} nas bandas de 160, 250, 315 e 2000 Hz ficaram muito aquém das diferenças entre os níveis de potência sonora calculados a partir de T_{15} , T_{20} e T_{30} .

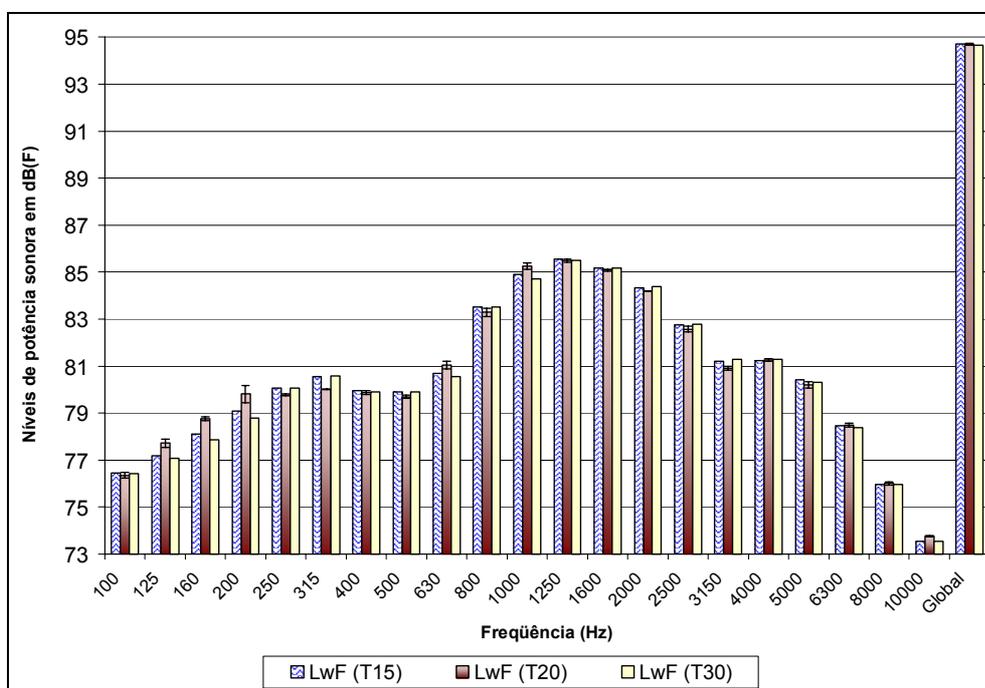


Figura 50 - Gráfico de barras; comparativo entre os níveis de potência sonora, em dB, calculados a partir dos valores dos tempos de reverberação T_{15} , T_{20} e T_{30} e os mesmos níveis de pressão sonora L_p . Câmara reverberante de 193 m³ LVA-UFSC, fonte sonora BK 4204, fevereiro de 2005.

4.1.7 Resultados antigos de determinação de potência sonora obtidos com fonte sonora BK 4204 no LVA-UFSC

Os resultados de dois ensaios anteriores executados em 2001, na câmara reverberante de 145 m³ e na câmara semi-aneecóica, são apresentados na Tabela 4.40. Além destes resultados foram apresentados os valores declarados pelo fabricante; Brüel & Kjør. Os valores de níveis de potência fornecidos na carta de calibração do fabricante são antigos, de décadas, além de serem dados em função de algumas correções relativas à tensão elétrica da rede e frequências (50 ou 60 Hz) de alimentação da fonte sonora BK 4204. De qualquer maneira são dados que podem interessar do ponto de vista de comparação entre diversos valores obtidos experimentalmente.

Tabela 4.40 - Níveis de potência sonora em dB(A) da fonte sonora BK 4204 obtidos em 2001 no LVA-UFSC (câmara reverberante *antes da reforma* (143,2 m³) e câmara semi-aneecóica), e valores fornecidos pelo fabricante; Brüel & Kjær.

Níveis de potência sonora em dB(A)											
Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
Reverberante	55,8	57,9	62,6	66,6	70,1	71,5	73,8	76,0	78,4	82,6	84,2
Semi-aneecóica	58,8	61,3	64,6	67,8	71,5	73,1	74,3	76,0	78,0	82,1	83,8
Fabricante	58,8	63,4	65,9	68,8	71,4	74,1	75,0	77,1	78,6	83,1	84,5
Frequência (Hz)	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	Global
Reverberante	86,0	86,1	85,9	84,3	82,8	82,5	81,2	78,6	75,9	70,6	94,31
Semi-aneecóica	86,7	86,1	85,7	82,3	80,1	81,7	81,6	79,6	76,2	73,2	94,05
Fabricante	86,2	86,0	85,9	84,2	83,5	83,4	82,5	80,6	78,5	75,3	94,77

Volume da câmara reverberante do LVA em 2001: $V = 143,2 \text{ m}^3$; superfície: $S = 186,6 \text{ m}^2$. Valores aproximados.

Câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC.

Fabricante da fonte sonora: Brüel & Kjær, Dinamarca.

Os valores de níveis de potência sonora apresentados na Tabela 4.40 são dados com uma casa decimal apenas, exceto os valores globais que foram recalculados e apresentados com duas casas decimais. De qualquer forma, estes últimos apresentaram diferenças significativas, principalmente se comparados com as diferenças entre os resultados obtidos nos ensaios mais atuais. Ao se analisarem as bandas de terço de oitava de 1000 a 2500 Hz, nota-se que em 1600 e 2000 Hz ocorreram boas concordâncias entre os valores, diferentemente das bandas de 1000 e 1250 Hz nas quais ocorreram diferenças da ordem de 0,7 dB; e banda de 2500 Hz, com diferenças de até 2,0 dB. Estas diferenças podem ser visualizadas no gráfico de barras da Figura 51 que é apenas a representação dos valores da Tabela 4.40.

De maneira parecida ao ocorrido na comparação dada na Figura 40 da Subseção 4.1.5.1, os níveis de potência sonora em altas frequências resultaram mais elevados no ensaio realizado em câmara semi-aneecóica; ver Figura 51. Também nas bandas de baixas frequências ocorreram resultados mais elevados a partir do ensaio em câmara semi-aneecóica. Isto também ocorreu na comparação entre resultados de câmaras reverberantes e semi-aneecóica analisada na Subseção 4.1.5.1.

Os cálculos e valores intermediários usados para obtenção destes resultados **não** estão disponíveis. Portanto surgem questões tais como: quais foram as correções das curvas de microfone(s) usadas e quantas foram as amostras medidas. De fato, a falta de informação traz mais dúvida com relação à qualidade metrológica destes resultados. Além de **não** ser possível calcular as estimativas de incertezas padrão de ensaios antigos, pois não há disponibilidade de todos os dados necessários.

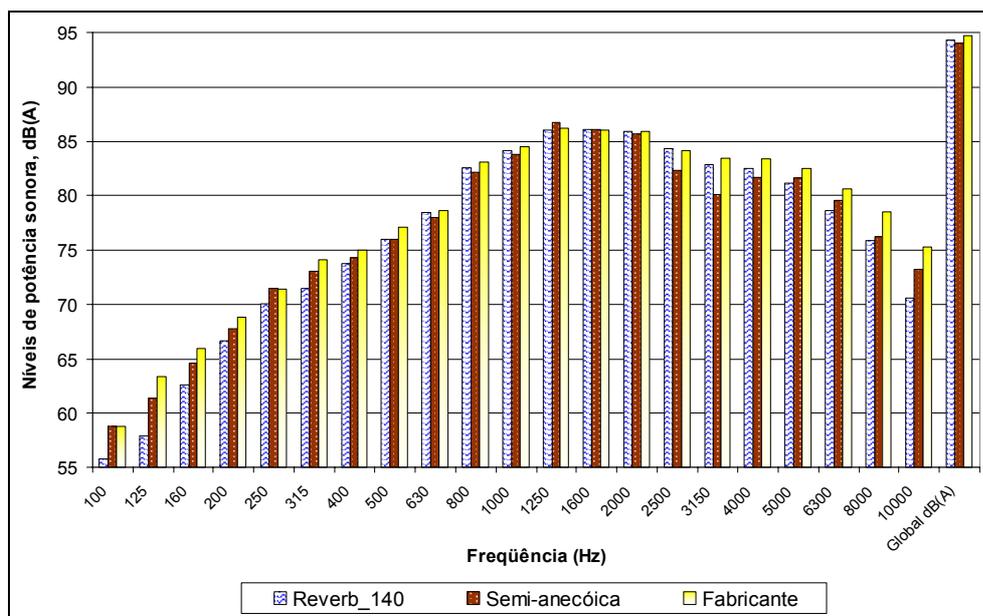


Figura 51 - Gráfico de barras. Comparações entre os níveis de potência sonora, em dB(A), obtidos nas câmaras acústicas do LVA-UFSC com a fonte sonora BK 4204 no ano de 2001, e valores fornecidos pelo fabricante da fonte sonora. Antiga câmara reverberante de 140 m³ nominal e câmara semi-aneecóica.

4.2 Medições com fonte sonora de referência BK 4204 no LAENA-INMETRO

O Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) situado em Xerém, município de Duque de Caxias no Estado do Rio de Janeiro, é um conjunto de laboratórios atuantes na área de metrologia. Estes laboratórios fazem parte da infra-estrutura do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Um destes laboratórios é voltado para pesquisas e prestação de serviços na área de ensaios acústicos; o LAENA¹²⁹. A fonte sonora padrão de referência do LVA-UFSC, citada na Subseção 4.1.1, foi levada¹³⁰ ao LAENA para determinação dos níveis de potência sonora. Deste modo foi possível desenvolver uma comparação bilateral de potência sonora.

4.2.1 Equipamentos e métodos de medição utilizados no LAENA-INMETRO

Para as medições de níveis de pressão sonora e tempos de reverberação no LAENA-INMETRO foram usados os seguintes equipamentos: Analisador dinâmico de sinais

¹²⁹ LAENA - Laboratório de Ensaio Acústico. Divisão de Acústica e Vibrações (DIAVI); INMETRO.

¹³⁰ Durante os meses de setembro, outubro e início de novembro de 2005.

Norsonic 840, pré-amplificador de meia polegada, multiplexador Larson Davis modelo 2210, *boom rotate (turn table)* Brüel & Kjær) com haste para movimentação de microfone, seis microfones de medição capacitivos Brüel & Kjær modelo BK 4134, e um microfone BK 4180, calibrador de nível sonoro BK 4231, termo-higrômetro Vaisala modelo HM34, medidor de velocidade de rotação estroboscópico GenRad 1546 Strobotac® *digital stroboscope*; duas fontes sonoras de referência BK 4204 do INMETRO e a fonte BK 4204 do LVA-UFSC; amplificador de potência de áudio Vortex 2.6 (feito sob encomenda); dodecaedro (fonte sonora eletroacústica). Também foram levados para o LAENA: o calibrador de nível sonoro Larson Davis CAL250 e o termo-higrômetro MT-242 ambos de propriedade do LVA-UFSC. Foram feitas algumas comparações com estes últimos e os equipamentos do LAENA-INMETRO. Os seis microfones modelo BK 4134 foram calibrados para resposta em campo difuso segundo a norma internacional IEC 61183 (também denominada IEC 1183).

Um microfone modelo BK 4180 foi usado como o padrão na calibração dos seis microfones em campo difuso na câmara reverberante do LAENA-INMETRO. A pressão atmosférica (barométrica) foi estimada com base nos dados fornecidos pelo site do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

As medições para a determinação dos níveis de potência sonora foram executadas segundo a norma internacional ISO 3741 de 1999, e as calibrações dos microfones de medição em campo sonoro difuso de acordo com a norma IEC 61183 de 1994.

4.2.1.1 Correções das curvas de respostas dos microfones

Alguns tópicos sobre os métodos de calibração de microfones em campo sonoro difuso foram apresentados na Subseção 4.1.1.1. As calibrações dos seis microfones efetuadas no LAENA, no contexto deste trabalho, seguiram as condições estabelecidas na norma IEC 61183 de 1994, especialmente as Subseções 5.1, 5.2, 5.5, 5.6, B.1, B.4 e B.5 da norma.

O microfone modelo BK 4180 é considerado um LS2aP; microfone padrão laboratorial de meia polegada projetado para campo sonoro de pressão. No experimento citado no anexo B da norma IEC 61183 de 1994 (Subseção B.5) o microfone modelo BK 4180 é citado como sendo o microfone sob teste para obtenção dos valores da sua Tabela B.1; valores de Δ_{DP} . Segundo a mesma norma, no seu anexo B e Subseção B.4.1, “Se um microfone tipo LS2aP ou LS2F for usado como referência, as *diferenças entre os níveis de sensibilidade de campo difuso e de campo de pressão* Δ_{DP} podem ser obtidas da Tabela B.1”. A Tabela B.1 da norma foi

reproduzida parcialmente através da Tabela 4.1 na Subseção 4.1.1.1, onde se encontram os valores de Δ_{DP} citados na norma.

A partir das considerações da norma IEC 61183:1994, é necessário conhecer a resposta em **campo sonoro de pressão** do microfone usado como padrão (neste caso um BK 4180) representada pelo símbolo $G_{P,ref}$. Esta sensibilidade foi dada em dB relativo a 1 V/Pa. Também é necessário efetuar medições em campo difuso¹³¹ para obter os níveis de pressão sonora denominados $L_{D,ref}$ e L_D , que são os níveis de pressão sonora medidos com o microfone considerado padrão (referência), e com o(s) microfone(s) a calibrar, respectivamente. Das diferenças entre estes últimos são calculados os ΔG_D por bandas de terço de oitava; ver Equação 4.6 rerepresentada a seguir. O parâmetro ΔG_D representa a diferença de sensibilidade do(s) microfone(s) sob teste e o microfone padrão em **campo sonoro difuso**. Para obter a sensibilidade em campo difuso G_D do(s) microfone(s) sob teste é necessário utilizar a Equação 4.7 rerepresentada a seguir. Porém os valores de G_D são obtidos em dB relativo a 1 V/Pa e, para utilização prática, ainda é necessário transformar cada valor em dB relativo à banda de 1 kHz. Isto devido ao calibrador de nível sonoro, que gera o sinal padrão na frequência de 1 kHz. Esta mudança de referência em dB é feita através da Equação 4.47.

Para cada banda de frequência, a diferença entre os níveis de sensibilidade de campo difuso, ΔG_D , é dada, em decibéis, por:

$$\Delta G_D = L_D - L_{D,ref} \quad (4.6)$$

onde: L_D é o nível de pressão sonora indicado pelo medidor de nível sonoro sob teste, em decibéis; $L_{D,ref}$ é o nível de pressão sonora indicado pelo medidor de nível sonoro de referência, em decibéis.

A Equação 4.7 corresponde a Equação 11 da norma IEC 61183:

$$G_D = \Delta G_D + (G_{P,ref} + \Delta_{DP}) \quad (4.7)$$

$$C_f = G_{D_1kHz} - G_{D,f} \quad (4.47)$$

onde C_f são as correções por bandas de terço de oitava, em dB, que foram aplicadas (somadas) aos níveis de pressão sonora obtidos pelos seis microfones usados no LAENA-INMETRO, nas medições com a fonte sonora BK 4204. G_{D_1kHz} é a sensibilidade em dB relativo a 1 V/Pa na

¹³¹ Em câmara reverberante com fonte sonora banda larga; preferencialmente com duas fontes sonoras para tornar o campo sonoro mais difuso.

banda de 1 kHz. E $G_{D,f}$ são as sensibilidades em dB relativo à 1 V/Pa de cada banda de terço de oitava, que foram calculadas a partir da Equação 4.7.

4.2.1.2 Câmara reverberante utilizada no LAENA-INMETRO

A câmara reverberante do LAENA-INMETRO que foi usada nos ensaios com a fonte sonora aerodinâmica do LVA-UFSC tem volume estimado em 197 m³ e área da superfície interna de 208,3 m². As estimativas das incertezas destas medições dimensionais foram arbitradas em: 1 m³ para a medição do volume da câmara, e 1 m² associado ao resultado da medição de área de superfície interna da câmara reverberante.

Para efetuar as medições desta câmara reverberante foi necessário utilizar métodos de *CAD – Computer Aided Design* – pois o formato **não** é retangular; diferentemente das câmaras reverberantes do LVA que são retangulares. Sendo que o formato inclui paredes não paralelas e formatos irregulares.

4.2.2 Métodos de cálculos usados para estimar as incertezas

Os métodos usados para estimar as incertezas padrão das medições com a fonte sonora BK 4204 no LAENA-INMETRO foram os mesmos apresentados na Subseção 4.1.2. Além daquelas estimativas, também foram calculadas as incertezas com base em *desvios padrão experimentais da média*, $s(\bar{q})$. O desvio padrão da média é calculado através da raiz quadrada positiva da variância experimental da média, ver Equação 4.48:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (4.48)$$

onde $s^2(\bar{q})$ é a variância experimental da média.

Foram calculados os números de graus de liberdade ν (lê-se “ni”), ou *G.L.*, em algumas etapas dos cálculos das incertezas padrão dos parâmetros de entrada da determinação dos níveis de potência sonora.

4.2.3 Resultados experimentais e incertezas de medição obtidos com a fonte sonora BK 4204 no LAENA-INMETRO

As incertezas inerentes, ou atribuídas à cadeia de medição usada nas medições no LAENA-INMETRO, foram estimadas a partir de dados encontrados no site do próprio INMETRO. O objetivo era estimar a incerteza padrão da cadeia de medição u_{ccm} através da combinação de incertezas consideradas de caráter aleatório, não computando a incerteza relacionada com a deriva do calibrador de nível sonoro. Foram computadas as incertezas atribuídas ao calibrador de nível sonoro, do analisador de sinais, do(s) microfone(s) de medição (da curva de resposta em pressão e da correção para campo sonoro difuso). As incertezas inerentes ao pré-amplificador de medição não foram consideradas, presumindo-se que as contribuições de incertezas são relativamente muito baixas e não fariam diferença significativa. O balanço de incertezas da cadeia de medição elaborado para este ensaio é apresentado na Tabela 4.41.

Pode-se notar na Tabela 4.41 que as incertezas estimadas para a cadeia de medição são função da banda de frequência considerada, e aumentam ligeiramente em altas frequências. As estimativas de incertezas de microfone de medição foram feitas com ajuda de especialista da área de calibração de microfones¹³² e com base em valores declarados pelo INMETRO e PTB (laboratório metrológico da Alemanha).

Tabela 4.41 - Balanço de incertezas para a cadeia de medição utilizada no LAENA-INMETRO para executar as medições de níveis de pressão sonora; outubro 2005.

Símbolo da incerteza padrão	Faixa frequência (kHz)	Valor bruto (dB)	Divisor	Incerteza padrão (dB)	Fonte de incerteza
u_{cal}	0,1 a 10	0,1	2,0	0,05	Calibrador sonoro
$u_{Norsonic}$	0,1 a 10	0,2	2,0	0,1	Analisador Norsonic 840
u_{corr}	0,1 a 10	0,04	2,0	0,02	Correção microfone: campo de pressão para campo difuso
$u_{mic_pressão}$	0,1 a 1,6	0,05	2,0	0,025	Curva de resposta do microfone em campo de pressão
	2 a 3,15	0,07	2,0	0,035	
	4 a 10	0,12	2,0	0,060	
u_{ccm}	0,1 a 1,6			0,116	Incerteza padrão combinada estimada para a cadeia de medição
	2 a 3,15			0,119	
	4 a 10			0,128	

¹³² Zemar Soares (INMETRO).

4.2.3.1 Medição dos níveis de pressão sonora, câmara reverberante do LAENA-INMETRO

Através de seis microfones também foram medidos os NPS na câmara reverberantes com a presença da fonte sonora de referência BK 4204 (do LVA-UFSC) que foi levada ao LAENA-INMETRO. Foram quatro conjuntos de medições em condições de repetitividade, sendo quatro posições de fonte sonora, e um total de vinte e quatro amostras de L_p em cada banda de frequência de terço de oitava. A fonte sonora foi energizada com 220 volts (60 Hz) da rede elétrica do laboratório, de forma similar ao procedimento que foi feito no LVA-UFSC.

A velocidade de rotação foi medida através de medidor digital com luz estroboscópica, apresentando velocidade do rotor da fonte sonora estimada na faixa de 3.202 a 3.204 rpm. Valores admitidos: volume da câmara reverberante de 197 m^3 , superfície interna da câmara de $208,3 \text{ m}^2$, temperatura no interior da câmara estimada em $\theta = 26,4 \text{ }^\circ\text{C}$, pressão atmosférica $B = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$. A velocidade do som para a temperatura medida foi estimada em $c = 346,9 \text{ m/s}$.

Os níveis de pressão sonora foram medidos e os resultados corrigidos¹³³ em função das respostas dos seis microfones em campo difuso que foram obtidas segundo os procedimentos expostos na Subseção 4.2.1.1. As correções dos microfones em campo difuso não são apresentadas. Os valores na Tabela 4.42 são de L_p (média energética) já corrigidos em função das respostas dos microfones usados no LAENA-INMETRO. Existem alguns símbolos na Tabela 4.42, tais como: F1 que diz respeito à posição da fonte sonora (posição 1) e SM que diz respeito aos *desvios padrão dos valores obtidos com os microfones* (desvio padrão de seis amostras, cada uma proveniente de um microfone).

Em todas as bandas de terço de oitava apresentadas na Tabela 4.42 notam-se as variações entre os valores dos desvios padrão. Os desvios padrão de cada conjunto de seis amostras e do conjunto de vinte e quatro amostras (total) apresentam valores diferentes, o que era esperado pelo fato de serem resultados experimentais. Isto é um exemplo do que o *Guia para a Expressão de Incerteza de Medição* (2003) denomina *incerteza da incerteza* se referindo às variações de valores obtidos através de avaliações Tipo A da incerteza.

¹³³ Medições e correções executadas por Marco Nabuco de Araújo, Paulo Massarani (INMETRO) e com participação do autor desta tese.

Tabela 4.42 - Níveis de pressão sonora L_p (corrigidos) e desvios padrão experimentais. Valores em dB. Medições com conjunto de seis microfones, quatro posições de fonte sonora BK 4204, total de 24 amostras. Câmara reverberante de 197 m³ do LAENA-INMETRO; outubro 2005.

Frequência central da banda (Hz)	Níveis de pressão sonora [corrigidos] (dB); 4 posições de fonte sonora				Desvios padrão (dB). De seis amostras (seis microfones), quatro posições de fonte sonora				Média de 24 amostras	Desvio padrão de 24 amostras
	Lp1	Lp2	Lp3	Lp4	F1 _{SM}	F2 _{SM}	F3 _{SM}	F4 _{SM}	Lp dB	
100	71,21	71,48	69,93	72,66	1,85	1,71	1,81	2,63	71,43	2,104
125	70,93	71,81	73,32	71,72	0,68	1,13	0,86	0,74	72,03	1,195
160	75,41	74,25	74,94	74,04	0,46	0,81	0,94	1,14	74,69	1,003
200	75,24	76,17	75,75	75,72	0,37	0,65	0,54	0,58	75,73	0,604
250	77,97	77,39	77,65	77,64	0,51	0,67	0,23	0,52	77,67	0,520
315	78,14	78,38	78,11	78,17	0,35	0,59	0,30	0,26	78,20	0,381
400	77,67	77,82	77,91	77,47	0,44	0,23	0,24	0,15	77,72	0,316
500	78,15	77,95	78,00	77,80	0,33	0,39	0,54	0,38	77,97	0,409
630	78,81	78,86	78,84	78,81	0,23	0,28	0,44	0,20	78,83	0,282
800	81,42	81,69	81,68	81,57	0,20	0,30	0,29	0,18	81,59	0,255
1000	82,55	82,71	82,77	82,47	0,22	0,25	0,18	0,10	82,63	0,219
1250	83,45	83,60	83,47	83,33	0,24	0,27	0,27	0,14	83,46	0,239
1600	82,95	82,99	82,99	82,84	0,12	0,23	0,10	0,18	82,94	0,165
2000	82,10	82,07	82,04	82,05	0,10	0,27	0,08	0,15	82,07	0,157
2500	80,14	80,04	80,20	80,08	0,17	0,18	0,23	0,08	80,12	0,171
3150	78,00	77,97	78,00	77,95	0,12	0,24	0,15	0,13	77,98	0,157
4000	77,33	77,39	77,48	77,35	0,14	0,30	0,23	0,16	77,39	0,210
5000	75,87	75,81	75,86	75,79	0,19	0,35	0,22	0,20	75,83	0,232
6300	73,23	73,12	73,29	73,23	0,25	0,34	0,27	0,34	73,22	0,290
8000	69,95	69,89	70,07	69,99	0,39	0,45	0,42	0,52	69,97	0,423
10000	66,44	66,31	66,53	66,52	0,55	0,55	0,58	0,77	66,45	0,585

4.2.3.2 Medição dos tempos de reverberação, câmara do LAENA-INMETRO

Os tempos de reverberação foram medidos por seis microfones em posições aleatórias na câmara reverberante do LAENA-INMETRO, com três medições repetitivas, totalizando dezoito amostras de T_{rev} para cada banda de terço de oitava na faixa de 100 Hz a 10 kHz. A faixa de avaliação das curvas de decaimento foi de 15 dB, o que forneceu valores denominados T_{15} . Duas análises de incertezas foram desenvolvidas, uma usando valores de desvios padrão das dezoito amostras, e outra usando os desvios padrão experimental da média das mesmas amostras. Os valores destes parâmetros são apresentados na Tabela 4.43. Os desvios experimentais da média foram calculados de acordo com a Equação 4.39, da Subseção 4.2.2, na verdade, a partir da raiz quadrada da variância experimental da média apresentada naquela equação.

Tabela 4.43 - Tempos de reverberação, T_{15} em segundos, medidos na câmara do LAENA-INMETRO, seis microfones, três posições de fonte sonora eletroacústica, total de 18 amostras. Desvios padrão, desvios experimentais da média, e uma medição de T_{15} adicional. Outubro 2005.

Frequência central da banda (Hz)	T_{15} , média de 18 amostras (s)	Desvio padrão das 18 amostras de T_{15} (s)	Desvio padrão experimental da média das 18 amostras de T_{15} (s)	T_{15} em 21 de outubro de 2005 (s)
		S	S/\sqrt{n}	
100	4,20	0,697	0,164	4,12
125	3,61	0,718	0,169	3,74
160	4,25	0,413	0,097	4,12
200	4,47	0,646	0,152	4,55
250	4,78	0,381	0,090	5,01
315	5,10	0,348	0,082	5,50
400	5,34	0,396	0,093	5,50
500	5,56	0,355	0,084	5,60
630	5,67	0,193	0,045	5,62
800	5,48	0,344	0,081	5,55
1000	5,30	0,253	0,060	5,35
1250	5,13	0,202	0,048	5,26
1600	4,90	0,227	0,054	5,03
2000	4,51	0,146	0,034	4,50
2500	3,98	0,109	0,026	3,97
3150	3,42	0,112	0,026	3,40
4000	2,81	0,090	0,021	2,81
5000	2,21	0,053	0,013	2,23
6300	1,70	0,047	0,011	1,71
8000	1,25	0,038	0,009	1,24
10000	0,90	0,027	0,006	0,88

O número de amostras de tempos de reverberação (n) foi igual a dezoito, portanto os desvios padrão experimentais da média resultaram cerca de quatro vezes menores que os desvios padrão experimentais; ver Tabela 4.43. E como foram feitos dois tipos de balanços de incertezas (duas abordagens de cálculos), o impacto destas considerações pode ser visto nas estimativas de incertezas padrão combinadas. O símbolo S representa *desvio padrão experimental*, e S/\sqrt{n} indica que os valores são *desvios padrão experimentais da média*; ver Tabela 4.43.

4.2.3.3 Níveis de potência sonora calculados no LAENA-INMETRO

Os níveis de potência sonora L_W calculados conforme a norma ISO 3741 de 1999 são apresentados na Tabela 4.44. Os valores dados em dB e dB(A) são resultantes de uma bateria de ensaios executada em outubro de 2005, e os valores dados apenas em dB(A) foram obtidos em novembro de 2005; denominados " $L_W(04/nov.)$ ". Estes últimos foram fornecidos sem detalhes dos cálculos, portanto não é possível calcular as respectivas incertezas padrão.

De forma similar aos resultados dos ensaios realizados no LVA-UFSC, as bandas de níveis de potência sonora mais elevados estão localizadas entre 1250 e 2000 Hz e adjacentes.

Tabela 4.44 - Níveis de potência sonora calculados a partir dos T_{15} e L_p medidos no LAENA-INMETRO. Valores de L_{WF} em dB; L_{WA} em dB(A), entre 100 Hz e 10 kHz. Medição extra L_W (04/nov.). Câmara reverberante de 197 m³, outubro e novembro de 2005.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
L_{WF} dB	75,75	76,76	78,41	79,03	80,50	80,60	79,79	79,78	80,47	83,32	84,46
L_{WA} dB(A)	56,65	60,66	65,01	68,13	71,90	74,00	74,99	76,58	78,57	82,52	84,46
L_W (04/nov.) dB(A)	56,62	60,73	64,78	68,07	71,75	73,95	75,28	76,67	78,58	82,52	84,38
Frequência (Hz)	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	Global
L_{WF} dB	85,40	85,05	84,53	83,12	81,65	81,94	81,48	80,10	78,32	76,42	94,87
L_{WA} dB(A)	86,00	86,05	85,73	84,42	82,85	82,94	81,98	80,00	77,22	73,92	94,53
L_W (04/nov.) dB(A)	85,96	85,99	85,78	84,40	82,81	82,88	81,97	79,91	77,13	73,86	94,50

Volume da câmara reverberante: 197 m³; superfície: 208,3 m²; temperatura: 26,4 °C; pressão atmosférica: 1,013 . 10⁵ Pa. Fonte sonora BK 4204 do LVA-UFSC, velocidade de rotação medida: 3204 rpm; tensão de alimentação: 220 V / 60 Hz.

4.2.3.4 Detalhamento das estimativas de fontes de incertezas

Nesta etapa foram quantificadas as incertezas padrão tanto a partir de desvios padrão experimentais quanto a partir de desvios padrão experimentais da média. As estimativas de incertezas experimentais X_{Lp} e de X_{Trev} tiveram que ser representadas por X_{Lp_1} , X_{Lp_2} , X_{Trev_1} e X_{Trev_2} , para distinguir entre as estimativas baseadas em desvios padrão experimentais (índice 1) e desvios padrão experimentais da média (índice 2); ver Tabelas 4.45 e 4.46. As incertezas padrão tiveram que ser indexadas da mesma forma para haver distinção entre as duas abordagens de cálculos de incertezas aqui investigadas. Foram calculados os números de graus de liberdade efetivos (G.L.) através da equação de Welch-Satterthwaite.

As incertezas padrão u_{Lp_1} foram baseadas nos *desvios padrão experimentais* dados por X_{Lp_1} , e calculadas através da Equação 4.49. De forma diferente das incertezas padrão u_{Lp_2} que foram baseadas nos *desvios padrão experimentais da média* dados por X_{Lp_2} , e calculadas através da Equação 4.50.

$$u_{Lp_1} = (X_{Lp_1}^2 + u_{ccm}^2) \cdot c_1 / d_{Lp} \quad (4.49)$$

$$u_{Lp_2} = (X_{Lp_2}^2 + u_{ccm}^2) \cdot c_1 / d_{Lp} \quad (4.50)$$

Nas bandas de terço de oitava de 1000 a 2500 Hz os valores das incertezas padrão u_{Lp_1} foram aproximadamente o dobro dos respectivos valores de u_{Lp_2} . Isto demonstra a diferença significativa entre as duas abordagens de cálculos de incertezas. As diferenças entre os

números de graus de liberdade atribuídos a estas incertezas¹³⁴ é muito elevado; para u_{Lp_1} ocorreram valores entre 23 e 56, enquanto que os números de graus de liberdade de u_{Lp_2} variam entre 26 a 4962.

Os valores estimados para as incertezas padrão dos tempos de reverberação, $u_{Trev_1}(L_W)$ e $u_{Trev_2}(L_W)$ em dB, apresentaram diferenças elevadas. As incertezas $u_{Trev_1}(L_W)$ resultaram cerca de quatro vezes e meia mais elevadas em relação à $u_{Trev_2}(L_W)$. Isto é devido ao valor da raiz quadrada do número de amostras; raiz quadrada de dezoito.

Tabela 4.45 - Estimativas das incertezas dos níveis de pressão sonora, X_{Lp_1} e X_{Lp_2} , utilizando os **desvios padrão** e os **desvios padrão experimental da média**, provenientes dos valores medidos. Coeficiente de sensibilidade c_1 , divisor d_{Lp} , incertezas padrão u_{Lp} e estimativas dos números de graus de liberdade (G.L.). Câmara reverberante de 197 m³ LAENA-INMETRO, outubro 2005.

Frequência (Hz)	u_{ccm} (dB)	X_{Lp_1} (s)	G.L.	X_{Lp_2} (s)	G.L.	c_1	d_{Lp}	u_{Lp_1} (dB)	G.L.	u_{Lp_2} (dB)	G.L.
100	0,116	2,104	23	0,429	23	1,0	1,0	2,107	23	0,445	26
125	0,116	1,195	23	0,244	23	1,0	1,0	1,201	23	0,270	34
160	0,116	1,003	23	0,205	23	1,0	1,0	1,010	23	0,236	40
200	0,116	0,604	23	0,123	23	1,0	1,0	0,615	24	0,169	82
250	0,116	0,520	23	0,106	23	1,0	1,0	0,533	25	0,157	111
315	0,116	0,381	23	0,078	23	1,0	1,0	0,399	27	0,140	240
400	0,116	0,316	23	0,065	23	1,0	1,0	0,337	29	0,133	415
500	0,116	0,409	23	0,083	23	1,0	1,0	0,425	26	0,143	199
630	0,116	0,282	23	0,058	23	1,0	1,0	0,305	31	0,130	591
800	0,116	0,255	23	0,052	23	1,0	1,0	0,280	33	0,127	827
1000	0,116	0,219	23	0,045	23	1,0	1,0	0,248	37	0,125	1395
1250	0,116	0,239	23	0,049	23	1,0	1,0	0,266	35	0,126	1023
1600	0,116	0,165	23	0,034	23	1,0	1,0	0,202	51	0,121	3802
2000	0,119	0,157	23	0,032	23	1,0	1,0	0,197	56	0,123	4962
2500	0,119	0,171	23	0,035	23	1,0	1,0	0,208	50	0,124	3677
3150	0,119	0,157	23	0,032	23	1,0	1,0	0,197	56	0,123	4962
4000	0,128	0,210	23	0,043	23	1,0	1,0	0,246	43	0,135	2309
5000	0,128	0,232	23	0,047	23	1,0	1,0	0,265	39	0,137	1605
6300	0,128	0,290	23	0,059	23	1,0	1,0	0,317	32	0,141	752
8000	0,128	0,423	23	0,086	23	1,0	1,0	0,442	27	0,155	237
10000	0,128	0,585	23	0,119	23	1,0	1,0	0,599	25	0,175	106

¹³⁴ O número de graus de liberdade atribuído à u_{ccm} é “infinito”.

Tabela 4.46 - Incertezas dos tempos de reverberação, X_{Trev_1} e X_{Trev_2} , estimadas através dos **desvios padrão e desvios padrão experimental da média**, provenientes dos valores medidos. Coeficiente de sensibilidade c_2 , divisor d_{Trev} , e incertezas padrão. Câmara reverberante de 197 m³ LAENA-INMETRO, outubro 2005.

Frequência (Hz)	X_{Trev_1} (s)	X_{Trev_2} (s)	c_2 (dB/s)	d_{Trev}	$u_{Trev_1}(L_w)$ [dB]	$u_{Trev_2}(L_w)$ [dB]	Graus de liberdade
100	0,697	0,164	-1,07	1,0	0,75	0,176	17
125	0,718	0,169	-1,25	1,0	0,90	0,212	17
160	0,413	0,097	-1,06	1,0	0,44	0,103	17
200	0,646	0,152	-1,00	1,0	0,65	0,153	17
250	0,381	0,090	-0,94	1,0	0,36	0,084	17
315	0,348	0,082	-0,88	1,0	0,31	0,072	17
400	0,396	0,093	-0,84	1,0	0,33	0,078	17
500	0,355	0,084	-0,80	1,0	0,29	0,067	17
630	0,193	0,045	-0,79	1,0	0,15	0,036	17
800	0,344	0,081	-0,81	1,0	0,28	0,066	17
1000	0,253	0,060	-0,84	1,0	0,21	0,050	17
1250	0,202	0,048	-0,87	1,0	0,18	0,041	17
1600	0,227	0,054	-0,91	1,0	0,21	0,049	17
2000	0,146	0,034	-1,00	1,0	0,15	0,034	17
2500	0,109	0,026	-1,13	1,0	0,12	0,029	17
3150	0,112	0,026	-1,33	1,0	0,15	0,035	17
4000	0,090	0,021	-1,63	1,0	0,15	0,035	17
5000	0,053	0,013	-2,10	1,0	0,11	0,026	17
6300	0,047	0,011	-2,79	1,0	0,13	0,031	17
8000	0,038	0,009	-3,90	1,0	0,15	0,035	17
10000	0,027	0,006	-5,64	1,0	0,15	0,035	17

Foram atribuídos os valores $X_V = 1,0 \text{ m}^3$ e $X_S = 1,0 \text{ m}^2$, para estimar as incertezas relacionadas com as medições de volume e área de superfície da câmara reverberante do LAENA-INMETRO (ver Tabela 4.47).

Os pequenos valores de $u_i(L_w)$ e $u_i(L_w)$, da ordem de 0,006 dB nas bandas de 1250 a 2500 Hz, produzem as contribuições de incertezas pouco significativas das medições de temperatura ambiente e frequências centrais das bandas de terço de oitavas. Estes valores são apresentados na Tabela 4.48. Enfatizando-se que as estimativas de incertezas das frequências centrais das bandas de terço de oitava são *superdimensionadas*. As variações de temperatura ambiente no LAENA-INMETRO e incerteza do termômetro utilizado foram estimadas em $X_t = 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Apesar disto, pode ter havido variações maiores devido ao fato de que a câmara reverberante fica fechada e a(s) fonte(s) sonora(s) e lâmpadas, dentre outros equipamentos, geram calor naquele ambiente fechado. A temperatura final do ensaio alcançou 26,4 °C, além dos $23,0 \pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ que eram esperados.

As equações utilizadas para calcular os coeficientes de sensibilidade c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 , c_6 e c_7 são apresentados nas Subseções 4.1.3.1.2 e 4.1.4.1.2.

Tabela 4.47 - Estimativas de incertezas padrão relativas ao volume da câmara reverberante, u_v . E estimativas de incertezas padrão, u_s , relativas à área da superfície interna da câmara reverberante de 197 m³ nominal do LAENA-INMETRO.

Frequência central (Hz)	X_V (m ³)	c_3 (dB/m ³)	d_V	$u_v(L_w)$ [dB]	X_S (m ²)	c_4 (dB/m ²)	d_S	$u_s(L_w)$ [dB]
100	1,0	0,0164	1,0	0,016	1,0	0,0058	1,0	0,006
125	1,0	0,0175	1,0	0,018	1,0	0,0047	1,0	0,005
160	1,0	0,0184	1,0	0,018	1,0	0,0039	1,0	0,004
200	1,0	0,0191	1,0	0,019	1,0	0,0032	1,0	0,003
250	1,0	0,0198	1,0	0,020	1,0	0,0026	1,0	0,003
315	1,0	0,0204	1,0	0,020	1,0	0,0020	1,0	0,002
400	1,0	0,0209	1,0	0,021	1,0	0,0016	1,0	0,002
500	1,0	0,0212	1,0	0,021	1,0	0,0012	1,0	0,001
630	1,0	0,0216	1,0	0,022	1,0	0,0009	1,0	0,001
800	1,0	0,0219	1,0	0,022	1,0	0,0006	1,0	0,001
1000	1,0	0,0222	1,0	0,022	1,0	0,0003	1,0	0,000
1250	1,0	0,0224	1,0	0,022	1,0	0,0001	1,0	0,000
1600	1,0	0,0226	1,0	0,023	1,0	-0,0001	1,0	0,000
2000	1,0	0,0227	1,0	0,023	1,0	-0,0002	1,0	0,000
2500	1,0	0,0229	1,0	0,023	1,0	-0,0004	1,0	0,000
3150	1,0	0,0232	1,0	0,023	1,0	-0,0006	1,0	0,001
4000	1,0	0,0234	1,0	0,023	1,0	-0,0009	1,0	0,001
5000	1,0	0,0238	1,0	0,024	1,0	-0,0012	1,0	0,001
6300	1,0	0,0243	1,0	0,024	1,0	-0,0017	1,0	0,002
8000	1,0	0,0250	1,0	0,025	1,0	-0,0024	1,0	0,002
10000	1,0	0,0261	1,0	0,026	1,0	-0,0034	1,0	0,003

Tabela 4.48 - Incertezas padrão relacionadas às variações de temperatura ambiente, estimadas em 1° C, câmara reverberante de 197 m³ nominal do LAENA-INMETRO. E incertezas padrão estimadas (superestimadas) para as frequências centrais das bandas de terço de oitavas.

Frequência central (Hz)	X_t (°C)	c_5 (dB/°C)	d_t	$u_t(L_w)$ [dB]	X_f (Hz)	c_7 (dB/Hz)	d_f	$u_f(L_w)$ [dB]
100	1,0	0,013	1,73	0,007	10,0	-0,0137	1,73	0,079
125	1,0	0,013	1,73	0,007	12,5	-0,0093	1,73	0,067
160	1,0	0,012	1,73	0,007	17,5	-0,0060	1,73	0,061
200	1,0	0,012	1,73	0,007	20,0	-0,0040	1,73	0,047
250	1,0	0,012	1,73	0,007	25	-0,0027	1,73	0,039
315	1,0	0,012	1,73	0,007	33	-0,0018	1,73	0,033
400	1,0	0,011	1,73	0,007	43	-0,0011	1,73	0,027
500	1,0	0,011	1,73	0,007	50	-0,0007	1,73	0,021
630	1,0	0,011	1,73	0,006	65	-0,0005	1,73	0,018
800	1,0	0,011	1,73	0,006	85	-0,0003	1,73	0,014
1000	1,0	0,011	1,73	0,006	100	-0,0002	1,73	0,011
1250	1,0	0,011	1,73	0,006	125	-0,0001	1,73	0,009
1600	1,0	0,011	1,73	0,006	175	-0,0001	1,73	0,008
2000	1,0	0,011	1,73	0,006	200	0,0000	1,73	0,006
2500	1,0	0,011	1,73	0,006	250	0,0000	1,73	0,005
3150	1,0	0,011	1,73	0,006	325	0,0000	1,73	0,004
4000	1,0	0,011	1,73	0,006	425	0,0000	1,73	0,003
5000	1,0	0,010	1,73	0,006	500	0,0000	1,73	0,002
6300	1,0	0,010	1,73	0,006	650	0,0000	1,73	0,002
8000	1,0	0,010	1,73	0,006	850	0,0000	1,73	0,002
10000	1,0	0,010	1,73	0,006	1000	0,0000	1,73	0,001

O valor estimado para a pressão atmosférica foi $B = 1,013 \cdot 10^5$ Pa; para os dias das medições com a fonte sonora BK 4204 do LVA, no LAENA-INMETRO. E a respectiva incerteza padrão é dada na Tabela 4.49; esta incerteza **não** é função da frequência. As variações de B foram estimadas a partir do conjunto de dados obtidos periodicamente (sistematicamente)¹³⁵ em site de institutos de meteorologia, tais como o INPE. As variações foram estimadas em ± 300 Pa.

Tabela 4.49 - Estimativa de incerteza padrão, u_B , (em dB), devido às variações da pressão atmosférica (pressão barométrica) em Pascal. Coeficiente de sensibilidade c_6 .

X_B (Pa)	c_6 (dB/Pa)	d_B	$u_B(L_W)$ [dB]
300	-0,00011	1,73	0,019

4.2.3.5 Balanços de incertezas por bandas de terço de oitava, fonte sonora BK 4204 no LAENA-INMETRO

As combinações das diversas estimativas de fontes de incertezas são dadas nas Tabelas 4.50 e 4.51, por bandas de terço de oitava. A diferença entre estas Tabelas está nos valores de incertezas baseadas em desvios padrão experimentais (Tabela 4.50) e baseadas em desvios padrão experimentais da média (Tabela 4.51); ver segunda e terceira colunas.

Os cálculos das combinações de incertezas padrão u_c apresentadas nas Tabelas 4.50 e 4.51 são baseados em somatório quadrático, tal como na Equação 4.19 da Subseção 4.1.3.1.3, que é rerepresentada a seguir. A aplicação desta equação tem uma pequena adaptação, em duas das parcelas, de forma que $(u_{Lp}^2 = u_{Lp_1}^2$ ou $u_{Lp_2}^2)$ e $(u_{Trev}^2 = u_{Trev_1}^2$ ou $u_{Trev_2}^2)$ para considerar os *desvios padrão experimentais* ou os *desvios padrão experimentais da média*, por bandas de terço de oitava.

$$u_c = \sqrt{u_{Lp}^2 + u_{Trev}^2 + u_V^2 + u_S^2 + u_t^2 + u_B^2 + u_f^2} \quad \text{em dB} \quad (4.19)$$

Os números de graus de liberdade calculados variaram de 28 a 69 com relação à u_{c_1} e de 35 a 2765 com relação à u_{c_2} . E os valores dos coeficientes *t de student* confirmam que o fator de abrangência $k = 2,0$ foi aplicado de forma adequada; com variações na faixa de 1,96 a 2,05.

¹³⁵ Para a região da cidade do Rio de Janeiro – RJ.

Tabela 4.50 - Valores das fontes de incertezas no cálculo das incertezas padrão combinadas (u_c) de potência sonora em cada banda de terço de oitava. Com base nos **desvios padrão experimentais** de L_p e de T_{15} . Estimativas dos números de graus de liberdade (G.L.) e dos coeficientes t de student. Câmara de 197 m^3 , fonte sonora BK 4204. Outubro 2005, LAENA-INMETRO.

Frequência central (Hz)	u_{Lp_1} (dB)	u_{Trev_1} (dB)	u_V (dB)	u_S (dB)	u_t (dB)	u_B (dB)	u_f (dB)	u_{c_1} (dB)	U_1 (dB)	G.L.	t
100	2,11	0,75	0,016	0,006	0,007	0,019	0,079	2,24	4,58	28	2,048
125	1,20	0,90	0,018	0,005	0,007	0,019	0,067	1,50	3,04	39	2,023
160	1,01	0,44	0,018	0,004	0,007	0,019	0,061	1,10	2,25	31	2,040
200	0,61	0,65	0,019	0,003	0,007	0,019	0,047	0,90	1,81	39	2,023
250	0,53	0,36	0,020	0,003	0,007	0,019	0,039	0,64	1,30	40	2,021
315	0,40	0,31	0,020	0,002	0,007	0,019	0,033	0,50	1,02	44	2,015
400	0,34	0,33	0,021	0,002	0,007	0,019	0,027	0,47	0,96	43	2,017
500	0,42	0,29	0,021	0,001	0,007	0,019	0,021	0,51	1,03	42	2,018
630	0,31	0,15	0,022	0,001	0,006	0,019	0,018	0,34	0,69	44	2,015
800	0,28	0,28	0,022	0,001	0,006	0,019	0,014	0,40	0,80	45	2,014
1000	0,25	0,21	0,022	0,000	0,006	0,019	0,011	0,33	0,66	52	2,007
1250	0,27	0,18	0,022	0,000	0,006	0,019	0,009	0,32	0,64	52	2,007
1600	0,20	0,21	0,023	0,000	0,006	0,019	0,008	0,29	0,59	50	2,009
2000	0,20	0,15	0,023	0,000	0,006	0,019	0,006	0,25	0,49	69	1,995
2500	0,21	0,12	0,023	0,000	0,006	0,019	0,005	0,24	0,49	69	1,995
3150	0,20	0,15	0,023	0,001	0,006	0,019	0,004	0,25	0,50	68	1,995
4000	0,25	0,15	0,023	0,001	0,006	0,019	0,003	0,29	0,58	61	2,000
5000	0,27	0,11	0,024	0,001	0,006	0,019	0,002	0,29	0,58	51	2,008
6300	0,32	0,13	0,024	0,002	0,006	0,019	0,002	0,34	0,69	42	2,018
8000	0,44	0,15	0,025	0,002	0,006	0,019	0,002	0,47	0,95	33	2,035
10000	0,60	0,15	0,026	0,003	0,006	0,019	0,001	0,62	1,27	28	2,048

Tabela 4.51 - Valores das fontes de incertezas no cálculo das incertezas padrão combinadas (u_c) de potência sonora em cada banda de terço de oitava. Com base nos **desvios padrão experimental da média** de L_p e de T_{15} . Estimativas dos números de graus de liberdade (G.L.) e dos coeficientes t de student. Câmara de 197 m^3 , fonte sonora BK 4204. Outubro 2005, LAENA-INMETRO.

Frequência central (Hz)	u_{Lp_2} (dB)	u_{Trev_2} (dB)	u_V (dB)	u_S (dB)	u_t (dB)	u_B (dB)	u_f (dB)	u_{c_2} (dB)	U_2 (dB)	G.L.	t
100	0,44	0,18	0,016	0,006	0,007	0,019	0,079	0,49	0,99	35	2,030
125	0,27	0,21	0,018	0,005	0,007	0,019	0,067	0,35	0,70	55	2,004
160	0,24	0,10	0,018	0,004	0,007	0,019	0,061	0,27	0,53	59	2,001
200	0,17	0,15	0,019	0,003	0,007	0,019	0,047	0,23	0,47	71	1,994
250	0,16	0,08	0,020	0,003	0,007	0,019	0,039	0,18	0,37	137	1,977
315	0,14	0,07	0,020	0,002	0,007	0,019	0,033	0,16	0,32	223	1,971
400	0,13	0,08	0,021	0,002	0,007	0,019	0,027	0,16	0,31	218	1,971
500	0,14	0,07	0,021	0,001	0,007	0,019	0,021	0,16	0,32	208	1,971
630	0,13	0,04	0,022	0,001	0,006	0,019	0,018	0,14	0,27	645	1,964
800	0,13	0,07	0,022	0,001	0,006	0,019	0,014	0,15	0,29	326	1,967
1000	0,12	0,05	0,022	0,000	0,006	0,019	0,011	0,14	0,27	664	1,964
1250	0,13	0,04	0,022	0,000	0,006	0,019	0,009	0,14	0,27	819	1,963
1600	0,12	0,05	0,023	0,000	0,006	0,019	0,008	0,13	0,26	823	1,963
2000	0,12	0,03	0,023	0,000	0,006	0,019	0,006	0,13	0,26	2341	1,961
2500	0,12	0,03	0,023	0,000	0,006	0,019	0,005	0,13	0,26	2765	1,961
3150	0,12	0,04	0,023	0,001	0,006	0,019	0,004	0,13	0,26	2225	1,961
4000	0,14	0,03	0,023	0,001	0,006	0,019	0,003	0,14	0,28	1817	1,961
5000	0,14	0,03	0,024	0,001	0,006	0,019	0,002	0,14	0,28	1683	1,961
6300	0,14	0,03	0,024	0,002	0,006	0,019	0,002	0,15	0,29	822	1,963
8000	0,15	0,03	0,025	0,002	0,006	0,019	0,002	0,16	0,32	273	1,969
10000	0,18	0,04	0,026	0,003	0,006	0,019	0,001	0,18	0,36	121	1,980

4.2.3.6 Balanços das incertezas globais considerando os desvios padrão experimentais, e os desvios padrão experimentais da média

Nas combinações de incertezas padrão em cada uma das bandas de terço de oitavas, elaboradas na subseção anterior, houve duas abordagens de cálculos tratadas separadamente. De maneira similar, as combinações de incertezas para obtenção das incertezas estimadas para o nível de potência sonora global em dB(A) foram tratadas separadamente. Porém, para fins de comparação, os resultados destas investigações foram colocados em uma mesma tabela; a Tabela 4.52.

De forma similar aos resultados obtidos no LVA-UFSC, as contribuições de incertezas para $U(L_{WA_global})$ avaliadas nos ensaios efetuados no LAENA-INMETRO com fonte sonora BK 4204 se concentraram nas bandas de 1250 a 2500 Hz e bandas adjacentes. Os valores do indicador $1/c_j$ resultaram em aproximadamente 7 para estas bandas com maiores contribuições de incertezas para $U(L_{WA_global})$. O perfil do indicador ($1/c_j$) se mostrou semelhante aos encontrados nas avaliações de incertezas dos ensaios feitos no LVA. Isto é consequência das características da curva do espectro de potência da própria fonte sonora sob teste.

Os coeficientes de sensibilidade de cada banda de terço de oitava c_j não variam em função do uso de desvios padrão experimentais ou de desvios padrão experimentais da média, pois são funções dos níveis de potência sonora de cada banda de terço de oitava e do nível global em dB(A). No caso de cálculo de incerteza global em dB(A) os coeficientes c_j são dados através da Equação 4.36 da Subseção 4.1.3.1.3. A combinação de incertezas das bandas de frequência para obter a incerteza do nível global é dada através da Equação 4.37 da Subseção 4.1.3.1.3.

A incerteza expandida $U_1(L_{WA})$ que foi calculada a partir dos desvios padrão experimentais, tal como feito nas avaliações de resultados experimentais obtidos no LVA-UFSC, resultou em 0,19 dB(A), ver Tabela 4.52. Valor que é concordante com as respectivas incertezas estimadas a partir das baterias de ensaios feitas no LVA-UFSC com fonte sonora **BK 4204**. Na verdade houve ligeiras diferenças entre os valores de incertezas globais obtidos nas três câmaras reverberantes utilizadas, porque a incerteza também é função da câmara reverberante, e não somente da fonte sonora sob teste.

A incerteza expandida $U_2(L_{WA})$, apresentada na Tabela 4.52, não chega a atingir 0,1 dB(A). Sendo uma estimativa de incerteza inferior à incerteza atribuída ao calibrador de nível sonoro, e inferior à incerteza padrão atribuída à cadeia de medição, u_{ccm} .

Tabela 4.52 - Cálculo das incertezas do valor global de nível de potência sonora em dB(A), câmara reverberante de 197 m³ do LAENA-INMETRO, outubro 2005. Duas abordagens de cálculo, uma considerando os **desvios padrão experimentais** de L_p e de T_{15} , e outra considera os **desvios padrão experimentais da média** de L_p e de T_{15} .

Frequência central (Hz)	L_{WA} dB(A)	c_j	$u_c(L_w)$ (dB)		$c_j u_c$ (dB)		$(c_j u_c)^2$ (dB) ²		1 / c_j
			u_{c_1} (dB)	u_{c_2} (dB)	$c_j u_{c_1}$ (dB)	$c_j u_{c_2}$ (dB)	$(c_j u_{c_1})^2$ (dB) ²	$(c_j u_{c_2})^2$ (dB) ²	
			\boxed{S}	$\boxed{S/\sqrt{n}}$	\boxed{S}	$\boxed{S/\sqrt{n}}$	\boxed{S}	$\boxed{S/\sqrt{n}}$	
100	56,65	0,000	2,24	0,49	0,000	0,000	0,00000	0,00000	6136,4
125	60,66	0,000	1,50	0,35	0,001	0,000	0,00000	0,00000	2435,8
160	65,01	0,001	1,10	0,27	0,001	0,000	0,00000	0,00000	893,6
200	68,13	0,002	0,90	0,23	0,002	0,001	0,00000	0,00000	436,0
250	71,90	0,005	0,64	0,18	0,004	0,001	0,00001	0,00000	183,2
315	74,00	0,009	0,50	0,16	0,004	0,001	0,00002	0,00000	112,9
400	74,99	0,011	0,47	0,16	0,005	0,002	0,00003	0,00000	89,8
500	76,58	0,016	0,51	0,16	0,008	0,003	0,00007	0,00001	62,3
630	78,57	0,025	0,34	0,14	0,009	0,004	0,00008	0,00001	39,4
800	82,52	0,063	0,40	0,15	0,025	0,009	0,00063	0,00009	15,9
1000	84,46	0,098	0,33	0,14	0,032	0,014	0,00104	0,00018	10,2
1250	86,00	0,140	0,32	0,14	0,045	0,019	0,00203	0,00037	7,1
1600	86,05	0,142	0,29	0,13	0,041	0,019	0,00172	0,00036	7,0
2000	85,73	0,132	0,25	0,13	0,033	0,017	0,00106	0,00030	7,6
2500	84,42	0,098	0,24	0,13	0,024	0,013	0,00056	0,00016	10,3
3150	82,85	0,068	0,25	0,13	0,017	0,009	0,00029	0,00008	14,7
4000	82,94	0,069	0,29	0,14	0,020	0,010	0,00040	0,00010	14,4
5000	81,98	0,056	0,29	0,14	0,016	0,008	0,00026	0,00006	18,0
6300	80,00	0,035	0,34	0,15	0,012	0,005	0,00015	0,00003	28,4
8000	77,22	0,019	0,47	0,16	0,009	0,003	0,00008	0,00001	53,8
10000	73,92	0,009	0,62	0,18	0,005	0,002	0,00003	0,00000	114,9
					$u_{c1}(L_{WA})$ dB(A)	$u_{c2}(L_{WA})$ dB(A)	$U_1(L_{WA})$ dB(A)	$U_2(L_{WA})$ dB(A)	
Global					0,092	0,042	0,19	0,09	k = 2,0

Obs.: Incertezas expandidas $U(L_{WA})$ arredondadas para cima, com duas casas decimais.

O símbolo \boxed{S} representa que os cálculos da respectiva coluna foram baseados nos **desvios padrão experimentais** dos resultados das medições de L_p e de T_{15} .

O símbolo $\boxed{S/\sqrt{n}}$ significa que os cálculos da respectiva coluna foram baseados nos **desvios padrão experimentais da média** dos resultados das medições de L_p e de T_{15} .

Para levar em consideração a incerteza referente à deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro, a deriva estimada em 0,1 dB foi somada algebricamente às estimativas de incertezas expandidas apresentadas na Tabela 4.52. Resultando em:

$$U_{DPE_{(L_{WA})Total}} = U_1(L_{WA}) + Deriva_{cal} = 0,19 + 0,10 = 0,29 \text{ dB(A)}$$

$$U_{DPEM_{(L_{WA})Total}} = U_2(L_{WA}) + Deriva_{cal} = 0,09 + 0,10 = 0,19 \text{ dB(A)}$$

onde: $U_{DPE_{(L_{WA})Total}}$ é a incerteza expandida do nível de potência sonora global calculado a partir

de *desvios padrão experimentais*¹³⁶ incluída a estimativa de deriva do calibrador de nível sonoro; $U_{DPEM_{(LWA)Total}}$ é a incerteza expandida do nível de potência sonora global calculado a partir de *desvios padrão experimentais da média*¹³⁷ incluída a estimativa de deriva do calibrador de nível sonoro; $U_1(L_{WA})$ é a incerteza expandida atribuída ao nível de potência sonora global em dB(A) calculada com base em *desvios padrão experimentais*; e $U_2(L_{WA})$ é a incerteza expandida atribuída ao nível de potência sonora global em dB(A) calculada com base em *desvios padrão experimentais da média*.

A política de avaliação de incertezas adotada no LVA-UFSC, neste caso, determina que a incerteza expandida $U_1(L_{WA})$ seja levada em consideração na expressão do resultado de medição. Portanto, o nível de potência sonora global da fonte BK 4204 foi estimado em: $L_{WA_1} = 94,53 \pm 0,29 \text{ dB(A)}$, levando em consideração a deriva atribuída ao calibrador sonoro. Isto na faixa de frequências de interesse de 100 Hz a 10 kHz medidas em bandas de terço de oitavas, na câmara reverberante de 197 m³ do LAENA-INMETRO (câmara 4).

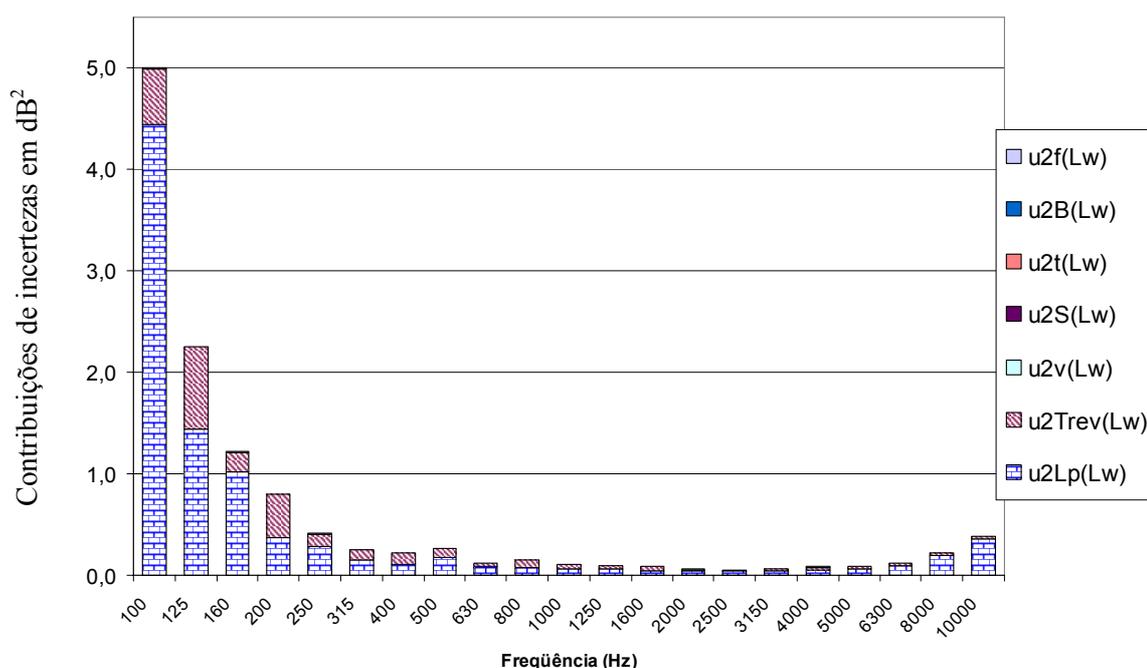


Figura 52 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas por bandas de terço de oitava, calculadas com base nos **desvios padrão experimentais** de L_p e de T_{15} . Valores expressos como incertezas padrão ao quadrado, em dB². Fonte sonora BK 4204, câmara reverberante de 197 m³ do LAENA-INMETRO, outubro 2005.

Com relação às investigações sobre as fontes de incertezas predominantes e as bandas de terço de oitava que mais contribuem para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), é importante observar o comportamento dos gráficos de barras mostrados nas

¹³⁶ A partir de incertezas Tipo A e Tipo B, sendo que as estimativas Tipo A são baseadas em desvios padrão experimentais.

¹³⁷ A partir de incertezas Tipo A e Tipo B, sendo que as estimativas Tipo A são baseadas em *desvios padrão experimentais da média*.

figuras 53, 54, 55 e 56. Os perfis dos gráficos de barras nas figuras 53 e 54 têm formatos mais regulares que os gráficos resultantes das investigações de incertezas nas câmaras reverberantes no LVA-UFSC; ver figuras 29 na Subseção 4.1.3.1.3, 31 na Subseção 4.1.3.2, 33 na Subseção 4.1.3.3, 35 na Subseção 4.1.3.4, 37 na Subseção 4.1.4.1.3, 39 na Subseção 4.1.4.2. As amplitudes das barras mostradas nos gráficos das figuras 29 a 39 são irregulares, se comparadas com as figuras 53 e 54 que têm formatos similares a curvas de exponenciais decrescentes. De forma que as contribuições de incertezas dadas em decibéis ao quadrado (dB^2) nas bandas de frequências mais baixas foram mais elevadas em relação aos ensaios feitos no LVA-UFSC; principalmente na banda de 100 Hz.

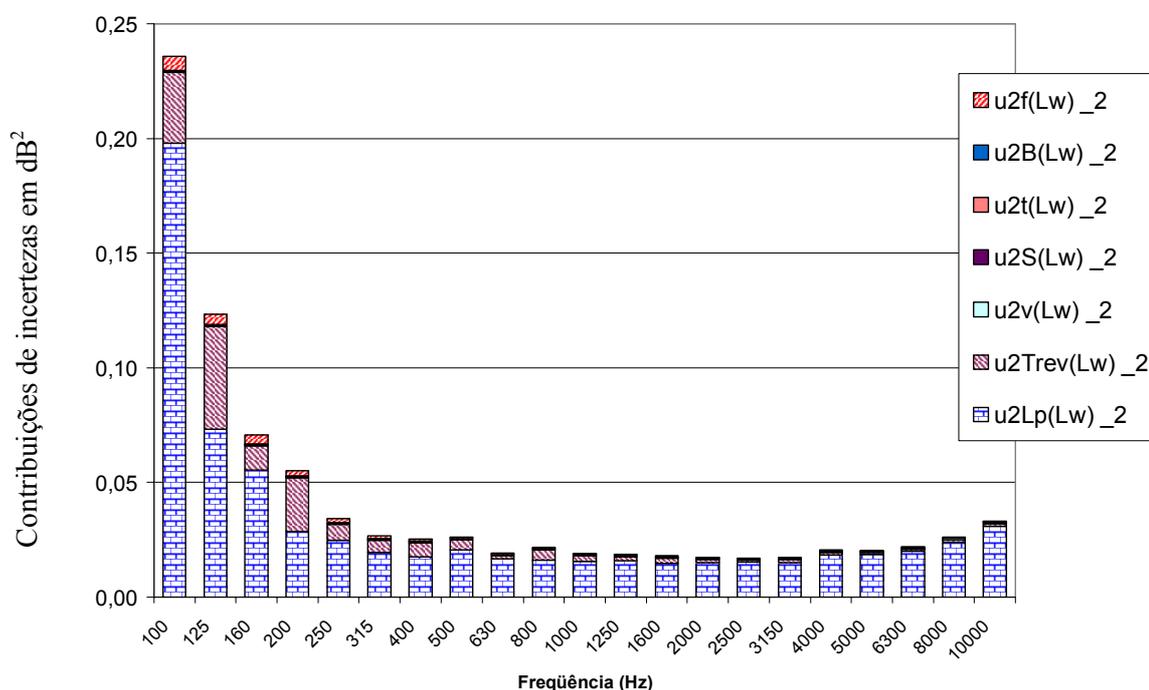


Figura 53 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas relativas a cada banda de terço de oitava, calculadas com base nos **desvios padrão experimentais da média** de L_p e de T_{15} . Valores expressos como incertezas padrão ao quadrado, em dB^2 . Fonte sonora BK 4204, câmara reverberante de 197 m^3 do LAENA-INMETRO, outubro 2005.

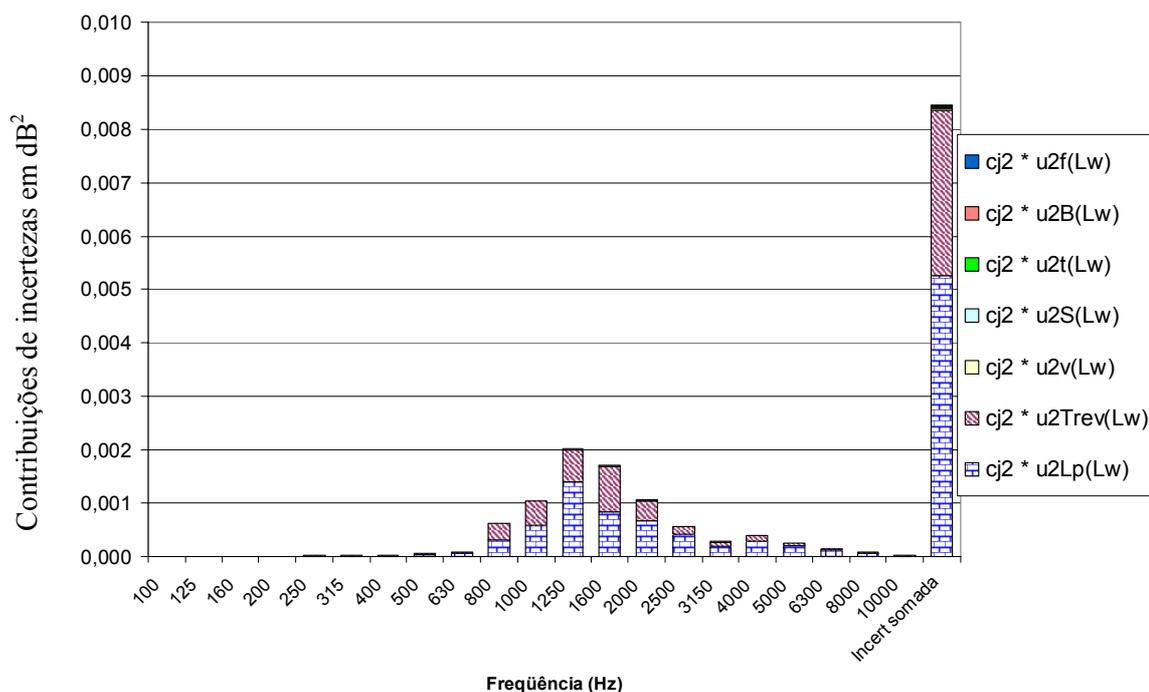


Figura 54 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Incertezas calculadas com base nos **desvios padrão experimentais** de L_p e de T_{15} . Fonte sonora BK 4204, câmara reverberante de 197 m³ do LAENA-INMETRO, **outubro 2005**.

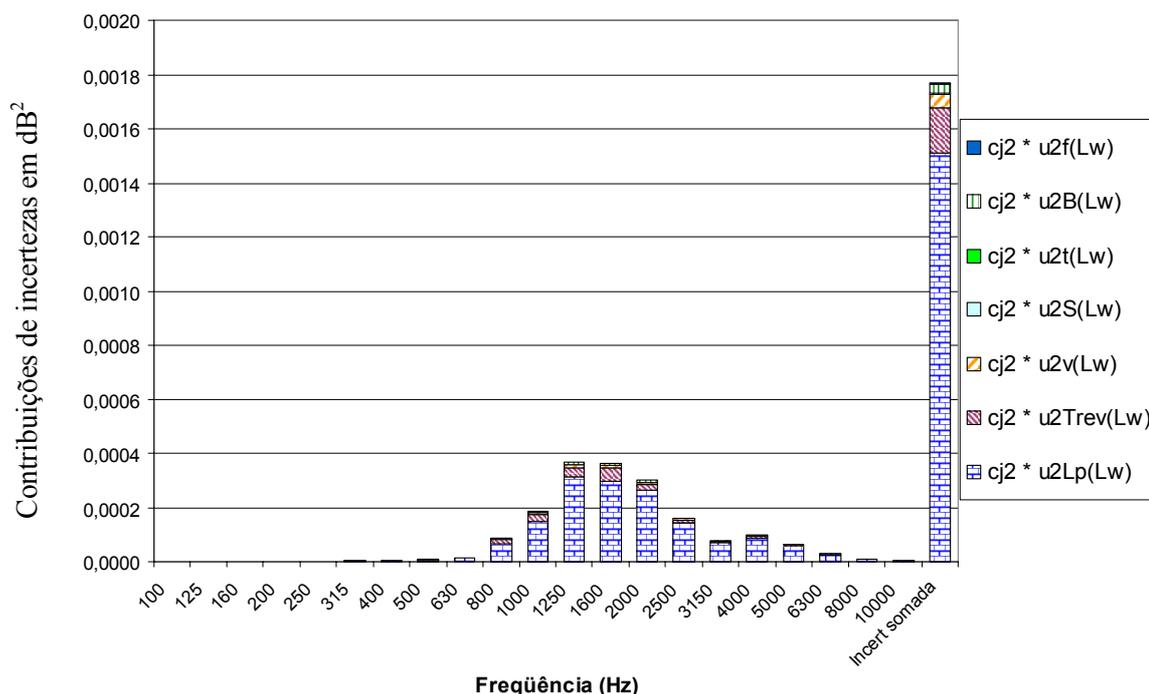


Figura 55 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Incertezas calculadas com base nos **desvios padrão experimentais da média** de L_p e de T_{15} . Fonte sonora BK 4204, câmara reverberante de 197 m³ do LAENA-INMETRO, **outubro 2005**.

Na legenda do gráfico da Figura 53, “ $u_{2Lp}(Lw)_2$ ” se refere às incertezas padrão ao quadrado dos L_p ; “ $u_{2Trev}(Lw)_2$ ” são as incertezas padrão ao quadrado dos T_{rev} , “ $u_{2f}(Lw)_2$ ” são as incertezas padrão ao quadrado das frequências centrais f das bandas de terço

de oitava; sendo que estas incertezas foram calculadas com base em *desvios padrão experimentais da média*.

Diferentemente dos gráficos das figuras 52 e 53, que apresentam as incertezas atribuídas a cada banda de terço de oitava, os gráficos de barras das figuras 54 e 55 demonstram as contribuições de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Sendo que, nestes gráficos, cada uma das barras denominada “Incert somada” corresponde ao somatório das amplitudes das barras apresentadas nas bandas de 100 Hz a 10 kHz, do respectivo gráfico. As contribuições de incertezas calculadas a partir dos *desvios padrão experimentais da média* foram inferiores a $0,0004 \text{ dB}^2$, e o somatório quadrático das mesmas atingiu cerca de $0,0018 \text{ dB}^2$; ver Figura 55. Enquanto que as contribuições de incertezas calculadas a partir de *desvios padrão experimentais* foram cerca de **cinco vezes mais elevadas**, atingindo até $0,0020 \text{ dB}^2$ na banda de 1250 Hz, e o somatório quadrático das incertezas das bandas atingiu o valor de $0,085 \text{ dB}^2$. Isto demonstra as diferenças significativas entre as duas abordagens de estimativas de incertezas obtidas experimentalmente.

Através desta análise de incertezas pode-se concluir que a cadeia de medição, inclusive calibrador de nível sonoro, tem participação importante nas contribuições de incertezas. Esta afirmação está baseada nos gráficos e valores obtidos nesta subseção, especialmente nos valores de u_{ccm} que foram apresentados na Tabela 4.41 da Subseção 4.2.3, e os cálculos para obtenção das incertezas padrão $u_{L_p_1}$ e $u_{L_p_2}$ referentes aos níveis de pressão sonora medidos; apresentadas na Tabela 4.45 da Subseção 4.2.3.4.

Com relação aos dois resultados dos ensaios, houve muito boa concordância entre os níveis de potência sonora globais, em dB e em dB(A), obtidos no LAENA-INMETRO. Os respectivos valores foram representados no gráfico da Figura 56, além das barras de erros que ilustram as incertezas estimadas através dos cálculos. Na legenda do gráfico, “Uc1(Lw)” representa as incertezas expandidas calculadas a partir de desvios padrão experimentais de L_p e T_{15} , e “Uc2(Lw)” a partir de desvios padrão experimentais da média dos mesmos. Ensaio 1 realizado em outubro de 2005, e Ensaio 2 em novembro de 2005 no LAENA-INMETRO. O Ensaio 2 não apresenta as estimativas de incerteza por falta dos dados necessários para o cálculo.

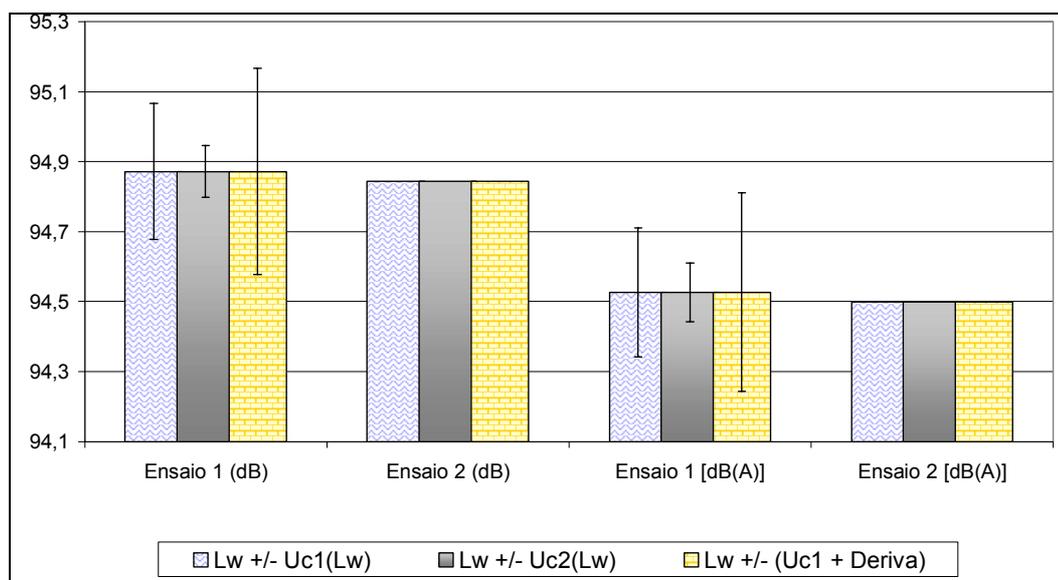


Figura 56 - Níveis de potência sonora globais em dB e em dB(A) determinados na câmara reverberante de 197 m³ (também denominada Câmara 4, LAENA-INMETRO). Incertezas expandidas U_{c1} calculadas com base em desvios padrão experimentais, e U_{c2} com base em desvios padrão experimentais da média (de L_p e de T_{15}). ($U_{c1} + \text{Deriva}$) considera a **deriva** do calibrador de nível sonoro no cálculo. Ensaio 1 (out/05), ensaio 2 (nov/05).

As estimativas de incerteza calculadas para o nível de potência sonora global L_{WF} em dB resultaram em: $U_{c1}(L_w) = 0,20$ dB, $U_{c2}(L_w) = 0,08$ dB, e $(U_{c1} + \text{Deriva}) = 0,30$ dB. Estes valores foram usados para plotar as barras de erros em “Ensaio 1 (dB)” na Figura 56.

4.3 Análise geral dos resultados experimentais e incertezas de medição obtidas com a fonte sonora de referência BK 4204

Através de cálculos baseados em combinação de incertezas padrão feitos de acordo com o Guia para a Expressão de Incerteza de Medição foram obtidas as seguintes incertezas expandidas nos ensaios com fonte sonora BK 4204 na câmara reverberante de 193 m³ do LVA: 0,15 dB(A), 0,17 dB(A), 0,17 dB(A), 0,19 dB(A), 0,17 dB(A) sem computar a deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro, a qual foi considerada 0,10 dB. As incertezas expandidas obtidas através dos resultados de ensaios na câmara reverberante de 145 m³ foram: 0,18 dB(A), 0,18 dB(A) e 0,20 dB(A), sem computar a deriva atribuída ao calibrador sonoro. No caso das incertezas calculadas para o ensaio no LAENA-INMETRO, através de incertezas *Tipo A* baseadas em *desvios padrão experimentais*, obteve-se incerteza expandida de 0,09 dB(A); porém quando as incertezas *Tipo A* foram baseadas em *desvios padrão experimentais da média* obteve-se 0,19 dB(A); ambos os valores sem computar a deriva atribuída ao calibrador sonoro. **Não** foram calculadas as incertezas dos L_{WF} globais em dB.

De um modo geral, as análises de incertezas resultaram em incertezas expandidas na faixa de valores entre 0,09 dB(A) e 0,30 dB(A). Do ponto de vista metrológico de avaliação e da declaração de incertezas de medição por parte dos laboratórios que prestam serviços de calibração e ensaios, podem ocorrer duas situações indesejáveis: (1) o valor de incerteza declarado, $U_{95\%}$, pode ser subdimensionado, sendo que se a soma das $U_{95\%}$ de dois laboratórios num processo de comparação for inferior ao desvio (diferença) dos dois resultados obtidos, então é considerado não-conformidade; um problema que deve ser evitado; (2) o valor de incerteza declarado é superdimensionado, sendo que é muito superior aos valores declarados por outras instituições que prestam o mesmo tipo de serviço de calibração e/ou ensaio. Esta segunda situação poderá levar os clientes a escolher outros laboratórios em função do valor mais elevado da incerteza declarada, o que pode ser atribuído a um baixo desempenho metrológico.

Quinze resultados de L_{WA} globais obtidos através de diversos meios são representados por pontos sobre a abscissa do gráfico da Figura 57, e os mesmos pontos são representados na abscissa do gráfico da Figura 58. A diferença entre estes gráficos está nas incertezas representadas (ilustradas) através das curvas gaussianas sobre os respectivos pontos¹³⁸. Pode-se notar que as gaussianas no gráfico da Figura 58 têm maior abrangência sobre os pontos que representam os L_{WA} globais do que as gaussianas no gráfico da Figura 57. Isto porque estas últimas não consideram a deriva do calibrador de nível sonoro. Ou seja, as gaussianas no gráfico da Figura 57 ilustram as incertezas expandidas que foram calculadas sem computar a deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro. As curvas gaussianas são ilustrativas, as distribuições de probabilidades **não** são exatamente as mesmas descritas nas curvas dos gráficos das figuras 57 e 58.

¹³⁸ Respetivos valores de níveis de potência sonora globais, L_{WA} globais em dB(A).

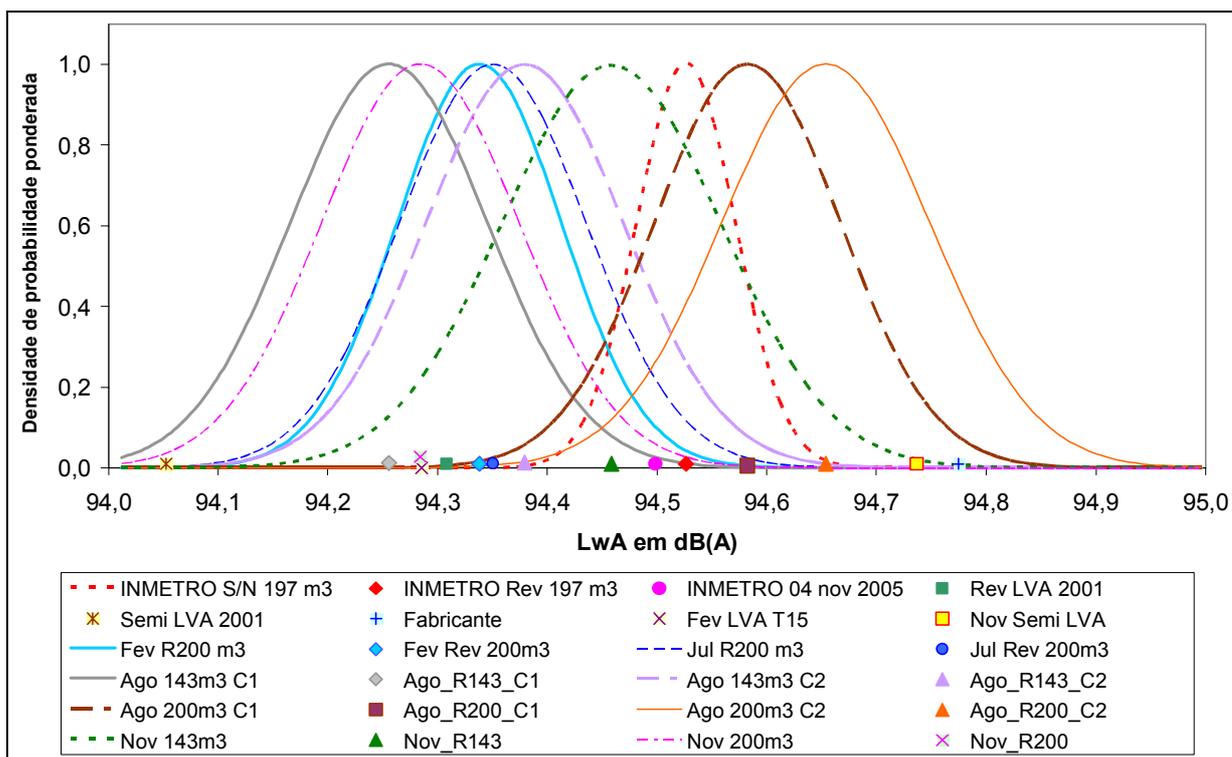


Figura 57 - Comparativo geral dos resultados obtidos em ensaios com a fonte sonora BK 4204 do LVA. Ensaio no LAENA-INMETRO, no LVA-UFSC, e valores do fabricante; Brüel & Kjær. Curvas gaussianas ilustrando distribuições de probabilidades relativas às incertezas calculadas **sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro.**

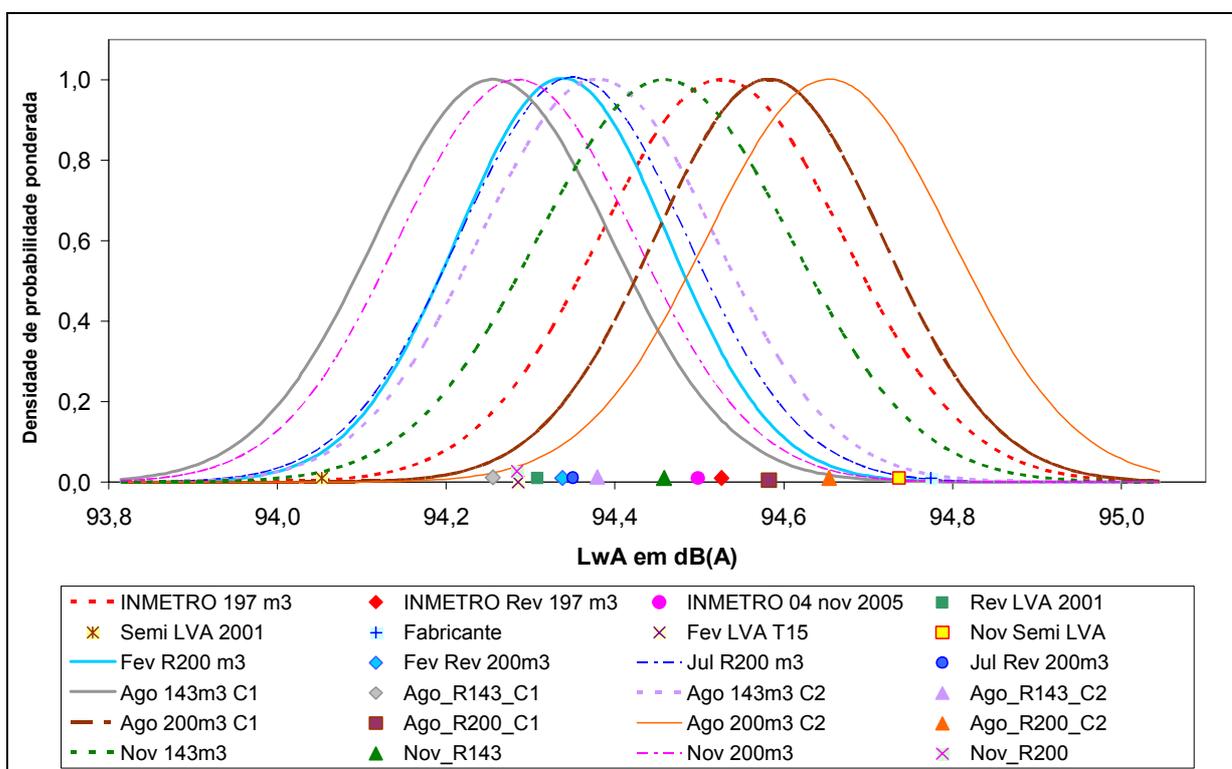


Figura 58 - Comparativo geral dos resultados obtidos em ensaios com a fonte sonora BK 4204 do LVA. Ensaio no LAENA-INMETRO, no LVA-UFSC, e valores do fabricante; Brüel & Kjær. Curvas gaussianas ilustram as distribuições de probabilidades relativas às incertezas calculadas **considerando a deriva dos calibradores de nível sonoro.**

Dos quinze resultados plotados nos gráficos das figuras 57 e 58, três são antigos, de mais de quatro anos atrás, e **não** há dados sobre os detalhes dos procedimentos de medições e das correções adotadas, portanto **não** têm rastreabilidade considerável. São representados nas legendas dos gráficos por: “Rev LVA 2001”, “Semi LVA 2001” e “Fabricante”.

Os demais símbolos e abreviações das legendas são explanados a seguir:

- “INMETRO S/N 197 m³” se refere à curva gaussiana calculada (e plotada) a partir da incerteza expandida baseada em *desvios padrão experimentais da média*, de resultados obtidos no LAENA-INMETRO;
- “INMETRO 197 m³” se refere à curva gaussiana calculada (e plotada) a partir da incerteza expandida baseada em *desvios padrão experimentais*, de resultados obtidos no LAENA-INMETRO;
- “INMETRO Rev 197 m³” a partir da câmara reverberante do LAENA-INMETRO;
- “INMETRO 04 nov 2005” a partir da câmara reverberante do LAENA-INMETRO “ensaio extra” em 04 de novembro de 2005;
- “Fev LVA T15” é o resultado calculado com base nos tempos de reverberação T_{15} ;
- “Nov” é referente aos ensaios realizados em novembro de 2005;
- “Fev” é referente ao ensaio realizado em fevereiro de 2005;
- “Jul” é referente ao ensaio realizado em julho de 2005;
- “Ago” é referente aos ensaios realizados em agosto de 2005;
- “Semi LVA” se refere a ensaios na câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC;
- “200m³”, “R200”, “R200 m³” e “Rev 200 m³” se referem aos valores obtidos com base nos ensaios na câmara reverberante de 193 m³ nominal do LVA-UFSC;
- “143m³”, “R143”, “R143 m³” e “Rev 143 m³” se referem aos valores obtidos com base nos ensaios na câmara reverberante de 145 m³ nominal do LVA-UFSC;
- “C1” se refere aos resultados obtidos exclusivamente com o “canal 1” (ou seja, microfone 1);
- “C2” se refere aos resultados obtidos exclusivamente com o “canal 2” (ou seja, microfone 2).

Com o objetivo de encontrar um valor, na verdade uma faixa de valores, que represente esta investigação experimental, foi escolhido o resultado: $94,46 \pm 0,30$ dB(A), valores usados para plotar “Nov R143” e a curva gaussiana “Nov 143m³” na Figura 58, como sendo o resultado adequado para generalizar todos os outros resultados obtidos. Além de abranger praticamente todos os outros, este resultado foi o mais próximo daqueles obtidos no

LAENA-INMETRO que é considerado o laboratório de referência, ou referência metrológica nesta comparação laboratorial bilateral.

Capítulo 5

Ensaio de determinação de potência sonora com outras fontes

Da mesma forma que os ensaios feitos com a fonte sonora de referência BK 4204, os ensaios com outras fontes sonoras seguiram as **recomendações da norma ISO 3741 : 1999 – Acústica – Determinação de níveis de potência sonora de fontes de ruído usando pressão sonora – Métodos de precisão para câmaras reverberantes**¹³⁹. Também foram seguidas as recomendações estabelecidas no Guia para a expressão da incerteza de medição, **ISO GUM**, para desenvolver os cálculos de incertezas através da quantificação das fontes de incertezas e do cálculo de **incertezas padrão combinadas**.

O objetivo principal das investigações¹⁴⁰ com um protótipo de fonte sonora e com eletrodomésticos foi a verificação das mudanças que podem ocorrer no campo sonoro dentro das câmaras reverberantes e conseqüentemente nas incertezas de medição, ao testar fontes sonoras que não são de referência. As diferenças no campo sonoro reverberante quando excitado por fontes sonoras de características distintas influenciaram também nas incertezas da determinação dos níveis de potência sonora de cada fonte. Isto é comprovado nas seções a seguir através dos resultados experimentais.

Foram feitos ensaios de determinação de níveis de potência sonora de uma fonte sonora aerodinâmica (protótipo fabricado por Vibranihil), e os eletrodomésticos secador de

¹³⁹ Do original: ISO 3741:1999 – Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation rooms.

¹⁴⁰ No sentido de motivação que levou ao desenvolvimento destes ensaios de determinação de potência sonora; de fontes que não são fontes sonoras de referência, como a fonte BK 4204.

cabelo e liquidificador. A fonte sonora Vibranihil foi ensaiada em duas câmaras reverberantes e semi-anecóica do LVA-UFSC. Um modelo de secador de cabelo e um de liquidificador foram ensaiados em duas câmaras reverberantes do LVA.

As medições de tempos de reverberação das duas câmaras reverberantes, e as medições dos níveis de pressão sonora foram a essência do trabalho experimental, e a repetitividade destas medições foi fundamental para a avaliação Tipo A das incertezas de medição. Foram medidos os tempos de reverberação na faixa de decaimento de 20 dB, denominados T_{20} , e os níveis de pressão sonora em decibéis referentes à $20 \mu\text{Pa}$ (vinte micropascal).

Nas seções seguintes há uma extensa quantidade de dados experimentais e resultados de cálculos, especialmente devido à faixa de frequências adotada. As frequências centrais das bandas de interesse foram de 100 Hz a 10 kHz. Como o número de bandas de terço de oitavas é relativamente grande, nestas circunstâncias, a apresentação dos dados numéricos ocupou várias tabelas extensas, além de vários gráficos ilustrativos das contribuições das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada.

Não foram feitas medições de índices ou indicadores de direcionalidade do campo sonoro produzido pelos aparelhos eletrodomésticos. De qualquer forma, a direcionalidade do campo sonoro emitido pelos eletrodomésticos pode ter influenciado significativamente na distribuição dos níveis de pressão sonora, L_p , dentro das câmaras reverberantes onde foram testados.

Os conjuntos de ensaios que visaram obter a avaliação Tipo A da incerteza de medição foram feitos em condições de repetitividade. Ou seja, cada seqüência de medições foi feita no mesmo dia, em períodos em torno de uma hora a cinco horas, no máximo. Além disto, cada seqüência de medição foi executada pelo mesmo operador, com mesmo equipamento de medição, e condições climáticas que podem ser consideradas constantes. Porém houve mudanças aleatórias nas posições dos microfones de medição, de acordo com o que é permitido pela norma ISO 3741.

5.1 Medições com a fonte sonora Vibranihil

De fato, a fonte sonora aerodinâmica aqui denominada apenas como “fonte Vibranihil” é um protótipo de fonte sonora de referência que foi emprestado para efetuar alguns

testes acústicos e metrológicos para este trabalho; principalmente ensaios de determinação de sua potência sonora, além de testes que envolveram a qualificação de câmaras acústicas. Entretanto, esta fonte sonora **não** é homologada¹⁴¹, como as fontes sonoras de referência Brüel & Kjær modelo BK 4204, as quais são comumente usadas em processos de intercomparação laboratorial de potência sonora.

A fonte sonora Vibranihil foi utilizada em testes relatados na dissertação de mestrado de Gilberto Fuchs (2000). Foi um dos protótipos utilizados com o objetivo de projetar uma fonte sonora de referência a qual atendesse aos requisitos da norma ISO 6926; “Requisitos de desempenho e calibração de fontes sonoras de referência usadas para determinação de níveis de potência sonora”. Neste trabalho foram realizados cinco ensaios com a fonte sonora Vibranihil¹⁴²: um ensaio na câmara reverberante de teste de protetores auditivos (83 m³), ensaios nas câmaras reverberantes de 145 m³ e de 193 m³ do LVA-UFSC¹⁴³, e dois ensaios na câmara semi-aneecóica LVA-UFSC.

5.1.1 Equipamentos e métodos de medição

No ensaio realizado na câmara de 83 m³, ver Subseção 5.1.2, foi usado um microfone de medição de uma polegada, marca Larson Davis modelo 2575, calibrador de nível sonoro Larson Davis modelo CA250, pré-amplificador PRM 902, analisador de sinais Larson Davis 824, e fonte sonora Vibranihil.

Nas medições feitas nas câmaras reverberantes de 145 e 193 m³ e câmara semi-aneecóica foi usado microfone de medição de meia polegada, marca GRAS modelo 40AE, número de série 34581; pré-polarizado. Calibradores de nível sonoro GRAS modelo 42AB e Larson Davis modelo CA250. Além de pré-amplificador GRAS 26CA, número de série 36633, e analisador de sinais PULSE marca Brüel & Kjær, número de série 2423230. Em um dos ensaios na câmara semi-aneecóica, denominado “semi-aneecóica 2”, foi usado o analisador Larson Davis 824 System.

Os métodos de medição e os cálculos utilizados de acordo com o estabelecido nas normas: ISO 3745 para câmara semi-aneecóica e ISO 3741 para as câmaras reverberantes. Nos ensaios na câmara semi-aneecóica LVA foram medidos os níveis de pressão sonora, L_p , com um microfone de medição de meia polegada, modelo GRAS 40AE número de série 34581, o qual foi

¹⁴¹ Não foi aprovada ou reconhecida como um modelo de fonte sonora de referência.

¹⁴² Esta fonte sonora foi um dos protótipos utilizados por Gilberto Fuchs (2000) em seu [mestrado](#).

¹⁴³ Volumes nominais apenas para identificar as câmaras do LVA, os valores reais diferem dos nominais.

orientado em direção a fonte sonora com incidência 0° (ângulo de incidência das ondas sonoras sob o microfone). Foram com vinte posições de microfone em torno da fonte sonora sob teste.



Figura 59 - Foto da fonte sonora Vibranihil na câmara de 83 m^3 do LVA-UFSC; ao centro abaixo. Também caixas acústicas e painel com espumas de absorção sonora; aos fundos e acima.

As Equações 5.1 a 5.3 foram usadas para os cálculos dos níveis de potência sonora dos ensaios realizados na câmara semi-anecóica. Foram usadas para encontrar: os níveis de pressão sonora médio, \overline{L}_p , de cada banda de frequência, com $N = 20$ medições; os níveis de potência sonora de cada banda de frequência, L_W , e uma correção, C , necessária devido às influências de temperatura e pressão atmosférica, de acordo com ISO 3745.

$$\overline{L}_p = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot L_{pi}} \right] \quad (5.1)$$

$$L_W = \overline{L}_p - 10 \log_{10} (2\pi \cdot r^2) + C \quad (5.2)$$

$$C = -10 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{293}{273 + \theta}} \cdot \frac{B}{1000} \right) \quad (5.3)$$

onde θ é a temperatura em graus Celsius, B é a pressão atmosférica em milibar, e r é a distância entre o microfone de medição e o ponto central no piso abaixo da fonte sonora¹⁴⁴. A distância r foi estabelecida em 1,50 m.

¹⁴⁴ Considerado como sendo, aproximadamente, o centro acústico da fonte sonora sob teste; sobre o plano refletor.

Nos cálculos de determinação de níveis de potência sonora, L_w , nas câmaras reverberantes do LVA foram usados os tempos de reverberação T_{20} medidos¹⁴⁵ em novembro de 2005, os mesmos T_{20} usados nos cálculos referentes às outras fontes sonoras; BK 4204, secador de cabelo e liquidificador. As Equações 5.4 e 5.5 foram usadas nos cálculos de determinação de níveis de potência sonora pelo método direto segundo a norma ISO 3741 versão 1999.

$$L_w = \bar{L}_p + \left\{ 10 \log \frac{A}{A_0} + 4,34 \frac{A}{S} + 10 \log \left(1 + \frac{S \cdot c}{8 \cdot V \cdot f} \right) - 25 \log \left[\frac{427}{400} \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}} \cdot \frac{B}{B_0} \right] - 6 \right\} \text{ dB} \quad (5.4)$$

onde:

- L_w é o nível de potência sonora da fonte sonora sob teste (dB)
- \bar{L}_p é a média da pressão sonora na câmara (dB)
- A é a área equivalente de absorção sonora da câmara reverberante (m^2), dada na Equação 5.5
- A_0 = 1 m^2
- S é a área de superfície interna total da câmara reverberante (m^2)
- V é o volume da câmara reverberante (m^3)
- f é a frequência central de cada banda medida (Hz)
- c é a velocidade do som na temperatura ambiente θ
 $c = 20,05 \sqrt{273 + \theta} \text{ m/s}$
- θ é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)
- B é a pressão atmosférica (Pa)
- B_0 = $1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$

$$A = \frac{55,26}{c} \left(\frac{V}{T_{rev}} \right) \quad (5.5)$$

onde T_{rev} é o tempo de reverberação da câmara reverberante, em cada banda de terço de oitava, em segundos.

Medições de temperatura feitas com termo-higrômetro Minipa, modelo MT-242. As estimativas de pressão atmosférica foram obtidas através de boletins nos sites da Internet de órgãos de pesquisas meteorológicas, tais como o INPE. As velocidades de rotação da fonte sonora Vibranihil não foram medidas.

¹⁴⁵ A norma ISO 3741 : 1999 estabelece a medição dos tempos de reverberação na faixa de 15 dB, T_{15} . Foram obtidos apenas valores de T_{20} e T_{30} a partir do analisador e software Pulse, versão 10 (Brüel & Kjaer) que não calcula diretamente os valores de T_{15} .

5.1.2 Ensaio com fonte Vibranihil na câmara reverberante de 83 m³ do LVA-UFSC

O ensaio na câmara de 83 m³ foi apenas um levantamento dos desvios padrão dos níveis de pressão sonora, L_p , os quais foram muito elevados¹⁴⁶, sendo a câmara imprópria para medições de precisão. Ou seja, foi um teste de qualificação para medições de níveis de potência sonora, L_W , no qual a câmara foi reprovada segundo os critérios de desvios padrão de acordo com ISO 3741; reprovada em praticamente todas as bandas de frequências.

Tabela 5.1 - Resultados referentes à qualificação da câmara de 83 m³, câmara de protetores auditivos do LVA-UFSC. Valores de desvios padrão de 19 medições em diferentes posições de microfone, e tolerâncias de qualificação segundo Anexo E da norma ISO 3741:1999.

Frequência	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
L_p	64,17	60,39	63,06	62,52	60,10	59,58	59,59	60,35	61,15	61,95	63,59
$S(L_p)$	3,42	2,56	2,67	2,72	1,81	1,10	1,15	1,07	1,31	1,76	1,13
Tolerância	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
Reprovada	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Frequência	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	***
L_p	66,32	68,84	70,32	68,75	67,08	67,22	66,83	65,62	64,24	59,99	
$S(L_p)$	1,07	0,82	0,93	1,09	0,78	0,78	0,78	0,85	1,08	1,39	
Tolerância	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	***
Reprovada	sim	sim	sim	sim	não	não	não	não	sim	sim	

Foram 19 posições de microfone escolhidas aleatoriamente dentro da câmara reverberante¹⁴⁷, afastadas das paredes, piso e teto por cerca de 1 m no mínimo; fonte sonora posicionada no piso, ao centro da câmara, ver Figura 59. Os valores de níveis de pressão sonora, L_p , e desvios padrão, $S(L_p)$, são dados a seguir, na Tabela 5.1.

Os acessórios da câmara de protetores auditivos são: dois painéis de absorção sonora¹⁴⁸, espumas de absorção sonora, difusores cilíndricos de acrílico, caixas acústicas, mini-câmara de vídeo. O motivo para haver desvios padrão $S(L_p)$ relativamente elevados é a presença das espumas de absorção sonora. As posições de microfone próximas às espumas apresentaram valores com maiores variações e inferiores aos obtidos em pontos afastados das espumas.

Os resultados dos ensaios com a fonte Vibranihil nas câmaras reverberantes maiores (145 m³ e de 193 m³) e semi-aneecóica do LVA-UFSC, incluindo cálculos e análises das fontes incertezas e, são relatados e discutidos nas próximas subseções.

¹⁴⁶ O objetivo era verificar se a câmara poderia ser usada para alguma medição de potência sonora de acordo com requisitos normalizados em ISO 3741.

¹⁴⁷ Câmara reverberante de 83 m³ também é chamada câmara de ensaios de protetores auditivos, no LVA-UFSC.

¹⁴⁸ Painéis fabricados com madeira para absorção sonora em baixas frequências, da ordem de 100 a 250 Hz.

5.1.3 Resultados experimentais obtidos com a fonte sonora *Vibranihil*

Segundo Fuchs (2000) o nível de potência global, L_{WA} , gerado pela fonte *Vibranihil* é da ordem de 85 dB(A). Mas este valor é dependente da tensão e frequência de alimentação da rede elétrica, ou do inversor de tensão e/ou frequência¹⁴⁹, se utilizado. Ou seja, pelo fato de ser uma fonte sonora aerodinâmica o nível de potência sonora varia em função da velocidade de rotação que é em função da tensão de alimentação aplicada ao motor da fonte sonora. De fato, o L_{WA} gerado pela fonte *Vibranihil* não atingiu 85 dB(A) durante os ensaios nas câmaras acústicas do LVA-UFSC, ver figuras 60 e 61 e Tabela 5.2.

Para comparar o desempenho metrológico das câmaras acústicas do LVA-UFSC, foram feitos ensaios de determinação de potência sonora com a fonte sonora *Vibranihil*, dentre outras fontes sonoras, em três câmaras. Variações dos níveis de potência sonora medidos em diferentes câmaras são esperadas. Pois existem influências devido à excitação do campo sonoro dentro de cada câmara, além de variações inerentes aos equipamentos de medição e também variações inerentes à fonte sonora *Vibranihil*. Sendo que estas últimas também acarretam variações na determinação dos níveis de potência sonora independentemente da câmara acústica onde são usados.

Como pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 5.2, somente os ensaios em câmaras reverberantes tiveram seus resultados acompanhados de estimativa de incerteza de medição. Os resultados dos ensaios na câmara semi-aneecóica não mostram as incertezas associadas, as quais não foram estimadas. Foram dois ensaios que não contaram com medições repetitivas, portanto não pôde ser calculado o desvio experimental das medições em câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC. De fato, os resultados obtidos na câmara semi-aneecóica mostraram forte efeito sistemático. Fatores tais como os dias e horários (turnos) diferentes¹⁵⁰ nos quais foram executados os ensaios dão indícios de que **não houve condições de repetitividade** adequadas para se calcular valores de desvios e/ou incertezas baseadas nos resultados dos dois ensaios realizados na câmara semi-aneecóica. A Figura 60 é uma das representações gráficas de valores mostrados na Tabela 5.2. São valores médios apenas, por isto não há barras de erros representando desvios padrão ou incertezas.

¹⁴⁹ Inversores são dispositivos eletrônicos que podem ser usados para controlar a tensão elétrica eficaz e a frequência. E para isto, também podem ocorrer mudanças da forma de onda da tensão que será usada para alimentar os dispositivos, tal como uma fonte sonora.

¹⁵⁰ Medições da tensão da rede elétrica (220 V), que alimentava a fonte *Vibranihil* durante os ensaios, mostraram variações de alguns volts entre turno da tarde e durante a noite. Uma das causas pode ser o elevado consumo de energia de aparelhos condicionadores de ar (e computadores) nos dias de verão; durante a noite a maioria dos aparelhos ficam desligados no campus universitário.

No gráfico da Figura 60, referente a dois ensaios na câmara semi-aneecóica, pode-se observar forte **efeito sistemático**, sendo que todas as bandas de freqüências de terço de oitavas da medição 2 resultaram em níveis superiores aos resultados da medição 1; denominada “semi-aneecóica 1”. Este tipo de efeito sistemático irá correlacionar as bandas de terço de oitavas no processo de cálculo de incerteza do valor global de L_{WA} , em dB(A). Desta forma, é possível perceber que a aplicação da **incerteza padrão combinada** considerando as bandas de freqüência totalmente **não-correlacionadas**, poderá ficar comprometida. Obtendo-se um resultado, no balanço de incertezas, inferior ao que seria obtido ao se considerar tal correlação entre as bandas de freqüência. As causas deste efeito sistemático podem estar associadas principalmente com variações da tensão de alimentação da fonte sonora, e com o posicionamento do conjunto tripé-microfone de medição. De fato, foram usadas trenas diferentes para medir as distâncias nos dois ensaios e a posição da fonte sonora sobre o piso, que tem algumas irregularidades, não foi exatamente a mesma. Isto ocasiona variações na distância, r , entre fonte e posições de microfone que forma a semi-esfera imaginária estabelecida na norma ISO 3745. Estes fatores podem causar efeitos sistemáticos como aquele apresentado na Figura 60.

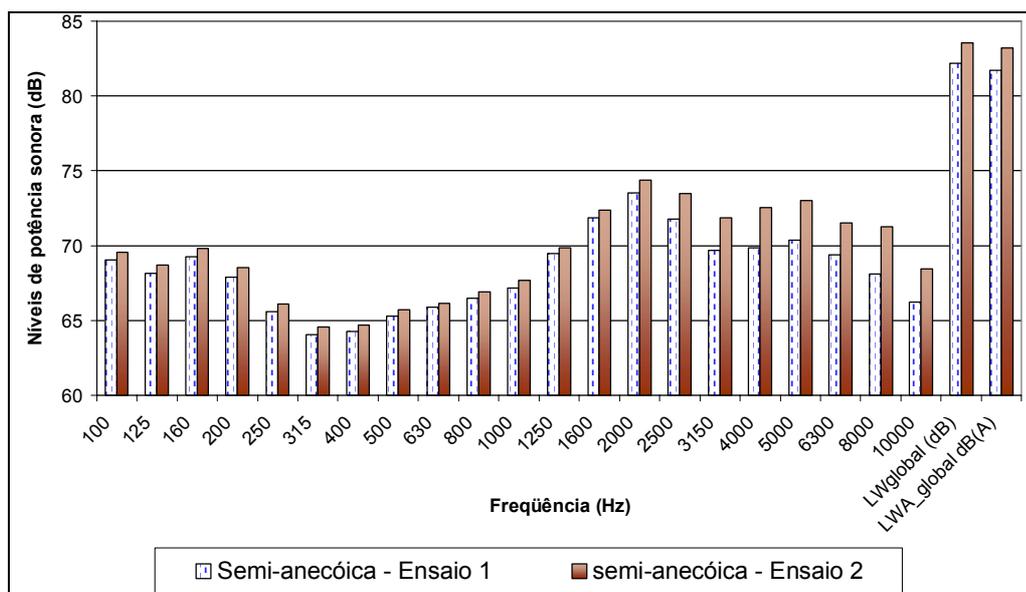


Figura 60 - Níveis de potência sonora em gráfico de barras. Comparativo de resultados entre dois ensaios de potência sonora com protótipo de fonte sonora Vibranihil na câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC.

Na Tabela 5.2 também estão os valores de média energética calculados a partir dos resultados experimentais de níveis de potência sonora dos quatro ensaios realizados com a fonte sonora Vibranihil, ver Equação 5.6, e os desvios padrão¹⁵¹ por banda de terço de oitava e dos valores globais; ver colunas à direita da tabela. Também são apresentados os valores por banda de terço de oitava e globais de níveis de potência sonora, L_W , em dB(A), acompanhados das estimativas de incertezas expandidas $U_{95\%}$, para ensaios feitos nas câmaras reverberantes. Os

¹⁵¹ Desvios padrão calculados diretamente a partir dos valores em decibéis, dB.

valores de estimativas das fontes de incertezas e cálculos de combinação de incertezas estão detalhados na Subseção 5.1.4.

$$\overline{L_{wi}} = 10 \log \left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M 10^{0,1 \cdot L_{wj}} \right) \quad (5.6)$$

onde $\overline{L_{wi}}$ é o nível de potência sonora médio (média energética) da *i*-ésima banda de terço de oitava, *M* é o número de ensaios considerados no cálculo da média energética, que neste caso foram quatro.

As incertezas expandidas $U_{95\%}$ (ou simplesmente *U*), mostradas na Tabela 5.2 foram calculadas sem considerar a **deriva** inerente ao calibrador de nível sonoro, estimada em torno de 0,1 dB. Pelo fato de ser um **efeito sistemático desconhecido e não compensado**, a deriva do calibrador sonoro deve ser acrescentada à incerteza expandida através de soma algébrica. Resultando na estimativa de incerteza de $U = (0,19 + 0,1) = \mathbf{0,29 \text{ dB}}$ para ambos os resultados globais mostrados na Tabela 5.2, referentes aos ensaios nas câmaras reverberantes de 145 e 193 m³, com a fonte sonora Vibranihil sob teste.

Nas medições em câmaras reverberantes, semelhantemente às medições na câmara semi-anecóica, houve variações na tensão da rede elétrica que alimentava a fonte sonora, dentre outros equipamentos. Medições da tensão elétrica com multímetro¹⁵² apresentaram variações de 4 a 7 volts entre os diversos horários dos quatro ensaios realizados¹⁵³. Assim, em fontes sonoras do tipo aerodinâmicas, como a Vibranihil, o nível de potência sonora tende a aumentar devido a elevações na tensão de alimentação, as quais provocam aumento na velocidade de rotação da fonte sonora. Porém os L_{WA} por bandas de terço de oitavas, em câmaras reverberantes, não mostraram o forte **efeito sistemático** tal como ocorreu na câmara semi-anecóica; ver Tabela 5.2, Figura 60, Figura 61 e Figura 68, na Subseção 5.1.5, para comparação entre estes resultados. De fato, o gráfico de barras na Figura 61 é a representação gráfica dos dados da Tabela 5.2; exceto as incertezas associadas apresentadas na quinta e sétima colunas da tabela. Estas incertezas, $U_{95\%}$, estão representadas graficamente, através de barras de erros na Figura 68, na Subseção 5.1.5, que se refere somente aos ensaios nas duas câmaras reverberantes, ver Subseção 5.1.4.

¹⁵² Marca Minipa, sem certificado de calibração.

¹⁵³ Valores entre 221 e 228 volts.

Tabela 5.2 - Valores dos níveis de potência sonora, L_{WA} , da fonte **Vibranihil** medidos nas câmaras acústicas do LVA-UFSC. Também valores de incertezas expandidas $U_{95\%}$ calculadas para as medições nas câmaras reverberantes; temperatura e pressão atmosférica durante os ensaios.

Frequência (Hz)	Semi-aneecóica Ensaio 1 L_{WA} dB(A) **	Semi-aneecóica Ensaio 2 L_{WA} dB(A) **	Reverberante 193 m ³ ($L_{WA} \pm U_{95\%}$) dB(A)		Reverberante 145 m ³ ($L_{WA} \pm U_{95\%}$) dB(A)		Média energética L_{WA} dB(A)	Desvio padrão das 4 medições dB
100	49,96	50,48	47,48	3,03	45,28	3,78	48,76	2,40
125	52,06	52,60	50,52	3,12	50,92	2,40	51,60	0,97
160	55,88	56,41	54,76	2,89	54,28	2,71	55,42	0,98
200	56,99	57,62	57,41	2,30	55,71	1,07	56,99	0,86
250	57,02	57,51	57,05	1,09	57,91	1,74	57,39	0,42
315	57,44	57,97	58,02	1,07	57,90	0,62	57,84	0,27
400	59,47	59,88	60,00	0,60	60,59	1,20	60,01	0,46
500	62,10	62,50	62,78	0,81	63,05	1,06	62,62	0,41
630	64,00	64,25	64,92	0,61	65,10	0,61	64,59	0,53
800	65,67	66,12	66,79	0,50	66,99	0,76	66,42	0,61
1000	67,15	67,70	68,74	0,49	68,75	0,73	68,14	0,80
1250	70,06	70,44	71,55	0,46	71,29	0,46	70,88	0,70
1600	72,87	73,36	74,16	0,51	74,63	0,59	73,81	0,79
2000	74,71	75,60	75,76	0,51	76,28	0,45	75,62	0,65
2500	73,07	74,79	74,35	0,52	74,68	0,48	74,27	0,79
3150	70,89	73,06	71,90	0,46	72,26	0,66	72,10	0,90
4000	70,87	73,56	71,28	0,50	71,77	0,54	72,00	1,19
5000	70,89	73,51	69,82	0,51	70,61	0,60	71,44	1,60
6300	69,31	71,42	67,59	0,57	68,27	0,56	69,40	1,68
8000	67,03	70,15	65,08	1,18	65,89	0,66	67,50	2,22
10000	63,73	65,96	59,97	5,16	62,39	0,79	63,54	2,51
Global dB(A)	81,71	83,24	82,41	0,19*	82,81	0,19*	82,58	0,65
Temperatura (°C) ***	25,6	26,3	24,6		25,0		***	***
Pressão atmosférica (milibar)	1009	1015	1012		1009		***	***

* Obs.: incertezas expandidas ($U_{95\%}$) calculadas **sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro**. Valores de incertezas foram **arredondados para cima**.

** Obs.: dois ensaios em apenas uma câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC.

*** Temperatura dos ensaios de níveis de pressão sonora L_p .

Na Figura 61 pode-se observar uma comparação geral dos quatro ensaios realizados com a fonte sonora Vibranihil. No gráfico, cada banda de terço de oitava mostra cinco barras, que representam os resultados dos quatro ensaios, e a média energética destes quatro ensaios¹⁵⁴ com barras de erros representando o desvio padrão. Todos os valores representados na Figura 61, e na Figura 68, na Subseção 5.1.5, estão ponderados pela “curva A”; valores em dB(A).

¹⁵⁴ Média energética dos valores de níveis de pressão sonora, L_{pi} , é calculada usando a Equação 5.1, neste caso $N = 4$.

Conforme se pode observar na Figura 61 e Tabela 5.2, as bandas de terço de oitavas que apresentaram melhor concordância entre os valores de L_{WA} , e tiveram os menores valores de desvios padrão entre os resultados dos quatro ensaios com a fonte Vibranihil, foram as bandas de frequências entre 250 e 630 Hz, com desvios padrão entre 0,27 e 0,53 dB, que são os menores encontrados naquela estatística.

A seguir, na Subseção 5.1.4, será comprovado que a contribuição das bandas de baixas frequências tem pouca ou nenhuma influência na incerteza associada ao valor global de nível de potência sonora em dB(A).

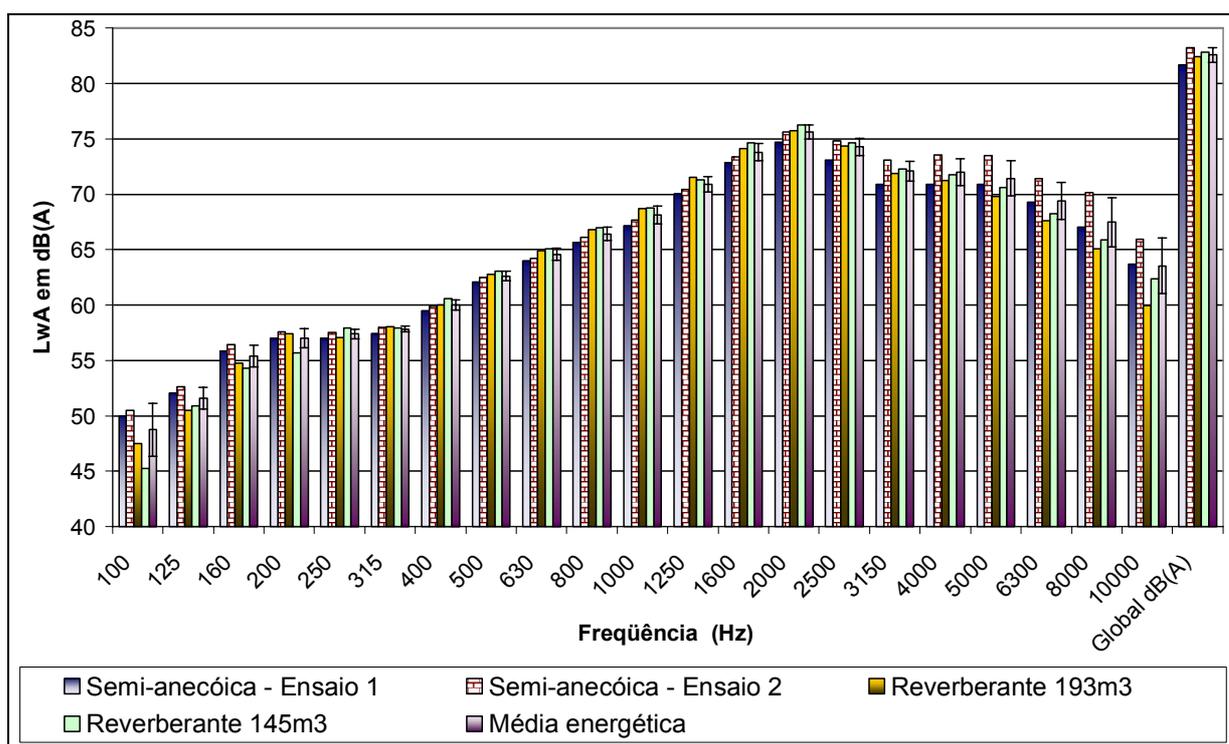


Figura 61 - Níveis de potência sonora em dB(A). Comparativo de resultados de quatro ensaios de potência sonora com protótipo de fonte sonora Vibranihil em câmaras acústicas distintas. Em duas câmaras reverberantes e uma câmara semi-aneecóica do LVA-UFSC. Barras de erros representam os desvios padrão dos resultados dos quatro ensaios, por banda de frequência e valores globais.

O espectro de níveis de potência sonora obtido em câmara semi-aneecóica, campo sonoro livre, mostra valores mais acentuados nas bandas de frequências mais baixas e mais altas; 160 Hz e frequências inferiores, e em 6,3 kHz e frequências superiores; ver Figura 61. Nas bandas de 100 a 160 Hz os resultados em câmaras reverberantes foram tendenciosamente menores que os em câmara semi-aneecóica. Estes desvios de caráter sistemático podem ter sido causados devido à contribuição da energia sonora próxima às paredes da câmara reverberante, que não foi computada porque os microfones devem ficar afastados das mesmas¹⁵⁵. Apesar da

¹⁵⁵ Microfones devem ficar afastados das paredes, piso, teto e acessórios (difusores e painéis de absorção) da câmara reverberante. De acordo com a norma ISO 3741 : 1999.

aplicação da correção de Waterhouse (ver GERGES 2000, p272) efetuada de acordo com a Equação 5.4, para compensar este efeito, ainda pode ter havido efeitos residuais que não foram corrigidos, resultando em desvios sistemáticos apresentados em baixas frequências. O fator de correção de Waterhouse, aqui chamado FW , é dado pela Equação 5.7.

$$FW = 10 \log \left(1 + \frac{S.c}{8.V.f} \right) \quad (5.7)$$

As diferenças dos valores obtidos em altas frequências, a partir de 6,3 kHz, podem estar associadas diretamente ao efeito de reflexão das ondas sonoras nas cunhas de absorção da câmara semi-aneecóica. Testes realizados por outras equipes de pesquisas do LVA, e um ensaio de sensibilidade de microfone, feitos na câmara semi-aneecóica mostraram que em altas frequências as cunhas de espuma refletem parte significativa da energia sonora; coincidentemente a partir de 6,3 kHz. Este fato é atribuído à presença de partículas de poeira e umidade acumuladas sobre a superfície das cunhas de espuma, que prejudicam a absorção sonora principalmente em altas frequências. E o efeito final das reflexões na câmara semi-aneecóica é o aumento dos níveis de pressão sonora L_p , captados pelo microfone de medição¹⁵⁶. Resultando em aumento nos valores dos níveis de potência sonora calculados para altas frequências naquela câmara acústica.

Na câmara de 193 m³ e em altas frequências, a partir de 5 kHz, houve uma ligeira queda nos níveis de potência sonora, ver Figura 61. Estas quedas foram mais acentuadas que os valores de L_{WA} encontrados nas outras câmaras acústicas. Isto pode ser atribuído à absorção sonora do ar em altas frequências, pois o volume desta câmara é maior que as outras. O efeito sistemático ocorreu nos resultados de L_{WA} calculados conforme Equação 5.1.4, apesar da aplicação do fator de correção devido à absorção do ar em câmaras reverberantes¹⁵⁷.

A banda de terço de oitava de maior nível de potência sonora foi a de 2 kHz, além das bandas adjacentes; 1600 e 2500 Hz que tiveram valores de L_{WA} próximos a 75 dB(A). Desta forma, concentrando parte significativa da energia sonora emitida pela fonte Vibranihil em três bandas de terço de oitavas. As conseqüências disto podem ser notadas no cálculo detalhado das incertezas padrão combinada, ver Subseções em 5.1.4 a seguir.

¹⁵⁶ O microfone foi posicionado a 1,50 m da fonte sonora e a cerca de 2 a 3 m das cunhas de espuma da câmara semi-aneecóica.

¹⁵⁷ Fator de correção 4,34.A/S pesquisado por M. Vorländer (1995). (Acustica, vol. 81, 1995, p.332-343)

5.1.4 Cálculos de incertezas dos ensaios com fonte sonora Vibranihil nas câmaras reverberantes LVA-UFSC

Com o objetivo de estimar as incertezas relativas à determinação de níveis de potência sonora da fonte Vibranihil, foram realizados ensaios repetitivos de medições dos tempos de reverberação de cada uma das câmaras reverberantes do LVA-UFSC, medições de níveis de pressão sonora com fonte Vibranihil dentro de cada câmara¹⁵⁸, além de estimativas de incertezas dos equipamentos da cadeia de medição¹⁵⁹. Os valores das incertezas globais calculados já foram apresentados anteriormente, na Tabela 5.2. Nesta seção serão expostos os **procedimentos e valores intermediários dos cálculos**, e as estimativas de fontes de incertezas. Além de análises comparativas entre as fontes de incertezas que tiveram maior influência sobre os valores finais das incertezas dos níveis de potência sonora global em dB(A).

Os procedimentos dos cálculos segundo o Guia para a expressão de incerteza de medição, ISO GUM, inicialmente visam efetuar a combinação de incertezas padrão. Sendo necessário aplicar as Equações 5.8 e 5.9, no caso específico de incertezas na determinação de níveis potência sonora pelo método direto em câmaras reverberantes.

$$u_c^2(L_W) = \sum_i c_i^2 \cdot u_i^2 \quad (5.8)$$

$$c_i = \frac{\partial L_W}{\partial x_i} \quad (5.9)$$

onde L_W é dado pela Equação 5.4, na Subseção 5.1.1; c_i são os coeficientes de sensibilidade¹⁶⁰ relativos às fontes de incertezas; u_i são as estimativas de incertezas padrão, x_i representa cada uma das grandezas de entrada, e u_c é a incerteza padrão combinada.

Como pode ser visto na Tabela 5.4, na Subseção 5.1.4.1, por exemplo, os coeficientes de sensibilidade, quando multiplicados pela estimativa de incerteza (bruta) da grandeza, de entrada produzem um resultado em decibel. Assim há uma compatibilização de unidades das estimativas de incertezas para o cálculo da incerteza padrão combinada u_c ; todas as unidades convertidas para dB. E, assumindo a simbologia apresentada na Tabela 5.5, na Subseção 5.1.4.1, as Equações 5.8 e 5.9, neste caso específico produz a Equação 5.10. Esta última é denominada de soma quadrática das estimativas de incertezas:

¹⁵⁸ Avaliações “Tipo A” das incertezas de medições; através de análise estatística dos dados obtidos nas medições.

¹⁵⁹ Avaliação “Tipo B” da incerteza.

¹⁶⁰ Derivadas parciais da grandeza de saída (nível de potência sonora L_W) em relação às grandezas de entrada x_i . Para cada banda de terço de oitava.

$$u_c = \sqrt{u_{L_p}^2 + u_{T_{rev}}^2 + u_V^2 + u_S^2 + u_t^2 + u_B^2 + u_f^2} \quad \text{em dB} \quad (5.10)$$

onde u_{L_p} , $u_{T_{rev}}$, u_V , u_S , u_t , u_B e u_f são as estimativas de incertezas padrão relativas aos: níveis de pressão sonora L_p , tempo de reverberação T_{rev} , volume (m^3) da câmara, superfície interna da câmara reverberante (m^2), temperatura ambiente, pressão barométrica (ou atmosférica), e frequência central da banda de terço de oitava, respectivamente. Todas estas estimativas estão em dB. Exemplos da aplicação da Equação 5.10 podem ser vistos na Tabela 5.5, na Subseção 5.1.4.1, e Tabela 5.9, na Subseção 5.1.4.2.

Após calcular a incerteza padrão combinada u_c dada pela Equação 5.10, é possível calcular as incertezas expandidas $U_{95\%}$, aqui denominadas $U(L_W)$, para cada banda de terço de oitava. Sendo necessário usar o fator de abrangência k para multiplicar a incerteza padrão em cada banda de terço de oitava, ver Equação 5.11. Foi aplicado fator de abrangência $k = 2,0$.

$$U_c(L_W) = k \cdot u_c(L_W) \quad (5.11)$$

Os desvios padrão experimentais obtidos através das medições de L_p e de T_{rev} foram usados para calcular as estimativas das incertezas padrão u_{L_p} e $u_{T_{rev}}$, respectivamente; ver Tabelas 5.3, 5.4, 5.7, 5.8, nas Subseções 5.1.4.1 e 5.1.4.2. As incertezas padrão do volume e superfície das câmaras foram estimadas a partir de medições com trena das dimensões de cada câmara reverberante.

5.1.4.1 Investigação das fontes de incertezas predominantes, fonte sonora Vibranihil ensaiada na câmara reverberante de $193 m^3$

Os três elementos principais para a investigação da incerteza da fonte sonora Vibranihil foram: a incerteza da cadeia de medição, estimada através de u_{ccm} ; os desvios padrão de tempos de reverberação $S(T_{rev})$, da câmara de $193 m^3$ nominal; e os desvios padrão dos níveis de pressão sonora S_{L_p} , medidos na câmara reverberante com a fonte Vibranihil¹⁶¹.

O parâmetro denominado u_{ccm} é a incerteza padrão combinada estimada para a cadeia de medição acústica¹⁶², a qual contabiliza as incertezas inerentes ao: calibrador de nível sonoro¹⁶³, à resposta em frequência do microfone de medição, pré-amplificador e analisador de sinais. Mas não considera a estimativa da deriva do calibrador de nível sonoro. Os desvios

¹⁶¹ Energizada em 220 volts da rede elétrica local.

¹⁶² Resumidamente: u_{ccm} : incerteza (*uncertainty*) combinada da cadeia de medição.

¹⁶³ Exceto a contribuição de incerteza referente à deriva do calibrador sonoro. Na intenção de computar inicialmente só as fontes de incertezas de caráter aleatório, e acrescentar os desvios relativos aos efeitos sistemáticos após o balanço de incertezas.

padrão dos níveis de pressão sonora, medidos na câmara reverberante de 193 m³ com fonte Vibranihil, e valores de u_{ccm} são dados na Tabela 5.3.

Para estimar a incerteza padrão dos níveis de pressão sonora medidos u_{Lp} , foi necessário fazer uma combinação entre as incertezas inerentes à cadeia de medição (u_{ccm}) e os **desvios padrão experimentais dos níveis de pressão sonora** $S(L_p)$. Esta combinação resulta na estimativa de incerteza das medições dos níveis de pressão sonora (considerada de caráter aleatório) $X_{Lp_aleatório}$, que é dada pela Equação 5.13. Esta estimativa é multiplicada pelo coeficiente de sensibilidade c_1 e dividida pelo divisor d_{Lp} para que seja encontrado o valor da estimativa de incerteza padrão dada na Equação 5.12. Neste caso o coeficiente de sensibilidade e o divisor têm valor igual a 1,0. E os valores calculados são apresentados na Tabela 5.3.

$$u_{Lp} = X_{Lp_aleatório} \cdot c_1 / d_{Lp} \quad (5.12)$$

onde:

$$X_{Lp_aleatório} = \sqrt{(u_{ccm})^2 + (S_{Lp})^2} \quad (5.13)$$

O coeficiente de sensibilidade c_1 é computado de acordo com a Equação 5.14, em cada banda de terço de oitava. O divisor d_{Lp} assume valor 1,0 devido à distribuição de probabilidade, que foi arbitrada como sendo distribuição normal.

$$c_1 = \frac{\partial L_w}{\partial L_p} = 1,0 \quad (5.14)$$

Com relação aos valores da Tabela 5.3, foi dada ênfase à linha correspondente a 2000 Hz, devido à grande parcela de energia sonora presente nesta banda. Pode-se notar que o desvio padrão experimental de L_p e a incerteza estimada para a cadeia de medição, u_{ccm} , contribuem com aproximadamente 0,17 dB, cada uma, para produzir a estimativa $X_{Lp_aleatório}$ de 0,24 dB, em 2000 Hz. Resultando em $u_{Lp}(L_w)$ igual a 0,24 dB; valor que terá influência significativa sobre a incerteza do valor global de nível de potência sonora.

Tabela 5.3 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , câmara de 193 m³ (nominal) do LVA-UFSC, fonte sonora Vibranihil, novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)	u_{ccm} (dB)	$X_{L_p, aleatório}$ (dB)	c_1	d_{L_p}	$u_{L_p}(L_W)$ [dB]
100	1,46	0,172	1,47	1,0	1,0	1,47
125	1,45	0,172	1,46	1,0	1,0	1,46
160	1,23	0,172	1,24	1,0	1,0	1,24
200	0,99	0,172	1,00	1,0	1,0	1,00
250	0,28	0,172	0,32	1,0	1,0	0,32
315	0,35	0,172	0,39	1,0	1,0	0,39
400	0,18	0,172	0,25	1,0	1,0	0,25
500	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23
630	0,24	0,172	0,29	1,0	1,0	0,29
800	0,13	0,172	0,22	1,0	1,0	0,22
1000	0,14	0,172	0,22	1,0	1,0	0,22
1250	0,06	0,172	0,18	1,0	1,0	0,18
1600	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23
2000	0,17	0,172	0,24	1,0	1,0	0,24
2500	0,12	0,172	0,21	1,0	1,0	0,21
3150	0,12	0,172	0,21	1,0	1,0	0,21
4000	0,17	0,172	0,24	1,0	1,0	0,24
5000	0,17	0,172	0,24	1,0	1,0	0,24
6300	0,17	0,215	0,27	1,0	1,0	0,27
8000	0,21	0,215	0,30	1,0	1,0	0,30
10000	0,31	0,215	0,37	1,0	1,0	0,37

A estimativa da incerteza Tipo A, experimental, dos tempos de reverberação $X_{T_{rev}}$, da câmara de 193 m³ (nominal) foi encontrada a partir dos desvios padrão das medições de tempos de reverberação. E para encontrar os valores estimados para a incerteza padrão $u_{T_{rev}}$, foi utilizada a Equação 5.15, na qual foi aplicada a multiplicação pelo coeficiente de sensibilidade c_2 , e divisão pelo divisor¹⁶⁴ $d_{T_{rev}}$. Um dos papéis de c_2 é a compatibilização de unidades, proporcionando estimativas de incerteza em decibel, dB. Este coeficiente é dado pela derivada parcial de L_W em relação à T_{rev} em cada banda de terço de oitava, ver Equação 5.16. Portanto, o coeficiente c_2 representa uma espécie de taxa da influência relativa à variação do tempo de reverberação sobre o valor do nível de potência sonora na respectiva banda de frequência.

$$u_{T_{rev}} = X_{T_{rev}} \cdot c_2 / d_{T_{rev}} \quad (5.15)$$

onde:

$$c_2 = \frac{\partial L_W}{\partial T_{rev}} = \frac{-4,34}{T_{rev}} - \frac{12,0V}{T_{rev}^2 S \sqrt{273 + \theta}} \quad em \text{ dB} / s \quad (5.16)$$

¹⁶⁴ Atribuindo-se uma distribuição de probabilidade normal aos tempos de reverberação medidos, por isto: $d_{T_{rev}} = 1,0$.

onde θ é a temperatura¹⁶⁵ em graus Celsius (°C), ($V = 192,67 \text{ m}^3$) é o volume da câmara reverberante, ($S = 208,06 \text{ m}^2$) é a área de superfície interna da câmara reverberante, e T_{rev} são os tempos de reverberação da câmara relativos a cada banda de frequência de terço de oitava. Portanto, o coeficiente de sensibilidade c_2 varia em função da frequência central de cada banda. Ver Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m^3 do LVA-UFSC em novembro de 2005. As estimativas de incertezas $X_{T_{\text{rev}}}$ foram obtidas a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor $d_{T_{\text{rev}}}$ e incertezas padrão combinada $u_{T_{\text{rev}}}(L_W)$.

Frequência central (Hz)	T_{rev} (s) *	$X_{T_{\text{rev}}}$ (s)	c_2 (dB/s)	$d_{T_{\text{rev}}}$	$u_{T_{\text{rev}}}(L_W)$ [dB]
100	10,47	0,81	-0,42	1,0	0,34
125	9,97	1,22	-0,44	1,0	0,54
160	8,53	1,43	-0,52	1,0	0,74
200	6,90	0,87	-0,64	1,0	0,56
250	6,77	0,67	-0,66	1,0	0,44
315	6,12	0,50	-0,73	1,0	0,36
400	7,02	0,26	-0,63	1,0	0,16
500	7,83	0,59	-0,56	1,0	0,33
630	7,82	0,15	-0,57	1,0	0,08
800	7,53	0,20	-0,59	1,0	0,12
1000	7,21	0,16	-0,61	1,0	0,10
1250	6,83	0,21	-0,65	1,0	0,13
1600	6,52	0,16	-0,68	1,0	0,11
2000	5,95	0,10	-0,75	1,0	0,08
2500	5,17	0,17	-0,86	1,0	0,15
3150	4,56	0,09	-0,98	1,0	0,09
4000	3,90	0,05	-1,16	1,0	0,05
5000	3,31	0,06	-1,37	1,0	0,08
6300	2,64	0,05	-1,74	1,0	0,09
8000	2,13	0,23	-2,18	1,0	0,51
10000	2,04	1,12	-2,28	1,0	2,55

* T_{rev} são os tempos de reverberação T_{20} .

A linha correspondente a banda de 2000 Hz na Tabela 5.4 foi realçada pelo fato da importância da contribuição de incerteza desta banda, que teve maior nível de potência sonora dentre as outras bandas. Interpretando detalhadamente esta linha, pode-se ler os seguintes valores: tempo de reverberação médio T_{rev} de 5,95 segundos, estimativa de incerteza baseada no desvio padrão dos tempos reverberação $X_{T_{\text{rev}}}$ de 0,10 segundo, coeficiente de sensibilidade de aproximadamente -0,75 dB/s, divisor relativo à distribuição de probabilidade $d_{T_{\text{rev}}}$ igual a 1,0; e incerteza padrão $u_{T_{\text{rev}}}$ estimada em 0,08 dB. Este último valor pode ser considerado relativamente pequeno ao se comparar com a incerteza inerente ao calibrador de nível sonoro, por exemplo. Comparando-se os valores de incertezas padrão u_{L_p} e $u_{T_{\text{rev}}}$ na banda de 2000 Hz,

¹⁶⁵ Os valores de temperatura dos ensaios de níveis de pressão sonora L_p , dados na Tabela 5.2, não são exatamente os mesmos que os ocorridos durante os ensaios de tempo de reverberação T_{rev} , pois os ensaios foram feitos em dias diferentes.

0,24 dB e 0,08 dB respectivamente, e considerando que os valores são elevados ao quadrado na combinação de incertezas, nota-se que a contribuição de incerteza inerente a L_p é cerca de nove vezes maior que a contribuição de incerteza de T_{rev} . Pelo menos para este ensaio, na banda de frequência de 2000 Hz, com fonte Vibranihil na câmara reverberante de 193 m³ e nas circunstâncias específicas que foram implementadas as respectivas medições.

Os detalhes de como foram encontrados os valores das estimativas de u_v , u_s , u_t , u_B e u_f não são apresentados neste capítulo. E os respectivos coeficientes de sensibilidade: c_3 , c_4 , c_5 , c_6 e c_7 não estão explicitados neste capítulo. Apenas os valores estimados destas fontes de incertezas são apresentados na Tabela 5.5, sendo computados no balanço de incerteza combinada de nível de potência sonora, de cada banda de terço de oitava. A combinação de incertezas padrão feita através de soma quadrática (ou geométrica) cujos valores são apresentados na Tabela 5.5 está de acordo com a Equação 5.10, na Subseção 5.1.4.

Observando-se a segunda e a terceira colunas da Tabela 5.5, pode-se notar a predominância da contribuição (grande influência) das medições dos níveis de pressão sonora, L_p , e dos tempos de reverberação, T_{rev} . Estas são as fontes de incertezas predominantes, dentre outros parâmetros presentes no cálculo de determinação de nível de potência sonora, L_W , em todas as bandas de frequência; de 100 Hz a 10 kHz.

A incerteza padrão combinada $u_c(L_W)$ mostrou valores maiores nas bandas de baixas frequências, e na banda de 10 kHz. Nesta última devido ao valor elevado de incerteza do tempo de reverberação em 10 kHz, $u_{T_{rev}}(L_W) = 2,55$ dB; a causa deste desvio padrão elevado é explicada na Subseção 5.1.4.4.

Na banda de 2000 Hz e bandas adjacentes foram obtidas incertezas padrão combinadas da ordem de 0,26 dB. Sendo aplicado fator de abrangência $k = 2,0$ foram então obtidas incertezas expandidas, $U(L_W)$, da ordem de 0,51 a 0,52 dB naquelas bandas de terço de oitava (ver Tabela 5.5).

Tabela 5.5 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Câmara de 193 m³, fonte sonora Vibranihil, novembro de 2005.

Frequência central (Hz)	$u_{L_p}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_i(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_t(L_W)$ [dB]	$u_c(L_W)$ [dB]	$U(L_W)$ [dB]
100	1,47	0,34	0,018	0,005	0,015	0,019	0,080	1,51	3,03
125	1,46	0,54	0,019	0,005	0,015	0,019	0,068	1,56	3,12
160	1,24	0,74	0,020	0,004	0,014	0,019	0,062	1,44	2,89
200	1,00	0,56	0,021	0,003	0,014	0,019	0,047	1,15	2,30
250	0,32	0,44	0,022	0,002	0,014	0,019	0,039	0,55	1,09
315	0,39	0,36	0,023	0,002	0,014	0,019	0,033	0,53	1,07
400	0,25	0,16	0,024	0,001	0,013	0,019	0,028	0,30	0,60
500	0,23	0,33	0,024	0,001	0,013	0,019	0,021	0,40	0,81
630	0,29	0,08	0,024	0,001	0,013	0,019	0,018	0,31	0,61
800	0,22	0,12	0,025	0,001	0,013	0,019	0,015	0,25	0,50
1000	0,22	0,10	0,025	0,000	0,013	0,019	0,011	0,24	0,49
1250	0,18	0,13	0,025	0,000	0,013	0,019	0,009	0,23	0,46
1600	0,23	0,11	0,026	0,000	0,013	0,019	0,008	0,26	0,51
2000	0,24	0,08	0,026	0,000	0,013	0,019	0,006	0,26	0,51
2500	0,21	0,15	0,026	0,000	0,013	0,019	0,005	0,26	0,52
3150	0,21	0,09	0,026	0,000	0,012	0,019	0,004	0,23	0,46
4000	0,24	0,05	0,026	0,000	0,012	0,019	0,003	0,25	0,50
5000	0,24	0,08	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,26	0,51
6300	0,27	0,09	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,29	0,57
8000	0,30	0,51	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,59	1,18
10000	0,37	2,55	0,027	0,001	0,012	0,019	0,001	2,58	5,16

Com o objetivo de combinar as incertezas das bandas de terço de oitava, foram utilizadas as Equações 5.17 e 5.18, obtendo-se assim a incerteza que será atribuída ao nível de potência sonora global da fonte Vibranihil, na câmara de 193 m³. Os coeficientes de sensibilidade denominados c_j ponderam a influência correspondente a j -ésima banda de frequência de terço de oitava, L_{WAj} , em relação ao valor do nível de potência sonora global L_{WA} em dB(A); ver Equação 5.17.

$$c_j = \frac{\partial L_{WA}}{\partial L_{WAj}} = 10^{0,1(L_{Wj} + A_j - L_{WA})} \quad (5.17)$$

$$u_c(L_{WA}) = \sqrt{\sum_j (c_j(u_c)_j)^2} \quad (5.18)$$

onde L_{Wj} é o nível de potência sonora em dB da j -ésima banda de frequência, A_j corresponde aos valores da “curva de ponderação A”, L_{WA} é valor do nível de potência sonora global em dB(A), e L_{WAj} são os valores de níveis de potência sonora em dB(A) referentes a cada banda de frequência.

Os coeficientes de sensibilidade c_j ponderam as incertezas em função dos níveis de potência sonora de cada banda¹⁶⁶, L_{Wj} , e dos valores de A_j ; referentes à “curva A”. Além disto, ao se combinar as incertezas das diversas bandas de frequências, conforme a Equação 5.18, as parcelas já ponderadas, $c_j u_c$, são elevadas ao quadrado, e isto aumenta o efeito da própria ponderação proporcionada pelos coeficientes de sensibilidade c_j . Os valores de $(c_j u_c)^2$ são apresentados na sétima coluna da Tabela 5.6, e na penúltima linha da tabela estão os resultados de incertezas calculadas para os valores globais.

Na Tabela 5.6 são mostrados o coeficiente c_j e um indicador denominado “ $1 / c_j$ ”. Este último ajuda a compreender a ordem de grandeza da influência de cada nível de potência sonora, em dB(A), sobre a incerteza da banda de terço de oitava. Nota-se que nas bandas onde ocorreram os menores valores do indicador $1 / c_j$ as contribuições de incertezas foram as mais elevadas.

O maior valor dentre os coeficientes de sensibilidade c_j ocorreu na banda de 2000 Hz; $c_j = 0,216$. Sendo que nesta mesma banda de frequência ocorreu a parcela de maior valor do somatório quadrático, dado pela Equação 5.18, e cujo valor é apresentado na sétima coluna da Tabela 5.6; $(c_j u_c)^2 = 0,0031 \text{ dB}^2$.

A incerteza expandida do nível de potência sonora global, em dB(A), resultou em $U(L_{WA}) = 0,19 \text{ dB}$, sem considerar a estimativa da deriva do calibrador de nível sonoro nos cálculos. Foi usado fator de abrangência $k = 2,0$, e a incerteza foi arredondada para cima, com duas casas decimais, ver penúltima linha da Tabela 5.6.

Com o objetivo de computar a incerteza referente à deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro, foi necessário fazer a soma algébrica¹⁶⁷ da estimativa desta deriva com a incerteza expandida calculada no balanço de incertezas que foi apresentado nas Tabelas 5.5 e 5.6. E isto resultou em:

$$U_{(L_{WA})\text{Total}} = U(L_{WA}) + \text{Deriva}_{\text{cal}} = 0,19 + 0,10 = 0,29 \text{ dB(A)}$$

Portanto, o resultado desta determinação de potência sonora foi: **$L_{WA} = 82,41 \pm 0,29 \text{ dB(A)}$** , considerando a faixa de frequência de 100 Hz a 10 kHz e intervalo de confiança de aproximadamente 95 % (protótipo de fonte sonora Vibranihil na câmara de 193 m³ do LVA-UFSC).

¹⁶⁶ Níveis de potência sonora L_{Wj} estão em dB(F), ainda sem ponderação. F significa *flat*, ou seja, plano. A curva de resposta plana foi utilizada para obter os valores “brutos” ou “originais” das medições de níveis de pressão sonora.

¹⁶⁷ Porque a deriva foi considerada um efeito sistemático.

Tabela 5.6 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de nível de potência sonora em dB(A). Câmara reverberante de 193 m³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora Vibranihil, novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Correção curva "A" (dB)	L _{wj} dB	c _j	u _c (L _{wj}) (dB)	c _j u _c (dB)	(c _j u _c) ² (dB) ²	1 / c _j
100	-19,1	66,58	0,000	1,51	0,000	0,0000	3112,3
125	-16,1	66,62	0,001	1,56	0,001	0,0000	1544,1
160	-13,4	68,16	0,002	1,44	0,002	0,0000	582,0
200	-10,9	68,31	0,003	1,15	0,004	0,0000	316,3
250	-8,6	65,65	0,003	0,55	0,002	0,0000	343,4
315	-6,6	64,62	0,004	0,53	0,002	0,0000	274,6
400	-4,8	64,80	0,006	0,30	0,002	0,0000	173,9
500	-3,2	65,98	0,011	0,40	0,004	0,0000	91,9
630	-1,9	66,82	0,018	0,31	0,005	0,0000	56,1
800	-0,8	67,59	0,027	0,25	0,007	0,0000	36,5
1000	0	68,74	0,043	0,24	0,010	0,0001	23,3
1250	0,6	70,95	0,082	0,23	0,019	0,0003	12,2
1600	1	73,16	0,150	0,26	0,038	0,0015	6,7
2000	1,2	74,56	0,216	0,26	0,056	0,0031	4,6
2500	1,3	73,05	0,156	0,26	0,041	0,0017	6,4
3150	1,2	70,70	0,089	0,23	0,020	0,0004	11,3
4000	1	70,28	0,077	0,25	0,019	0,0004	13,0
5000	0,5	69,32	0,055	0,26	0,014	0,0002	18,2
6300	-0,1	67,69	0,033	0,29	0,009	0,0001	30,4
8000	-1,1	66,18	0,019	0,59	0,011	0,0001	54,0
10000	-2,5	62,47	0,006	2,58	0,015	0,0002	175,5
					u _c (L _{WA}) dB	U(L _{WA}) dB	
Global					0,091	0,19	k = 2,0

Obs.: Incerteza U(L_{WA}) arredondada para cima, com duas casas decimais.

Como ocorreu com outros tipos de fontes sonoras testadas em câmaras reverberantes, as incertezas de medição dos níveis de pressão sonora apresentaram grande influência sobre o valor da incerteza global de cada banda de oitava. E também sobre a incerteza expandida U_{95%} do nível global de potência sonora da fonte Vibranihil.

As variações quantificadas pelos **desvios padrão experimentais** dos níveis de pressão sonora $S(L_p)$, e dos tempos de reverberação $S(T_{rev})$ são as fontes de incertezas que predominam no balanço de incertezas. Isto aconteceu em cada banda de terço de oitava, e conseqüentemente, na incerteza do nível de potência sonora global, como se pode ver nas figuras 62 e 63.

Para visualizar as contribuições de incertezas destes ensaios com fonte Vibranihil foram plotadas as incertezas em decibel ao quadrado mostradas nas figuras 62 e 63. Nas barras do gráfico nota-se apenas a presença das incertezas relativas aos níveis de pressão sonora, legendadas por “u₂Lp(Lw)”, e incertezas relativas aos tempos de reverberação, legendadas por “u₂Trev(Lw)”. Os valores numéricos destas incertezas correspondem aos valores apresentados

na Tabela 5.5 elevados ao quadrado; equivalendo a u_{Lp}^2 e u_{Trev}^2 . As outras fontes de incertezas não aparecem nas barras porque os valores são muito pequenos em relação às incertezas predominantes.

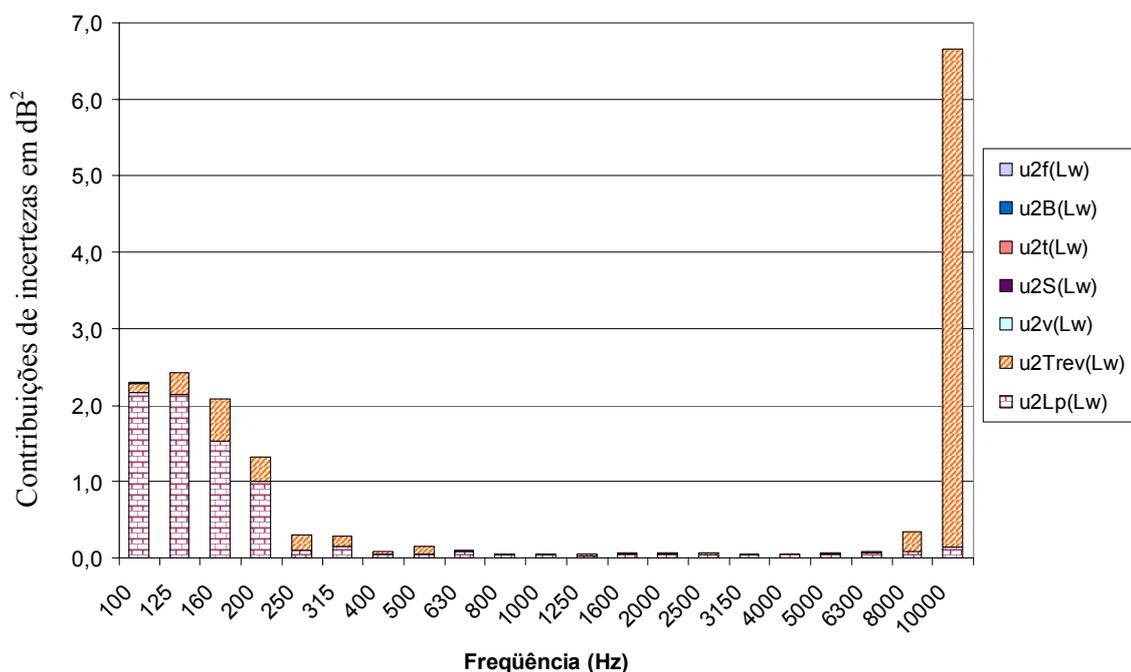


Figura 62 - Gráfico de barras representando as contribuições de cada fonte de incerteza nas bandas de terço de oitava. Valores de incertezas padrão ao quadrado. Fonte sonora Vibranihil na câmara reverberante de 193 m³ nominal do LVA-UFSC.

Como se pode ver na Tabela 5.4 e na Figura 62, os valores de incertezas relativas aos T_{rev} das bandas de 8 e 10 kHz são mais acentuados que os valores das bandas de frequências próximas (outras bandas de alta frequência). Na banda de 10 kHz o desvio padrão experimental foi extremamente elevado, resultando na incerteza padrão u_{Trev} de 2,55 dB, e este valor elevado ao quadrado resulta em quase 7 dB² que aparece no gráfico da Figura 62. Isto foi consequência de um problema na avaliação automática de algumas curvas de decaimento, ver Subseção 5.1.4.4.

Apesar do valor extremamente elevado da incerteza na banda de 10 kHz, que tende a deixar dúvidas sobre a validade do cálculo por ter característica não-lineares¹⁶⁸, ao se comparar as barras de contribuições de incertezas, em 10 kHz, nas figuras 62 e 63 nota-se que a contribuição de incerteza no cálculo da incerteza padrão combinada do nível de potência sonora

¹⁶⁸ A escala decibel é logarítmica, portanto, tem características não-lineares para grandes desvios. Para valores de incertezas relativamente pequenos, ± 1 dB ou inferior, por exemplo, a combinação das incertezas pode ser considerada linear.

global é insignificante. Este valor exagerado foi deixado propositalmente¹⁶⁹ para demonstrar como as bandas que têm pouca energia sonora não contribuem significativamente para a *incerteza padrão associada ao nível de potência sonora global*; $u_c(L_{WA})$, em dB(A).

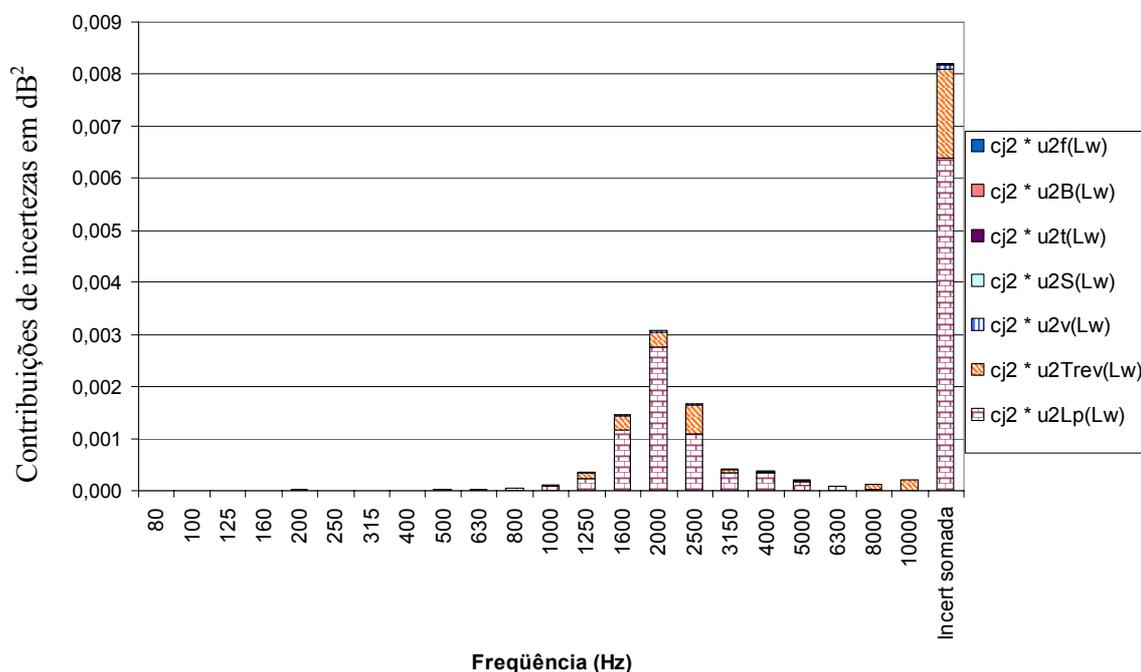


Figura 63 - Gráfico de barras representando as contribuições de incertezas, em dB^2 , com relação à incerteza do nível de potência sonora global L_{WA} , em dB(A). Fonte sonora Vibranihil; câmara reverberante de 193 m^3 nominal do LVA-UFSC.

O gráfico de barras da Figura 63 mostra que as maiores contribuições de incertezas que fazem parte do cálculo de $u_c(L_{WA})$ estão nas bandas de frequência e torno de banda de 2000 Hz. Principalmente as bandas de 1250 a 4000 Hz, onde as contribuições estipuladas em decibel ao quadrado (dB^2) são as predominantes dentre as outras bandas de frequências. Na Figura 63, a barra denominada “incert somada” representa a soma de todas as barras das incertezas contidas no espectro de 100 Hz a 10 kHz. Na barra “incert somada” é possível observar as contribuições provenientes de três fontes de incertezas: os níveis de pressão sonora L_p , os tempos de reverberação T_{rev} , e o volume da câmara reverberante V . Para as barras de 100 Hz a 10 kHz estas incertezas são representadas na legenda do gráfico por: $c_j \cdot u_{Lp,j}$, $c_j \cdot u_{Trev,j}$, e $c_j \cdot u_{V,j}$, respectivamente. E para a barra “incert somada” de fato pode-se observar a representação do seguinte somatório:

$$\sum_{j=1}^M (c_j \cdot u_{Lp,j})^2 + \sum_{j=1}^M (c_j \cdot u_{Trev,j})^2 + \sum_{j=1}^M (c_j \cdot u_{V,j})^2$$

¹⁶⁹ Em outras análises e cálculos de incertezas, os erros da avaliação de curvas de decaimentos que provocam os altos valores de desvios nas medições de tempos de reverberação em 8 e 10 kHz foram corrigidos ao se descartar algumas amostras de T_{rev} escolhidas por critério subjetivo do operador.

onde j representa a j -ésima banda de terço de oitava, e M é o número total de bandas. E o primeiro termo é o predominante no cálculo da incerteza global.

5.1.4.2 Investigação das fontes de incertezas predominantes, fonte sonora Vibranihil na câmara de 145 m³

Os ensaios e análises feitas na câmara reverberante de 145 m³ (nominal), com a fonte sonora Vibranihil, são praticamente idênticos aos feitos na câmara de 193 m³. Houve diferenças no número de posições de microfone(s), pois as medições dos níveis de pressão sonora L_p na câmara de 193 m³ contaram com doze posições de microfone, e na câmara de 145 m³ contaram com seis posições de microfone. De qualquer forma, pode-se comparar o desempenho metrológico de ambas as câmaras com base nas incertezas estimadas.

A seqüência das análises das incertezas, principalmente as tabelas, é reportada de forma similar à subseção anterior. Os comentários desta subseção geralmente visam comparar os resultados dos cálculos relativos à câmara de 145 m³ com os respectivos resultados referentes à câmara de 193 m³. Os valores de incertezas inerentes à cadeia de medição, u_{ccm} , são os mesmos que os apresentados na subseção anterior, ver Tabela 5.3 em 5.1.4.1.

Da mesma forma que na Tabela 5.3, da Subseção anterior (5.1.4.1), a linha corresponde a 2000 Hz na Tabela 5.7 foi enfatizada, por ser a banda com mais energia sonora. Analisando especificamente a banda de frequência 2000 Hz, nota-se que a partir da combinação do desvio padrão ($L_p = 0,09$ dB) e da incerteza da cadeia de medição ($u_{ccm} = 0,172$ dB), além do uso do coeficiente c_1 e divisor d_{Lp} , foi obtido o valor de incerteza padrão dos níveis de pressão sonora u_{Lp} estimado em 0,20 dB. Este valor é ligeiramente inferior ao obtido para a câmara de 193 m³; 0,24 dB. De fato, a diferença mais marcante foi entre os valores de desvios padrão experimentais de L_p : 0,17 dB para a câmara de 193 m³ e 0,09 dB para a câmara de 145 m³, sendo praticamente a metade; ver Tabelas 5.3 e 5.7.

Tabela 5.7 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , câmara de 145 m³ (nominal) do LVA-UFSC, fonte sonora Vibranihil, novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)	u_{ccm} (dB)	$X_{L_p, aleatório}$ (dB)	c_1	d_{L_p}	$u_{L_p}(L_w)$ [dB]
100	1,88	0,172	1,88	1,0	1,0	1,88
125	1,12	0,172	1,13	1,0	1,0	1,13
160	1,29	0,172	1,30	1,0	1,0	1,30
200	0,36	0,172	0,40	1,0	1,0	0,40
250	0,79	0,172	0,80	1,0	1,0	0,80
315	0,23	0,172	0,29	1,0	1,0	0,29
400	0,45	0,172	0,48	1,0	1,0	0,48
500	0,36	0,172	0,40	1,0	1,0	0,40
630	0,17	0,172	0,24	1,0	1,0	0,24
800	0,12	0,172	0,21	1,0	1,0	0,21
1000	0,24	0,172	0,30	1,0	1,0	0,30
1250	0,14	0,172	0,22	1,0	1,0	0,22
1600	0,15	0,172	0,23	1,0	1,0	0,23
2000	0,09	0,172	0,20	1,0	1,0	0,20
2500	0,10	0,172	0,20	1,0	1,0	0,20
3150	0,21	0,172	0,27	1,0	1,0	0,27
4000	0,20	0,172	0,27	1,0	1,0	0,27
5000	0,18	0,172	0,25	1,0	1,0	0,25
6300	0,13	0,215	0,25	1,0	1,0	0,25
8000	0,20	0,215	0,30	1,0	1,0	0,30
10000	0,22	0,215	0,30	1,0	1,0	0,30

As estimativas de incertezas dos tempos de reverberação¹⁷⁰ são dadas na Tabela 5.8, juntamente com os coeficientes de sensibilidade c_2 e divisor $d_{T_{rev}}$. Comparando-se os valores de tempos de reverberação entre as câmaras de 193 m³ e de 145 m³, nas bandas de 100 Hz a 10 kHz, nota-se que todos os T_{rev} da câmara de 145 m³ são menores que a de 193 m³. E, conseqüentemente, ocorreram valores relativamente maiores (em módulo) para os coeficientes c_2 relativos à câmara de 145 m³. A causa disto está na Equação 5.16, na Subseção 5.1.4.1, que tem T_{rev} e T_{rev}^2 como denominadores.

Ao analisar especificamente a linha relativa à banda de 2000 Hz da Tabela 5.8, onde se encontram a estimativa de incerteza $X_{T_{rev}}$ de 0,10 segundo, coeficiente de sensibilidade c_2 de -1,06 dB/s, e incerteza padrão $u_{T_{rev}}$ de 0,11 dB, pode-se notar que a estimativa $X_{T_{rev}}$ tem o mesmo valor que a encontrada para a câmara de 193 m³, ver Tabela 5.4, na Subseção 5.1.4.1. Porém a incerteza padrão $u_{T_{rev}}$ é ligeiramente superior¹⁷¹, devido ao coeficiente de sensibilidade c_2 . Esta contribuição de incerteza (0,1 dB aproximadamente) pode ser considerada mediana,

¹⁷⁰ Na Tabela 5.8, o parâmetro denominado $X_{T_{rev}}$ corresponde às estimativas de incertezas dos tempos de reverberação e, de fato, são os valores de desvios padrão experimentais dos tempos de reverberação medidos na câmara reverberante de 145 m³.

¹⁷¹ Para a banda de 2000 Hz, cálculos de incertezas padrão dos tempos de reverberação $u_{T_{rev}}$ resultaram em: 0,08 dB para câmara de 193 m³; e 0,11 dB para câmara de 145 m³.

diante das outras incertezas padrão na faixa de 100 Hz a 10 kHz, as quais têm valores entre 0,05 e 0,39 dB.

Tabela 5.8 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 145 m³ do LVA-UFSC em novembro de 2005. O parâmetro $x_{T_{rev}}$ foi estimado a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor $d_{T_{rev}}$ e incertezas padrão combinada $u_{T_{rev}}(L_W)$.

Frequência central (Hz)	T_{rev} (s) *	$X_{T_{rev}}$ (s)	c_2 (dB/s)	$d_{T_{rev}}$	$u_{T_{rev}}(L_W)$ [dB]
100	10,16	0,17	-0,43	1,0	0,07
125	7,64	0,68	-0,58	1,0	0,39
160	7,19	0,63	-0,61	1,0	0,39
200	8,05	0,63	-0,55	1,0	0,35
250	5,24	0,39	-0,85	1,0	0,33
315	4,65	0,09	-0,96	1,0	0,09
400	3,53	0,27	-1,27	1,0	0,35
500	3,73	0,29	-1,20	1,0	0,34
630	4,48	0,18	-0,99	1,0	0,18
800	4,85	0,34	-0,92	1,0	0,31
1000	5,29	0,25	-0,84	1,0	0,21
1250	5,40	0,05	-0,82	1,0	0,04
1600	4,57	0,19	-0,98	1,0	0,19
2000	4,23	0,10	-1,06	1,0	0,11
2500	3,87	0,11	-1,16	1,0	0,13
3150	3,46	0,14	-1,30	1,0	0,18
4000	2,93	0,03	-1,55	1,0	0,05
5000	2,34	0,08	-1,95	1,0	0,16
6300	1,89	0,05	-2,45	1,0	0,12
8000	1,48	0,04	-3,17	1,0	0,14
10000	1,03	0,05	-4,71	1,0	0,25

* T_{rev} são os tempos de reverberação T_{20} .

Ao se compararem alguns valores das Tabelas 5.8 e 5.4, na Subseção 5.1.4.1, das bandas de 8 e 10 kHz, nota-se que o erro de avaliação das curvas de decaimento foi contornado, pois os desvios padrão de T_{rev} representados por $X_{T_{rev}}$ são significativamente menores nesta última tabela; principalmente na banda de 10 kHz. Na análise da subseção anterior foi concluído que a incerteza extremamente exagerada provocada pelo erro na avaliação da curva de decaimento em 10 kHz **não** influenciou significativamente o resultado final da incerteza calculada. E na análise deste ensaio, relativo à câmara de 145 m³, espera-se que a banda de 10 kHz **não** influencie significativamente o resultado de incerteza do nível de potência sonora global, em dB(A).

Os resultados dos cálculos de incertezas padrão combinadas, das sete fontes de incertezas que foram consideradas, são apresentados na Tabela 5.9. São relativos aos ensaios na câmara de 145 m³ (nominal) do LVA-UFSC. Da mesma forma que nos ensaios na câmara de 193 m³, cujas combinações de incertezas são apresentadas na Tabela 5.5, é possível notar que as

incertezas u_{Lp} e u_{Trev} predominam dentre as outras fontes de incertezas, ver segunda e terceira colunas da Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Câmara de 145 m³, fonte sonora Vibranihil, novembro de 2005.

Frequência central (Hz)	$u_{Lp}(L_w)$ [dB]	$u_{Trev}(L_w)$ [dB]	$u_v(L_w)$ [dB]	$u_s(L_w)$ [dB]	$u_i(L_w)$ [dB]	$u_B(L_w)$ [dB]	$u_f(L_w)$ [dB]	$u_c(L_w)$ [dB]	$U(L_w)$ [dB]
100	1,88	0,07	0,021	0,007	0,016	0,019	0,090	1,89	3,78
125	1,13	0,39	0,023	0,006	0,015	0,019	0,078	1,20	2,40
160	1,30	0,39	0,024	0,005	0,015	0,019	0,071	1,36	2,71
200	0,40	0,35	0,026	0,004	0,014	0,019	0,055	0,53	1,07
250	0,80	0,33	0,027	0,003	0,014	0,019	0,046	0,87	1,74
315	0,29	0,09	0,028	0,002	0,014	0,019	0,039	0,31	0,62
400	0,48	0,35	0,029	0,002	0,013	0,019	0,033	0,60	1,20
500	0,40	0,34	0,030	0,001	0,013	0,019	0,025	0,53	1,06
630	0,24	0,18	0,030	0,001	0,013	0,019	0,021	0,31	0,61
800	0,21	0,31	0,031	0,001	0,013	0,019	0,017	0,38	0,76
1000	0,30	0,21	0,031	0,001	0,013	0,019	0,013	0,36	0,73
1250	0,22	0,04	0,031	0,000	0,013	0,019	0,011	0,23	0,46
1600	0,23	0,19	0,032	0,000	0,013	0,019	0,009	0,30	0,59
2000	0,20	0,11	0,032	0,000	0,013	0,019	0,007	0,23	0,45
2500	0,20	0,13	0,032	0,000	0,013	0,019	0,006	0,24	0,48
3150	0,27	0,18	0,033	0,000	0,012	0,019	0,005	0,33	0,66
4000	0,27	0,05	0,033	0,001	0,012	0,019	0,004	0,27	0,54
5000	0,25	0,16	0,033	0,001	0,012	0,019	0,003	0,30	0,60
6300	0,25	0,12	0,034	0,001	0,012	0,019	0,002	0,28	0,56
8000	0,30	0,14	0,034	0,001	0,012	0,019	0,002	0,33	0,66
10000	0,30	0,25	0,036	0,002	0,012	0,019	0,001	0,39	0,79

Os valores referentes à banda de 2000 Hz apresentaram incertezas da mesma ordem de grandeza, valores similares, para ambas as câmaras reverberantes, com fonte sonora Vibranihil sob teste. Por exemplo, valores de incerteza padrão combinada u_c de 0,26 e 0,23 dB, ver Tabelas 5.5 e 5.9. Valores de u_c ligeiramente superiores a 0,23 dB são encontrados nas bandas adjacentes a banda de 2000 Hz, as quais influenciam o resultado do cálculo de incerteza do nível de potência sonora global porque estas bandas têm grande parte da energia sonora total do espectro no caso da fonte Vibranihil.

Foram combinados os valores de incertezas das bandas de terço de oitava com ponderações dadas pelos coeficientes de sensibilidade c_j , ver Tabela 5.10. Ao se analisarem os valores numéricos contidos as linhas correspondentes à banda de 2000 Hz, nota-se que o coeficiente c_j calculado para a câmara de 193 m³ ($c_j = 0,216$, ver Tabela 5.6) é da mesma ordem de grandeza ($c_j = 0,222$, ver Tabela 5.10) calculado para o ensaio realizado na câmara de 145 m³, com fonte sonora Vibranihil. Isto é uma indicação de que os desempenhos metrológicos das câmaras reverberantes do LVA-UFSC são similares, pelo menos sob determinadas condições de medição, principalmente as associadas ao espectro da fonte sonora.

Tabela 5.10 - Valores do cálculo de incerteza do valor global de nível de potência sonora em dB(A).
Câmara reverberante de 145 m³ nominal do LVA-UFSC, fonte sonora **Vibranihil**, novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Correção curva "A" (dB)	L _{wj} dB	c _j	u _c (L _{wj}) (dB)	c _j u _c (dB)	(c _j u _c) ² (dB) ²	1 / c _j
100	-19,1	64,38	0,000	1,89	0,000	0,0000	5661,8
125	-16,1	67,02	0,001	1,20	0,001	0,0000	1545,9
160	-13,4	67,68	0,001	1,36	0,002	0,0000	712,7
200	-10,9	66,61	0,002	0,53	0,001	0,0000	512,5
250	-8,6	66,51	0,003	0,87	0,003	0,0000	309,1
315	-6,6	64,50	0,003	0,31	0,001	0,0000	309,6
400	-4,8	65,39	0,006	0,60	0,004	0,0000	166,7
500	-3,2	66,25	0,011	0,53	0,006	0,0000	94,5
630	-1,9	67,00	0,017	0,31	0,005	0,0000	58,9
800	-0,8	67,79	0,026	0,38	0,010	0,0001	38,1
1000	0	68,75	0,039	0,36	0,014	0,0002	25,4
1250	0,6	70,69	0,070	0,23	0,016	0,0003	14,2
1600	1	73,63	0,152	0,30	0,045	0,0020	6,6
2000	1,2	75,08	0,222	0,23	0,050	0,0025	4,5
2500	1,3	73,38	0,154	0,24	0,037	0,0014	6,5
3150	1,2	71,06	0,088	0,33	0,029	0,0008	11,3
4000	1	70,77	0,079	0,27	0,021	0,0005	12,7
5000	0,5	70,11	0,060	0,30	0,018	0,0003	16,6
6300	-0,1	68,37	0,035	0,28	0,010	0,0001	28,4
8000	-1,1	66,99	0,020	0,33	0,007	0,0000	49,2
10000	-2,5	64,89	0,009	0,39	0,004	0,0000	110,2
					u _c (L _{WA}) dB	U(L _{WA}) dB	
Global					0,092	0,19	k = 2,0

Obs.: Incerteza U(L_{WA}) arredondada para cima, com duas casas decimais.

A parcela de contribuição predominante se encontra na banda de 2000 Hz e é dada por $c_j u_c = 0,0025 \text{ dB}^2$, ver Tabela 5.10. Também se pode notar que as bandas próximas a 2000 Hz têm indicador $1 / c_j$ com os valores mais baixos, sendo estas bandas as que predominam no resultado final de incerteza.

A incerteza expandida calculada para o nível de potência sonora global, em dB(A), resultou em: $U(L_{WA}) = 0,19 \text{ dB}$. Coincidentemente é mesmo valor encontrado para a incerteza do ensaio na câmara de 193 m³, exceto pelo arredondamento em duas casa decimais, que foi feito para cima. O arredondamento deve ser para cima para estimar a incerteza de forma a garantir um nível de confiança adequado, não inferior ao especificado. De qualquer maneira, os valores de $u_c(L_{WA})$ são praticamente iguais: 0,091 dB e 0,092 dB, relativos às câmaras de 200 e 145 m³, respectivamente. Foi usado o fator de abrangência $k = 2,0$.

A estimativa de incerteza deve computar a deriva do calibrador de nível sonoro, estimada em 0,1 dB, o que resulta em:

$$U_{(L_{WA})\text{Total}} = U(L_{WA}) + \text{Deriva}_{\text{cal}} = 0,19 + 0,10 = 0,29 \text{ dB(A)}$$

E o resultado da determinação de nível de potência sonora global, em dB(A), da fonte sonora Vibranihil na câmara de 145 m³ é estimado em: $L_{WA} = 82,81 \pm 0,29$ dB(A), para a faixa de frequências de 100 Hz a 10 kHz e intervalo de confiança de aproximadamente 95 %. A apresentação com uma casa decimal (um algarismo significativo no valor da incerteza) resulta em: $L_{WA} = 82,8 \pm 0,3$ dB.

Na Figura 64 pode-se visualizar as contribuições das fontes de incertezas relativas a cada banda de terço de oitava individualmente, e na Figura 65 as barras representam a contribuição de cada banda de frequência para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Com relação às incertezas inerentes a cada banda, individualmente, nota-se que são valores elevados em baixas frequências, ver Figura 64, e que as fontes de incertezas visíveis nas barras do gráfico são apenas $u^2_{L_p}(L_W)$ e $u^2_{T_{rev}}(L_W)$ referentes aos níveis de pressão sonora e aos tempos de reverberação, respectivamente.

As outras fontes de incertezas, tais como: medição da área de superfície interna da câmara reverberante S , temperatura ambiente¹⁷², pressão atmosférica (ou barométrica) B , e frequências centrais das bandas de terço de oitavas, não aparecem nos gráfico porque seus valores são relativamente insignificantes, diante das influências de L_p e de T_{rev} . No gráfico da Figura 65 há uma pequena porção da barra “incert somada” onde se pode ver a contribuição da incerteza relativa à medição do volume da câmara reverberante, que matematicamente é dado pelo somatório dos termos $c_j \cdot u^2_v(L_W)$ de cada banda, ver Tabelas 5.9 e 5.10 para comparações.

¹⁷² Temperatura ambiente representada por t ou por θ .

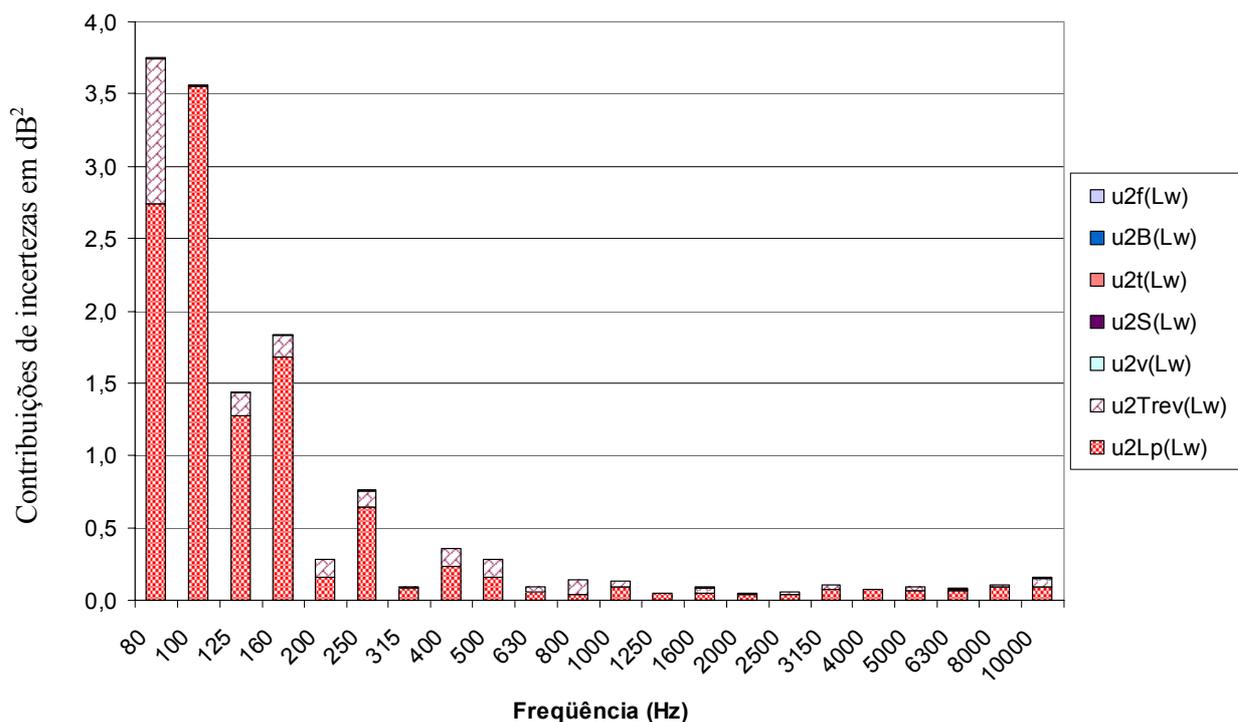


Figura 64 - Gráfico de barras representando as contribuições de cada fonte de incerteza nas bandas de terço de oitava. Valores de incertezas padrão ao quadrado. Fonte sonora Vibranihil na câmara reverberante de 145 m³ nominal do LVA-UFSC.

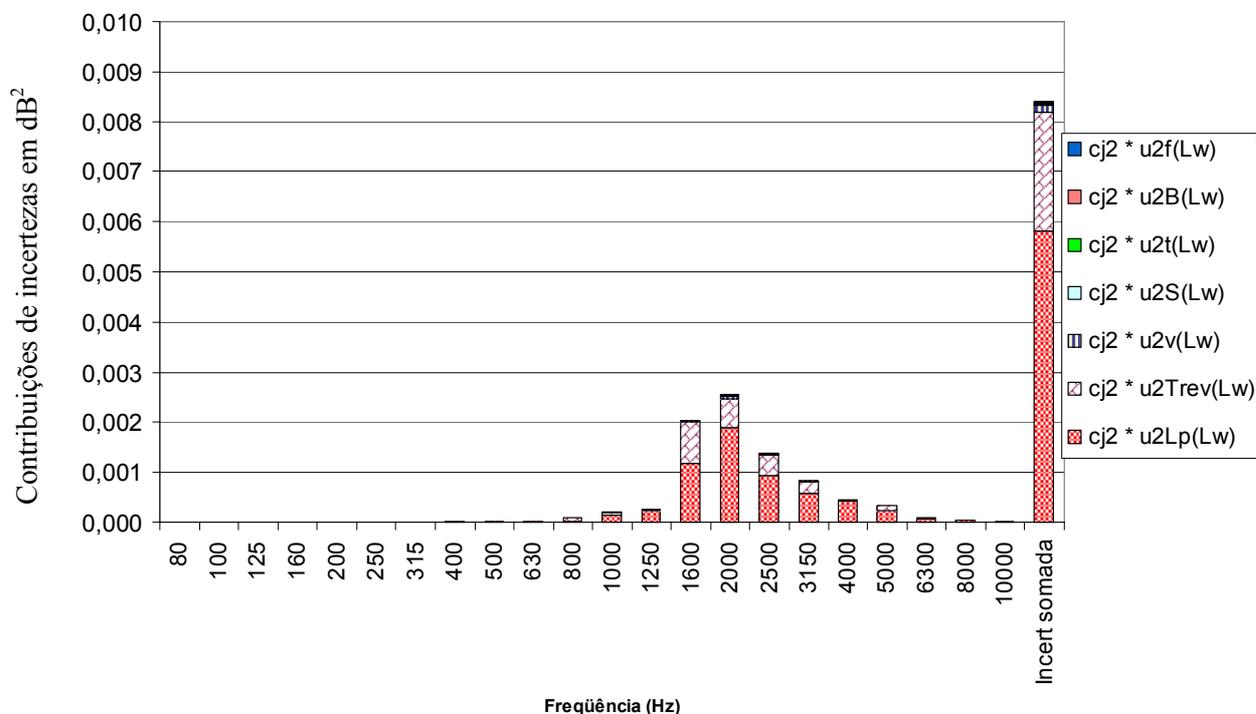


Figura 65 - Gráfico de barras representando as contribuições de incertezas, em dB², com relação à incerteza do nível de potência sonora global L_{WA}, em dB(A). Fonte sonora Vibranihil; câmara reverberante de 145 m³ nominal do LVA-UFSC.

Foram feitas análises das fontes de incertezas e suas contribuições através de gráficos de barras. Os quais auxiliam o entendimento da forte dependência da incerteza de medição e o espectro da fonte sonora sob teste; neste caso a fonte Vibranihil.

Nas figuras 62, da Subseção 5.1.4.1, e 64 os parâmetros denominados: $u^2_{L_p}(L_W)$ e $u^2_{T_{rev}}(L_W)$, que são as incertezas padrão das medições de níveis de pressão sonora ao quadrado e as incertezas padrão das medições dos tempos de reverberação ao quadrado¹⁷³, respectivamente, demonstraram que as medições de L_p e T_{rev} são importantes na questão da avaliação das incertezas predominantes.

Nas figuras 63, da Subseção 5.1.4.1, e 65 os parâmetros denominados $c_j^2 * u^2_{L_p}(L_W)$ e $c_j^2 * u^2_{T_{rev}}(L_W)$, que são incertezas padrão ponderadas pelos coeficientes de sensibilidade c_j , demonstram como é forte a influência do espectro da fonte sonora sobre o valor das contribuições de cada banda de frequência para a incerteza global. Além de comprovarem a predominância de L_p e de T_{rev} como sendo as principais fontes de incertezas. Na verdade, nota-se que nas bandas com mais energia sonora, de 1250 Hz a 5 kHz, onde os L_W ultrapassaram 70 dB(A), as contribuições de incertezas ali computadas praticamente determinam o valor da incerteza combinada global.

5.1.4.3 Investigações de problemas ocorridos na obtenção dos tempos de reverberação a partir das curvas de decaimento

Especificamente na banda de 10 kHz, especialmente para o ensaio na câmara reverberante de 193 m³ nominal, houve erros de avaliação¹⁷⁴ das curvas de decaimento do método da interrupção do ruído. Método que foi usado para quantificar os tempos de reverberação T_{20} . As conseqüências foram: a diminuição do valor calculado para $L_W(10 \text{ kHz})$, e valor de incerteza significativamente mais elevado, em relação às bandas de frequências próximas a 10 kHz. A grande dispersão dos valores de $T_{20}(10 \text{ kHz})$ é conseqüência da existência de avaliações corretas e incorretas das curvas de decaimento na banda de 10 kHz. Um exemplo da causa desta variação exagerada, que foi deixada propositadamente em alguns dos cálculos posteriores¹⁷⁵, pode ser vista na Figura 67. E as conseqüências ocorridas no valor de $L_W(10 \text{ kHz})$ e na incerteza em 10 kHz podem ser vistas nas figuras 68, 62 e 63. Pode-se notar, nestas figuras,

¹⁷³ Valores de incertezas padrão em decibéis ao quadrado; dB².

¹⁷⁴ Avaliação automática das curvas de decaimento, usando o software Pulse Labshop® versão 10 de Brüel & Kjær.

¹⁷⁵ Com objetivo de verificar se haveria influência significativa no valor final da incerteza calculada para o nível de potência sonora global em dB(A), L_{WA} . Durante os cálculos do balanço de incertezas, pode-se perceber que as bandas com menos energia sonora, tal como a de 10 kHz, dão contribuições pouco significativas para a incerteza de medição do valor global de L_{WA} ; ver figuras 62 e 63.

que uma das causas da avaliação incorreta do tempo de reverberação foi o baixo nível de pressão sonora na banda de 10 kHz, ou seja, a excitação da câmara reverberante através da fonte sonora eletroacústica não foi suficiente para manter um nível de pressão sonora maior que 20 dB acima do ruído de fundo. Isto é fundamental no método de interrupção do ruído para obter os valores dos tempos de reverberação.

Uma curva de decaimento avaliada corretamente pelo software é mostrada na Figura 66. Na qual se pode observar que a reta calculada pelo software está tangenciando perfeitamente a curva de decaimento. Também o valor da correlação (*correlation*) igual a 1 indica excelente grau de concordância entre a reta calculada e a curva de decaimento medida experimentalmente. O mesmo não ocorreu na avaliação automática de decaimento mostrado na Figura 67. Na qual, a reta calculada pelo software **não** tangencia a curva de modo correto, e a correlação apresentada é muito baixa (*correlation* = 0,53).

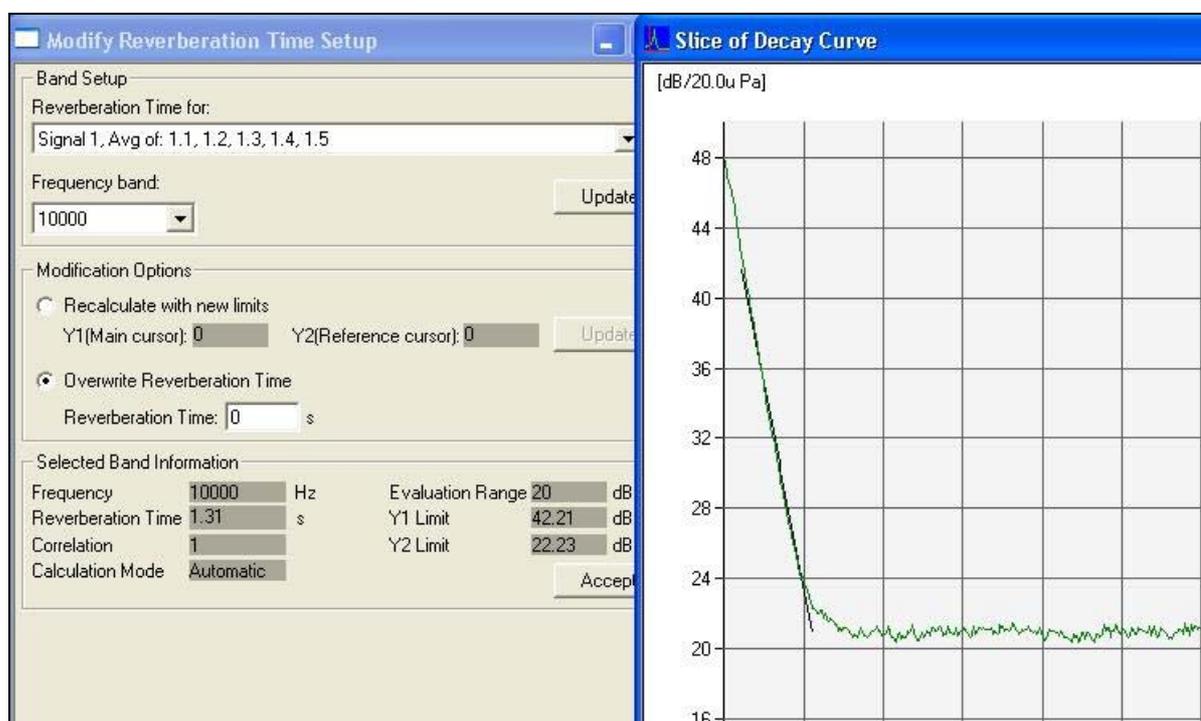


Figura 66 - Exemplo de curva de decaimento obtida experimentalmente através médias de cinco medições repetitivas, usando o método de interrupção de ruído. Avaliação do decaimento **correta**. Banda de terço de oitava de 10 kHz. Câmara reverberante LVA-UFSC, software Pulse Labshop de Brüel & Kjær.

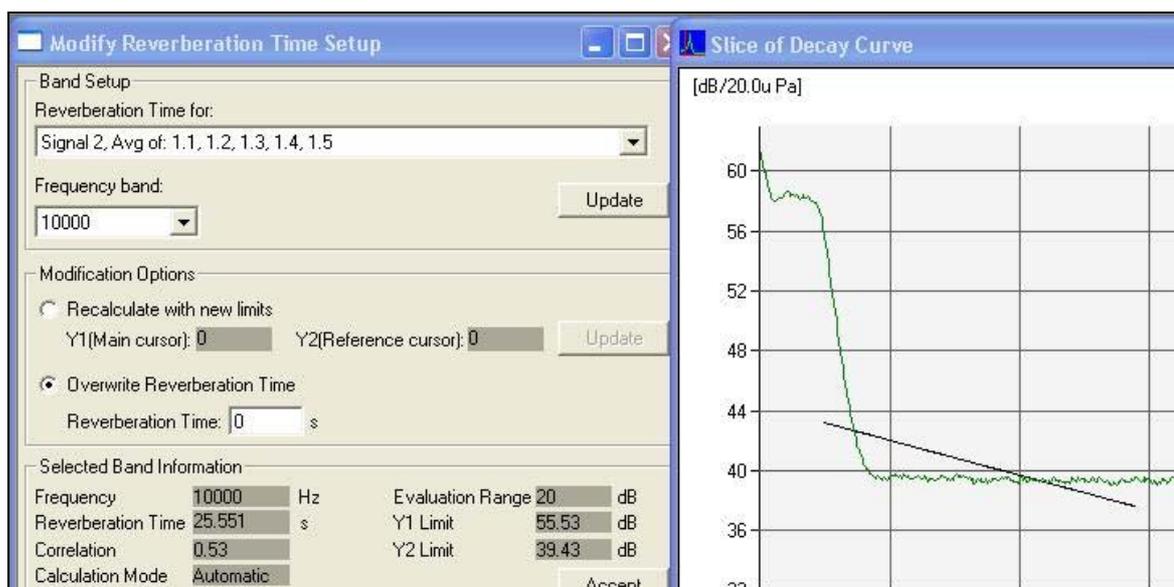


Figura 67 - Exemplo de curva de decaimento obtida experimentalmente através médias de cinco medições repetitivas, usando o método de interrupção de ruído. Avaliação do decaimento **incorreta**. Banda de terço de oitava de 10 kHz. Câmara reverberante LVA-UFSC, software Pulse Labshop de Brüel & Kjær.

5.1.5 Análise comparativa geral dos resultados, fonte sonora Vibranihil

Apesar de não haver um valor de referência de nível de potência sonora da fonte Vibranihil, e também considerando que este protótipo **não** é uma fonte sonora de referência, foi analisado o desempenho metrológico dos ensaios da fonte Vibranihil sob teste nas câmaras acústicas do LVA-UFSC. Da forma como foram desenvolvidos os ensaios, não é possível fazer separação completa entre as variações causadas pela fonte Vibranihil¹⁷⁶ das fontes de incertezas inerentes à cadeia de medição e variações inerentes aos processos das medições nas câmaras acústicas. Portanto, na avaliação comparativa dos resultados não é possível separar completamente os efeitos sistemáticos dos efeitos aleatórios, e nem quantificar exatamente os parâmetros causadores das variações encontradas.

Através do gráfico de barras da Figura 68 pode-se ter idéia do grau de concordância dos resultados das determinações de potência sonora da fonte Vibranihil nas câmaras reverberantes de 193 e 145 m³ do LVA. As incertezas expandidas U são apresentadas na forma de barras de erros e são referentes a cada banda de terço de oitava. No gráfico da Figura 68 pode-se notar barras de erros maiores (incertezas maiores) em baixas frequências, e na

¹⁷⁶ Devido condições ambientais e tensão de alimentação proveniente da rede elétrica.

banda de 10 kHz do ensaio na câmara reverberante de 193 m³. As barras de erros referentes aos valores globais em dB e dB(A) mostram-se menores que quaisquer outras referentes às bandas de terço de oitavas.

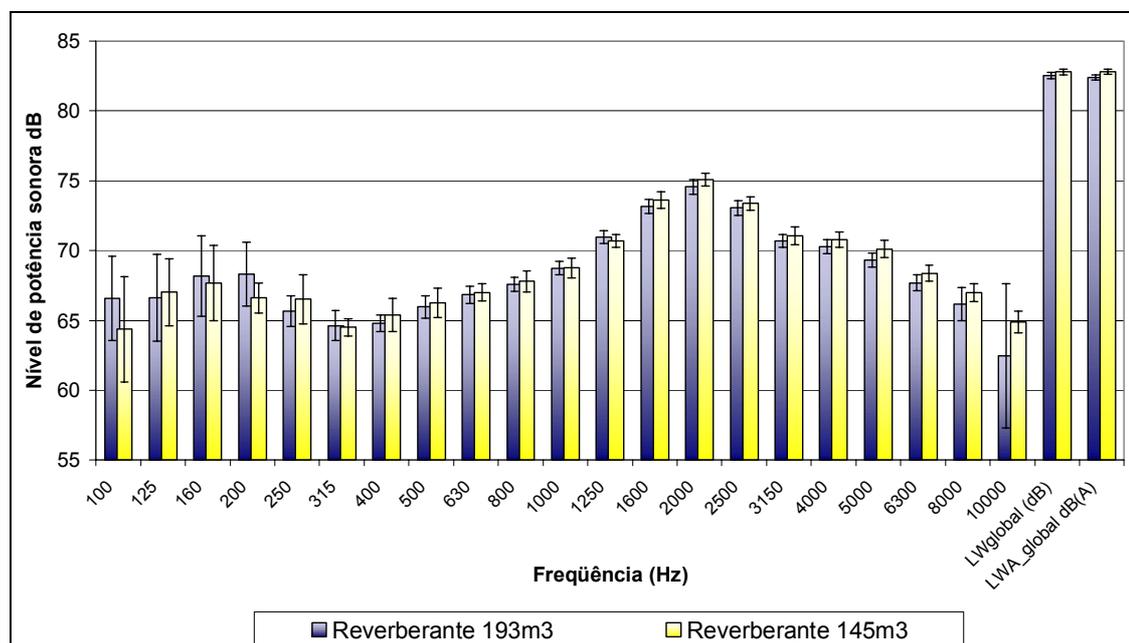


Figura 68 - Gráfico de barras dos níveis de potência sonora, em dB, da fonte Vibranihil determinados nas câmaras reverberantes de 145 e 193 m³ do LVA-UFSC. Barras de erros representam $U = U_{95\%} = k \cdot u_c$, incertezas expandidas de cada banda de frequência; $k = 2,0$ e intervalo de confiança de aproximadamente 95 %. Incertezas calculadas a partir de medições de L_p e T_{20} , em condições de repetitividade, e outras fontes de incertezas.

Com objetivo de comparar os L_w globais resultantes dos ensaios em câmaras reverberantes, foi elaborado um gráfico mostrado na Figura 69. Foram realizados dois ensaios na câmara 3 (semi-aneecóica do LVA) cujos resultados em dB e dB(A) são apresentados sem barras de erros, ou seja, sem as estimativas de incertezas, ver Figura 69. Quanto aos resultados de ensaios nas câmaras 1 e 2 (reverberantes 145 e 193 m³), nota-se que é necessário levar em consideração a deriva do calibrador sonoro, principalmente ao se analisar os resultados em dB(A).

Na Figura 69 percebe-se a importância da avaliação de incerteza ao tentar comparar os resultados obtidos na câmara 3 (semi-aneecóica), pois os valores sem incertezas associadas não são úteis neste tipo de comparação.

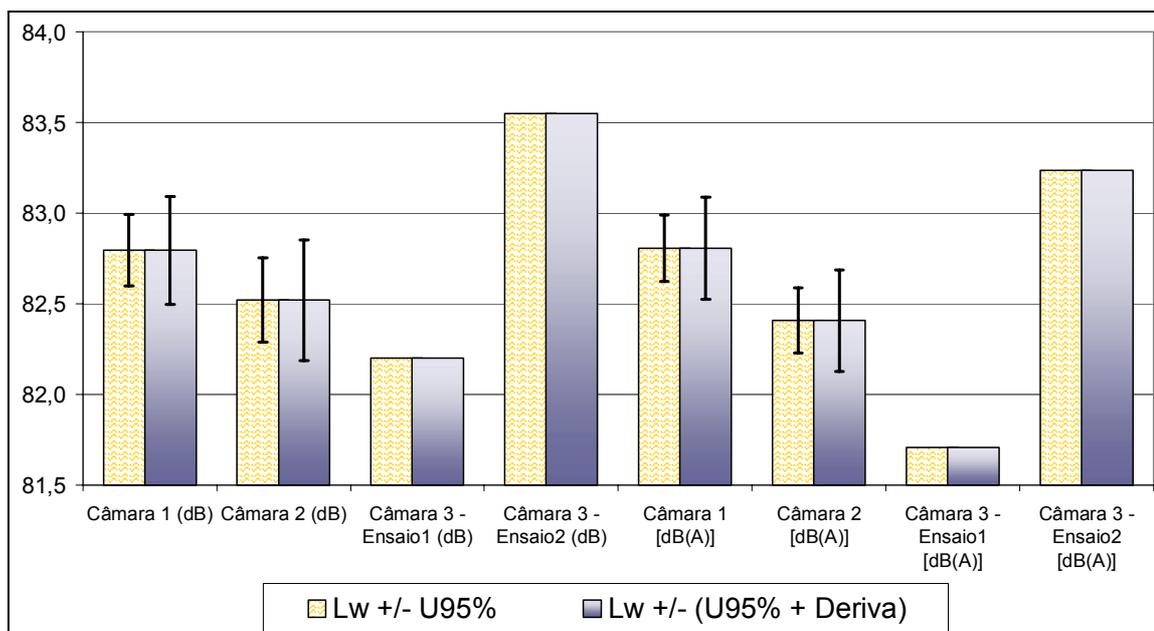


Figura 69 – Níveis de potência sonora globais em dB e em dB(A) obtidos com fonte sonora Vibranihil nas câmaras 1, 2 e 3, câmaras reverberantes de 145 m³, 193 m³, e câmara semi-anecóica (LVA-UFSC), respectivamente. Barras de erros representam incertezas calculadas.

Para analisar os resultados por bandas de terço de oitavas foi aplicado um teste de conformidade simplificado, de forma que a soma das incertezas expandidas U associadas a cada par de valores de nível de potência sonora é comparada com a diferença entre os respectivos valores de nível de potência sonora L_{WA} . Se o valor absoluto da diferença entre os níveis de potência sonora for maior que a soma das incertezas então houve não-conformidade; ver Tabela 5.11. A análise de conformidade dada pela Tabela 5.11 é uma comparação metrológica entre os valores obtidos nas medições feitas nas duas câmaras reverberantes; 193 m³ e 145 m³ nominais. Os valores desta análise de conformidade foram calculados com base na Tabela 5.2, da Subseção 5.1.3.

Na antepenúltima e penúltima linha da Tabela 5.11 são mostrados resultados conclusivos sobre a comparação dos resultados nas câmaras reverberantes do LVA. Sendo que somente quando é computada a deriva do calibrador de nível sonoro¹⁷⁷ na incerteza expandida de L_{WA} global ocorre conformidade em os resultados obtidos nas câmaras reverberantes.

Também se conclui que a não-conformidade relativa aos resultados encontrados nas câmaras reverberantes com a fonte Vibranihil sob teste, é um indício que o cálculo da incerteza padrão combinada produziu uma estimativa de incerteza inferior diante dos valores de dispersões obtidos experimentalmente. Especialmente porque os cálculos de incerteza foram desenvolvidos sem considerar correlações entre as bandas de terço de oitavas.

¹⁷⁷ Calibrador de nível sonoro marca GRAS modelo 42AB.

Tabela 5.11 - Análise da conformidade dos resultados das medições com fonte sonora **Vibranihil**. Incertezas expandidas, $U_{95\%}$, de ambas as câmaras reverberantes (193 e 145 m³) foram somadas para avaliar a conformidade dos valores obtidos, em cada banda de terço de oitava e dos valores globais em dB(A).

Frequência central da banda (Hz)	Soma das incertezas expandidas $U_{95\%}$ (dB)	Diferença entre valores de L_{WA} nas duas câmaras reverberantes (dB)	Análise dos resultados
100	6,80	-2,20	Conformidade
125	5,52	0,39	Conformidade
160	5,60	-0,48	Conformidade
200	3,36	-1,70	Conformidade
250	2,84	0,85	Conformidade
315	1,68	-0,12	Conformidade
400	1,79	0,58	Conformidade
500	1,87	0,28	Conformidade
630	1,22	0,18	Conformidade
800	1,26	0,21	Conformidade
1000	1,21	0,01	Conformidade
1250	0,91	-0,26	Conformidade
1600	1,10	0,47	Conformidade
2000	0,97	0,52	Conformidade
2500	1,00	0,33	Conformidade
3150	1,11	0,36	Conformidade
4000	1,04	0,49	Conformidade
5000	1,12	0,79	Conformidade
6300	1,14	0,69	Conformidade
8000	1,84	0,81	Conformidade
10000	5,95	2,42	Conformidade
Global dB(A)	0,37	0,40	Não-conformidade
Considerando deriva do calibrador *	0,57	0,40	Conformidade
* Deriva do calibrador de nível sonoro estimada em 0,10 dB			

Considerando-se a grande dispersão entre os resultados destes quatro ensaios, e tomando o valor da média energética e de desvio padrão dos L_{WA} globais dados na Tabela 5.2, na Subseção 5.1.3, pode-se calcular uma estimativa grosseira¹⁷⁸ da incerteza associada às medições. O valor médio de L_{WA} global foi 82,58 dB e o desvio padrão de 0,65 dB referente aos quatro ensaios. E arbitrando-se um fator de abrangência $k = 2,0$ obtém-se uma estimativa de incerteza de 1,30 dB(A). Produzindo a estimativa final de $L_{WA_global} = 82,6 \pm 1,3$ dB(A) para quantificar o nível de potência sonora da fonte Vibranihil.

As incertezas calculadas para L_W da fonte sonora Vibranihil, em dB, sem ponderação da curva “A”, foram usadas para plotar as barras de erros no gráfico da **Figura 69** nas barras das classes “Câmara 1 (dB)” e “Câmara 2 (dB)”. Os valores destas incertezas são: 0,20 dB, 0,30 dB, 0,24 dB e 0,34 dB, respectivamente.

¹⁷⁸ Mesmo sendo poucas amostras, $n = 4$, e sem aplicar o coeficiente *t de student*.

5.2 Ensaio com secador de cabelo

Um dos eletrodomésticos ensaiados foi um modelo de secador de cabelo usado, marca Philips, de 600 watts de potência, 220 volts. Foram medidos os níveis de pressão sonora gerados pelo secador dentro da câmara reverberante de 193 m³ e a de 145 m³ do LVA-UFSC. E os tempos de reverberação destas câmaras, usados na determinação de nível de potência sonora do secador de cabelo, foram praticamente os mesmos usados para os cálculos referentes à fonte Vibranihil¹⁷⁹, exceto nas frequências de 8 e 10 kHz. Foram usados os mesmos métodos de medição, mesmos procedimentos de cálculos, e a mesma cadeia de medição que nos ensaios com a fonte Vibranihil. Porém, o secador de cabelo não foi ensaiado em câmara semi-aneóica. Os equipamentos e métodos usados foram os mesmos citados na Subseção 5.1.1, para medições com a fonte Vibranihil. Entretanto, não foram feitas medições na câmara reverberante de 83 m³ e não foi usado o microfone de medição de uma polegada, marca Larson Davis, modelo 2575.

Um dos principais objetivos dos ensaios com secador de cabelo foi a investigação das mudanças que poderiam ser observadas no campo sonoro dentro das câmaras reverberantes, além dos cálculos de nível de potência sonora e obtenção das estimativas de incertezas. De forma a procurar meios para avaliar as mudanças que poderiam ocorrer nos parâmetros medidos, tais como variações nos valores de desvios padrão experimentais dos níveis de potência sonora. Tais variações são esperadas devido às mudanças na excitação e na resposta do campo sonoro dentro de cada câmara reverberante. Além de investigar as características do espectro em bandas de frequência de uma fonte sonora diferente¹⁸⁰ das fontes aerodinâmicas BK 4204 e Vibranihil. Por isto, foram ensaiados os eletrodomésticos secador de cabelo e liquidificador.

5.2.1 Resultados experimentais obtidos com secador de cabelo

A seguir são relatados os níveis de potência sonora e as estimativas de incertezas dos ensaios com secador de cabelo nas duas câmaras reverberantes do LVA. E nas subseções seguintes há mais detalhes de como foram estimadas estas incertezas, e valores intermediários dos cálculos.

¹⁷⁹ Ver Tabela 5.4, na Subseção 5.1.4.1, e Tabela 5.14.

¹⁸⁰ Com princípio de funcionamento diferente das fontes sonoras BK 4204 e Vibranihil, apesar de haver ruído aerodinâmico produzido pelo secador de cabelo. De fato, existe grande diferença na direcionalidade sonora entre o secador de cabelo e fontes de referência como a fonte BK 4204, e isto pode ser notado, subjetivamente, ao se ouvir os ruídos em torno destes aparelhos.

Os níveis de potência sonora deste modelo de secador de cabelo atingiram aproximadamente 72,3 dB(A), nos dois ensaios. Como se pode ver na Tabela 5.12, os valores de L_{WA} globais têm alto grau de concordância, sendo que a diferença entre os dois resultados é de apenas 0,14 dB(A); em valor absoluto. É uma diferença relativamente pequena ao se comparar com a diferença entre os L_{WA} globais da fonte sonora Vibranihil que foi de 0,40 dB(A); entre resultados obtidos nas câmaras reverberantes, ver Tabela 5.2 na Subseção 5.1.3.

Tabela 5.12 - Valores dos níveis de potência sonora, L_{WA} , do secador de cabelo medidos em duas câmaras reverberantes do LVA-UFSC. Também valores de incertezas expandidas $U_{95\%}$ calculadas; temperatura e pressão atmosférica durante ensaios.

Frequência (Hz)	Reverberante 193 m ³		Reverberante 145m ³		Média energética L_{WA} dB(A)	Diferença entre as 2 medições dB
	$(L_{WA} \pm U_{95\%})$ dB(A)		$(L_{WA} \pm U_{95\%})$ dB(A)			
100	12,41	3,75	5,91	1,56	10,28	-6,50
125	20,81	4,42	16,85	3,16	19,26	-3,96
160	22,37	2,12	20,65	1,73	21,60	-1,72
200	27,21	3,15	24,72	1,15	26,14	-2,49
250	34,83	6,08	31,74	1,81	33,55	-3,08
315	33,21	1,39	32,49	2,14	32,87	-0,72
400	37,07	1,02	36,30	0,88	36,70	-0,77
500	41,66	1,08	40,77	0,96	41,23	-0,89
630	48,85	1,43	48,92	1,21	48,88	0,07
800	57,78	2,07	56,49	1,21	57,18	-1,30
1000	62,33	0,71	62,00	0,69	62,17	-0,33
1250	58,27	0,69	57,89	0,66	58,09	-0,38
1600	57,89	1,67	58,06	2,72	57,97	0,17
2000	66,00	2,32	66,29	3,39	66,15	0,29
2500	59,45	0,59	59,05	0,52	59,25	-0,40
3150	62,58	0,64	62,43	0,75	62,51	-0,14
4000	63,08	0,78	62,92	1,20	63,00	-0,16
5000	61,83	0,81	62,16	0,56	62,00	0,33
6300	61,45	0,66	61,59	0,61	61,52	0,14
8000	61,38	1,15	60,02	1,39	60,75	-1,36
10000	56,78	1,00	55,77	0,79	56,30	-1,01
Global dB(A)	72,35	0,58*	72,21	0,90*	72,28	-0,14
Temperatura (°C)	24,7		25,0		***	***
Pressão atmosférica (milibar)	1009		1009		***	***

* Obs.: incertezas expandidas ($U_{95\%}$) calculadas sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro. Valores de incertezas foram arredondados para cima.

Na última coluna da Tabela 5.12 pode-se notar características aleatórias nas diferenças entre medições realizadas nas duas câmaras reverberantes, sendo encontrados valores de diferenças negativos e positivos em diversas bandas de terço de oitavas.

Coincidentemente, na banda de terço de oitava de 2000 Hz ocorreu o nível de potência sonora mais elevado; isto também ocorreu com a fonte sonora Vibranihil. Porém, nas bandas adjacentes os níveis foram significativamente mais baixos, cerca de 7 a 8 dB mais baixos. Isto demonstra um elevado grau de concentração da energia sonora em uma banda de terço de

oitava. De fato, **não** foi investigada a existência de tons discretos, que poderia ser feita através de FFT; transformada rápida de Fourier.

Os níveis de potência sonora L_W em dB nas bandas de baixas frequências resultaram em valores muito baixos, sendo influenciados pelo ruído de fundo, tanto os ruídos acústicos presentes nas câmaras quanto pelo ruído eletrônico inerente à cadeia de medição; ver Tabela 5.12 e gráfico da Figura 70. Nota-se que a banda com maior nível de potência sonora foi a de 2000 Hz, também há quantidade de energia sonora significativa nas bandas de altas frequências.

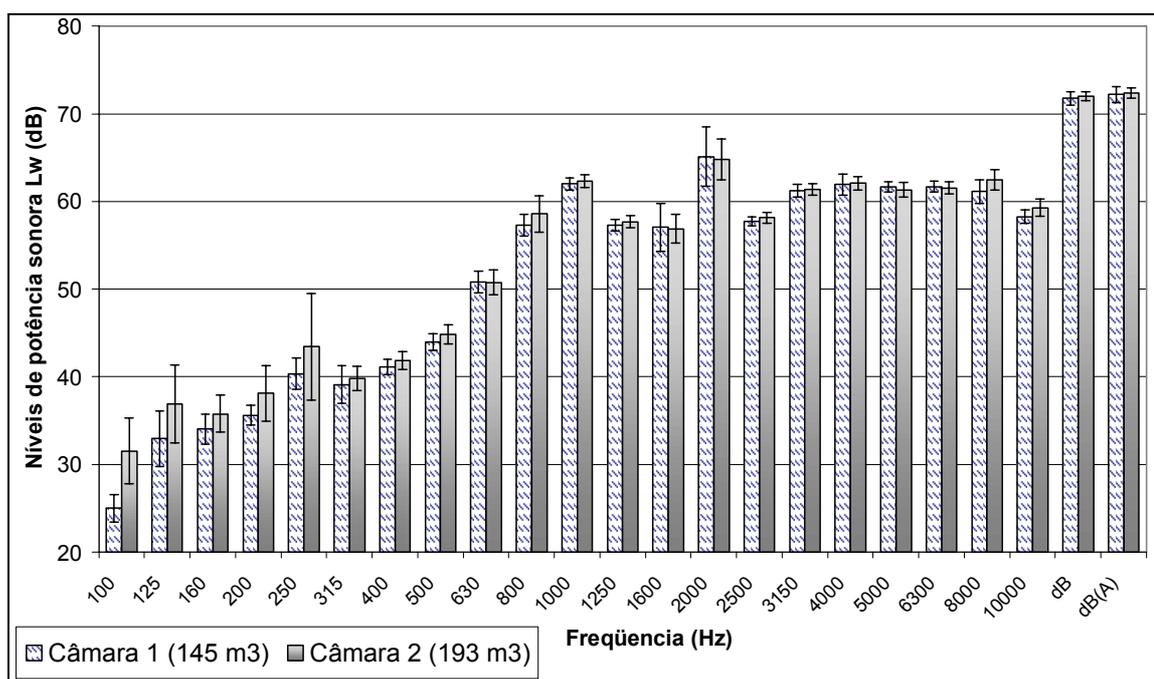


Figura 70 - Gráfico de barras, comparativo de resultados obtidos nas câmaras reverberantes de 193 m³ e 145 m³ do LVA-UFSC, níveis de potência sonora de um modelo de **secador de cabelo**. Barras de erros representam as incertezas expandidas $U_{95\%}$.

No gráfico da Figura 70 os comprimentos das barras que representam os valores dos $L_{WA_globais}$, em dB(A), praticamente coincidem. Também é possível notar que as incertezas estimadas para os níveis globais de ambas as câmaras reverberantes são ligeiramente diferentes; ver barras de erros nas barras denominadas “dB(A)”; e Tabela 5.12. Para mais detalhes sobre os valores globais em dB e em dB(A) e suas incertezas, ver Figura 74 na Subseção 5.2.3.

Além de conter grande parte da energia sonora total, a banda de 2000 Hz apresentou estimativa de incerteza elevada. De forma que é esperada uma grande influência por parte desta banda de terço de oitava na incerteza do nível de potência sonora global. Foram encontradas estimativas de incertezas relativamente muito elevadas nas bandas de 125 e 250 Hz. Isto é devido aos baixos níveis de excitação gerados pelo secador de cabelo em baixas frequências, havendo forte influência do ruído de fundo. Além da baixa difusividade das câmaras

reverberantes em baixas frequências. Também ocorreram incertezas elevadas nas bandas de 630, 800 e 1600 Hz.

5.2.2 Os cálculos de incertezas e as estimativas das fontes de incertezas, secador de cabelo ensaiado nas câmaras reverberantes do LVA

O cálculo da incerteza padrão combinada desenvolvido segundo ISO GUM mostrou que as fontes de incertezas predominantes foram os níveis de pressão sonora e tempos de reverberação medidos nas câmaras reverberantes. De antemão esperava-se que o espectro sonoro do secador de cabelo fosse diferente da fonte Vibranihil, e que isto poderia influenciar as contribuições de incertezas inerentes a cada banda de terço de oitava. De forma similar ao que aconteceu com a fonte sonora Vibranihil, a banda de frequência que mais contribuiu para a incerteza do nível de potência sonora global foi a banda de 2000 Hz, a qual também teve a maior concentração de energia sonora.

A Tabela 5.13 mostra os valores de dois balanços de incertezas feitos especificamente para os níveis de pressão sonora medidos nas câmaras reverberantes de 193 e 145 m³ do LVA-UFSC. Nesta tabela foi realçada a linha correspondente à banda de 2000 Hz, e pode-se notar que as incertezas estimadas, 1,16 dB e 1,69 dB, são relativamente elevadas comparando-se com as incertezas encontradas nas bandas adjacentes. Também na banda de 250 Hz e nas de frequências inferiores a 250 Hz foram obtidas algumas estimativas de incertezas de valores elevados, principalmente relativas à câmara de 193 m³; incertezas padrão u_{L_p} as quais são relativas somente aos níveis de pressão sonora. Em comparação com as estimativas de incertezas padrão u_{L_p} relativas às medições de níveis de pressão sonora com a fonte sonora Vibranihil¹⁸¹ na banda de 2000 Hz, 0,24 e 0,20 dB, os respectivos valores obtidos com o secador de cabelo foram cerca de cinco a oito vezes maiores. Isto indica que durante as medições dos L_p gerados pelo secador de cabelo houve variações significativamente maiores que as geradas através da fonte Vibranihil; nas posições de medição (posições de microfones) dentro das câmaras reverberantes. A explicação deste efeito leva em consideração a direcionalidade do campo sonoro gerado pelo secador de cabelo, além das variações inerentes ao funcionamento do secador que tem temperatura variável dos seus componentes ao longo dos testes, pois estava sendo ligado e desligado periodicamente em função de cada mudança de posição de microfone(s) durante as medições.

¹⁸¹ Ver Tabelas 5.3 e 5.7, nas Subseções 5.1.4.1 e 5.1.4.2.

Tabela 5.13 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , sem considerar deriva do calibrador de nível sonoro. Câmaras de 193 m³ e 145 m³ do LVA-UFSC. Secador de cabelo sob teste. Novembro de 2005.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)		u_{ccm} (dB)	$X_{Lp_aleatório}$ (dB)		c_1	d_{Lp}	$u_{Lp}(L_w)$ [dB]	
	Câmara 193 m ³	Câmara 145m ³		Câmara 193 m ³	Câmara 145m ³			Câmara 193 m ³	Câmara 145m ³
100	1,84	0,75	0,172	1,84	0,77	1,0	1,0	1,84	0,77
125	2,13	1,52	0,172	2,14	1,53	1,0	1,0	2,14	1,53
160	0,74	0,75	0,172	0,76	0,77	1,0	1,0	0,76	0,77
200	1,46	0,42	0,172	1,47	0,45	1,0	1,0	1,47	0,45
250	3,00	0,82	0,172	3,01	0,84	1,0	1,0	3,01	0,84
315	0,56	1,05	0,172	0,59	1,06	1,0	1,0	0,59	1,06
400	0,45	0,21	0,172	0,48	0,27	1,0	1,0	0,48	0,27
500	0,39	0,29	0,172	0,42	0,33	1,0	1,0	0,42	0,33
630	0,69	0,55	0,172	0,71	0,57	1,0	1,0	0,71	0,57
800	1,01	0,49	0,172	1,03	0,52	1,0	1,0	1,03	0,52
1000	0,29	0,21	0,172	0,34	0,27	1,0	1,0	0,34	0,27
1250	0,27	0,28	0,172	0,32	0,33	1,0	1,0	0,32	0,33
1600	0,81	1,33	0,172	0,82	1,34	1,0	1,0	0,82	1,34
2000	1,14	1,68	0,172	1,16	1,69	1,0	1,0	1,16	1,69
2500	0,19	0,14	0,172	0,25	0,22	1,0	1,0	0,25	0,22
3150	0,25	0,28	0,172	0,31	0,33	1,0	1,0	0,31	0,33
4000	0,34	0,57	0,172	0,38	0,60	1,0	1,0	0,38	0,60
5000	0,36	0,15	0,172	0,40	0,23	1,0	1,0	0,40	0,23
6300	0,23	0,18	0,215	0,32	0,28	1,0	1,0	0,32	0,28
8000	0,51	0,64	0,215	0,55	0,68	1,0	1,0	0,55	0,68
10000	0,37	0,22	0,215	0,43	0,31	1,0	1,0	0,43	0,31

Ainda com relação aos dados da Tabela 5.13: os desvios padrão $S(L_p)$ foram obtidos experimentalmente¹⁸² em ambas as câmaras; as estimativas de incertezas padrão da cadeia de medição u_{ccm} foram encontradas em balanço de incertezas específico¹⁸³, as estimativas de incerteza $X_{Lp_aleatório}$ são calculadas através da Equação 5.13 (na Subseção 5.1.4.1), o coeficiente de sensibilidade c_1 tem valor 1,0 porque os níveis de pressão sonora são dados diretamente em decibéis (dB), e o divisor d_{Lp} tem valor 1,0 em função da distribuição de probabilidade que foi considerada normal. As incertezas padrão atribuídas à cadeia de medição, u_{ccm} , são as mesmas usadas nos cálculos com a fonte sonora Vibranihil.

Os tempos de reverberação usados nos cálculos referentes ao secador de cabelo são praticamente os mesmos, ver Tabela 5.4, na Subseção 5.1.4.1, e Tabela 5.14. A diferença entre as Tabelas 5.4 (na Subseção 5.1.4.1) e 5.14 está nas bandas de 8 e 10 kHz nas quais foram computadas apenas os tempos de reverberação correspondentes aos decaimentos avaliados corretamente pelo software Pulse Labshop (versão 10). Ou seja, teve que ser feita uma seleção

¹⁸² Com doze posições de microfone na câmara de 193 m³, e seis posições de microfone na câmara de 145 m³ (nominal).

¹⁸³ Combinação de: incerteza considerada de caráter aleatório do calibrador de nível sonoro, incerteza do microfone de medição, e incerteza atribuída ao analisador de sinais.

manual de cada valor¹⁸⁴, para se obter apenas os valores de tempos de reverberação que foram considerados corretos, ou aceitáveis, com relação à ordem de grandeza de valores esperados naquele tipo de ensaio. Assim as estimativas de incertezas $X_{T_{rev}}$, em 8 e 10 kHz, se tornaram menores que os valores anteriores, os quais foram usados nos cálculos referentes à fonte Vibranihil.

Tabela 5.14 - Tempos de reverberação e estimativas de incertezas dos tempos de reverberação medidos na câmara de 193 m³ do LVA-UFSC em novembro de 2005. O parâmetro $x_{T_{rev}}$ foi estimado a partir dos desvios padrão experimentais. Coeficientes de sensibilidade c_2 , divisor $d_{T_{rev}}$ e incertezas padrão combinada $u_{T_{rev}}(L_W)$. Avaliações **incorretas** de decaimentos não foram computadas nas bandas de 8 e 10 kHz.

Frequência central (Hz)	T_{rev} (s) *	$X_{T_{rev}}$ (s)	c_2 (dB/s)	$d_{T_{rev}}$	$u_{T_{rev}}(L_W)$ [dB]
100	10,47	0,81	-0,42	1,0	0,34
125	9,97	1,22	-0,44	1,0	0,54
160	8,53	1,43	-0,52	1,0	0,74
200	6,90	0,87	-0,64	1,0	0,56
250	6,77	0,67	-0,66	1,0	0,44
315	6,12	0,50	-0,73	1,0	0,36
400	7,02	0,26	-0,63	1,0	0,16
500	7,83	0,59	-0,56	1,0	0,33
630	7,82	0,15	-0,57	1,0	0,08
800	7,53	0,20	-0,59	1,0	0,12
1000	7,21	0,16	-0,61	1,0	0,10
1250	6,83	0,21	-0,65	1,0	0,13
1600	6,52	0,16	-0,68	1,0	0,11
2000	5,95	0,10	-0,75	1,0	0,08
2500	5,17	0,17	-0,86	1,0	0,15
3150	4,56	0,09	-0,98	1,0	0,09
4000	3,90	0,05	-1,16	1,0	0,05
5000	3,31	0,06	-1,37	1,0	0,08
6300	2,64	0,05	-1,74	1,0	0,09
8000	1,484	0,044	-3,22	1,0	0,14
10000	1,031	0,052	-4,82	1,0	0,25

* T_{rev} são os tempos de reverberação T_{20} .

Os tempos de reverberação, T_{rev} , da câmara reverberante de 145 m³ e os valores de suas estimativas de incertezas são **os mesmos** que foram usados nos cálculos expostos na Subseção 5.1.4.2, para medições com fonte sonora Vibranihil, ver Tabela 5.8, na Subseção 5.1.4.2.

Os coeficientes de sensibilidade c_2 foram calculados através da Equação 5.16, na Subseção 5.1.4.1. E sendo atribuída distribuição de probabilidade normal às medições de T_{rev} , o divisor $d_{T_{rev}}$ assumiu valor 1,0 (ver Tabela 5.14).

Entre as contribuições de incertezas, especialmente na banda de 2000 Hz e na câmara de 193 m³, há uma predominância notável da incerteza padrão do nível de pressão

¹⁸⁴ Seleção de valores feita por avaliação subjetiva do operador.

sonora, u_{Lp} , sobre a do tempo de reverberação, u_{Trev} . Sendo que neste caso, ($u_{Lp} = 1,16$ dB) é cerca de 14 vezes maior que ($u_{Trev} = 0,08$ dB) (ver Tabelas 5.13 e 5.14).

A Equação 5.10, na Subseção 5.1.4, foi usada para calcular as incertezas padrão combinadas u_c , cujos valores são mostrados na Tabelas 5.15 e 5.16. Em cada banda de terço de oitava, os valores de incertezas padrão desde a coluna u_{Lp} até a coluna u_f (Tabelas 5.15 e 5.16) são elevados ao quadrado e somados, e tirando-se a raiz quadrada desta soma obtém-se a estimativa de incerteza padrão u_c . Estas operações matemáticas, efetuadas através da Equação 5.10 são chamadas de soma quadrática, ou também, soma geométrica.

Atentando para a banda de 2000 Hz, tanto na Tabela 5.15 quanto na Tabela 5.16, pode-se perceber o impacto dos valores predominantes das *incertezas padrão relativas aos níveis de pressão sonora*, u_{Lp} , através do fato marcante que os valores numéricos das incertezas padrão combinadas u_c são os mesmos que os de u_{Lp} . Produzindo os valores 1,16 e 1,69 dB, relativos às câmaras de 193 m³ e 145 m³, respectivamente. Ou seja, no somatório quadrático, que computa todas as possíveis fontes de incertezas, o valor predominante foi tão elevado que as outras parcelas não influenciaram o valor resultante¹⁸⁵. Concluindo-se que neste caso, e na banda de frequência de 2000 Hz, as outras fontes de incerteza são praticamente desprezáveis.

Tabela 5.15 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível de potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fator de abrangência adotado $k = 2,0$. Secador de cabelo sob teste. Câmara de 193 m³ LVA-UFSC, novembro de 2005.

Frequência central (Hz)	$u_{Lp}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_i(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_f(L_W)$ [dB]	$u_c(L_W)$ [dB]	$U(L_W)$ [dB]
100	1,84	0,34	0,018	0,005	0,015	0,019	0,080	1,88	3,75
125	2,14	0,54	0,020	0,005	0,015	0,019	0,068	2,21	4,42
160	0,76	0,74	0,021	0,004	0,014	0,019	0,062	1,06	2,12
200	1,47	0,56	0,022	0,003	0,014	0,019	0,047	1,58	3,15
250	3,01	0,44	0,023	0,002	0,014	0,019	0,039	3,04	6,08
315	0,59	0,36	0,024	0,002	0,014	0,019	0,033	0,69	1,39
400	0,48	0,16	0,024	0,001	0,013	0,019	0,028	0,51	1,02
500	0,42	0,33	0,025	0,001	0,013	0,019	0,021	0,54	1,08
630	0,71	0,08	0,025	0,001	0,013	0,019	0,018	0,71	1,43
800	1,03	0,12	0,025	0,001	0,013	0,019	0,015	1,03	2,07
1000	0,34	0,10	0,026	0,000	0,013	0,019	0,011	0,36	0,71
1250	0,32	0,13	0,026	0,000	0,013	0,019	0,009	0,35	0,69
1600	0,82	0,11	0,026	0,000	0,013	0,019	0,008	0,83	1,67
2000	1,16	0,08	0,026	0,000	0,013	0,019	0,006	1,16	2,32
2500	0,25	0,15	0,026	0,000	0,013	0,019	0,005	0,30	0,59
3150	0,31	0,09	0,027	0,000	0,012	0,019	0,004	0,32	0,64
4000	0,38	0,05	0,027	0,000	0,012	0,019	0,003	0,39	0,78
5000	0,40	0,08	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,41	0,81
6300	0,32	0,09	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,33	0,66
8000	0,55	0,14	0,029	0,002	0,012	0,019	0,002	0,57	1,15
10000	0,43	0,25	0,030	0,002	0,011	0,019	0,001	0,50	1,00

¹⁸⁵ Pelo menos se forem consideradas apenas duas casas decimais.

Tabela 5.16 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível de potência sonora em cada banda de terço de oitava. Fator de abrangência adotado $k = 2,0$. Secador de cabelo sob teste. Câmara reverberante de 145 m³ LVA-UFSC, novembro de 2005.

Frequência central (Hz)	$u_{Lp}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_i(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_t(L_W)$ [dB]	$u_c(L_W)$ [dB]	$U(L_W)$ [dB]
100	0,77	0,07	0,021	0,007	0,016	0,019	0,090	0,78	1,56
125	1,53	0,39	0,023	0,006	0,015	0,019	0,078	1,58	3,16
160	0,77	0,39	0,024	0,005	0,015	0,019	0,071	0,86	1,73
200	0,45	0,35	0,026	0,004	0,014	0,019	0,055	0,57	1,15
250	0,84	0,33	0,027	0,003	0,014	0,019	0,046	0,90	1,81
315	1,06	0,09	0,028	0,002	0,014	0,019	0,039	1,07	2,14
400	0,27	0,35	0,029	0,002	0,013	0,019	0,033	0,44	0,88
500	0,33	0,34	0,030	0,001	0,013	0,019	0,025	0,48	0,96
630	0,57	0,18	0,030	0,001	0,013	0,019	0,021	0,60	1,21
800	0,52	0,31	0,031	0,001	0,013	0,019	0,017	0,60	1,21
1000	0,27	0,21	0,031	0,001	0,013	0,019	0,013	0,34	0,69
1250	0,33	0,04	0,031	0,000	0,013	0,019	0,011	0,33	0,66
1600	1,34	0,19	0,032	0,000	0,013	0,019	0,009	1,36	2,72
2000	1,69	0,11	0,032	0,000	0,013	0,019	0,007	1,69	3,39
2500	0,22	0,13	0,032	0,000	0,013	0,019	0,006	0,26	0,52
3150	0,33	0,18	0,033	0,000	0,012	0,019	0,005	0,37	0,75
4000	0,60	0,05	0,033	0,001	0,012	0,019	0,004	0,60	1,20
5000	0,23	0,16	0,033	0,001	0,012	0,019	0,003	0,28	0,56
6300	0,28	0,12	0,034	0,001	0,012	0,019	0,002	0,30	0,61
8000	0,68	0,14	0,034	0,001	0,012	0,019	0,002	0,69	1,39
10000	0,31	0,25	0,036	0,002	0,012	0,019	0,001	0,39	0,79

Através das Equações 5.17 e 5.18, mostradas na Subseção 5.1.4.1, foram calculados os coeficientes de sensibilidade c_j e as estimativas de incerteza padrão $u_c(L_{WA})$, que são atribuídas a cada nível de potência sonora global em dB(A) gerado pelo secador de cabelo, em cada câmara reverberante; ver Tabelas 5.17 e 5.18. E aplicando-se um fator de abrangência $k = 2,0$ obtém-se as incertezas expandidas $U(L_{WA})$ de 0,58 dB(A) e 0,90 dB(A), referentes aos ensaios nas câmaras de 193 m³ e 145 m³, respectivamente. Mas ao se adicionar a estimativa da deriva atribuída ao calibrador de nível sonoro¹⁸⁶, os valores de incerteza passarão a $U(L_{WA}) = 0,68$ dB(A) relativo à câmara de 193 m³, e $U(L_{WA}) = 1,00$ dB(A) relativo ao ensaio com secador de cabelo na câmara de 145 m³ nominal.

Note na Tabela 5.17 a grande semelhança entre os valores de $c_j u_c (= 0,269$ dB) na banda de 2000 Hz e da incerteza padrão combinada $u_c(L_{WA}) = 0,289$ dB. A diferença é insignificante, apenas 0,02 dB. Isto indica o forte predomínio da banda de frequência com mais energia sonora no cálculo das incertezas de medição. E da mesma forma, nos cálculos referentes à câmara de 145 m³, a diferença entre os valores de $c_j u_c (= 0,434$ dB) na banda de 2000 Hz e de $u_c(L_{WA}) = 0,450$ dB é muito pequena, apenas 0,016 dB (ver Tabela 5.18).

¹⁸⁶ Deriva do calibrador de nível sonoro estimada em 0,1 dB.

Tabela 5.17 - Valores do cálculo da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), câmara de 193 m³ nominal do LVA-UFSC, secador de cabelo sob teste; novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Correção curva "A" (dB)	L _{wj} dB	c _j	u _c (L _{wj}) (dB)	c _j u _c (dB)	(c _j u _c) ² (dB) ²	1 / c _j
100	-19,1	31,51	0,000	1,88	0,000	0,0000	985108,8
125	-16,1	36,91	0,000	2,21	0,000	0,0000	142557,8
160	-13,4	35,77	0,000	1,06	0,000	0,0000	99393,2
200	-10,9	38,11	0,000	1,58	0,000	0,0000	32642,7
250	-8,6	43,43	0,000	3,04	0,001	0,0000	5652,9
315	-6,6	39,81	0,000	0,69	0,000	0,0000	8193,4
400	-4,8	41,87	0,000	0,51	0,000	0,0000	3371,5
500	-3,2	44,86	0,001	0,54	0,000	0,0000	1172,2
630	-1,9	50,75	0,004	0,71	0,003	0,0000	223,9
800	-0,8	58,58	0,035	1,03	0,036	0,0013	28,6
1000	0	62,33	0,100	0,36	0,035	0,0012	10,0
1250	0,6	57,67	0,039	0,35	0,014	0,0002	25,6
1600	1	56,89	0,036	0,83	0,030	0,0009	27,9
2000	1,2	64,80	0,232	1,16	0,269	0,0721	4,3
2500	1,3	58,15	0,051	0,30	0,015	0,0002	19,5
3150	1,2	61,38	0,105	0,32	0,034	0,0011	9,5
4000	1	62,08	0,118	0,39	0,046	0,0021	8,4
5000	0,5	61,33	0,089	0,41	0,036	0,0013	11,3
6300	-0,1	61,55	0,081	0,33	0,027	0,0007	12,3
8000	-1,1	62,48	0,080	0,57	0,046	0,0021	12,5
10000	-2,5	59,28	0,028	0,50	0,014	0,0002	36,1
					u _c (L _{WA}) dB(A)	U(L _{WA}) dB(A)	
Global					0,289	0,58	k = 2,0

Tabela 5.18 - Valores do cálculo da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), câmara de 145 m³ nominal do LVA-UFSC, secador de cabelo sob teste; novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Correção curva "A" (dB)	L _{wj} dB	c _j	u _c (L _{wj}) (dB)	c _j u _c (dB)	(c _j u _c) ² (dB) ²	1 / c _j
100	-19,1	25,01	0,000	0,78	0,000	0,0000	4262945,7
125	-16,1	32,95	0,000	1,58	0,000	0,0000	343525,3
160	-13,4	34,05	0,000	0,86	0,000	0,0000	143101,9
200	-10,9	35,62	0,000	0,57	0,000	0,0000	56013,2
250	-8,6	40,34	0,000	0,90	0,000	0,0000	11123,6
315	-6,6	39,09	0,000	1,07	0,000	0,0000	9363,9
400	-4,8	41,10	0,000	0,44	0,000	0,0000	3893,4
500	-3,2	43,97	0,001	0,48	0,000	0,0000	1393,6
630	-1,9	50,82	0,005	0,60	0,003	0,0000	213,4
800	-0,8	57,29	0,027	0,60	0,016	0,0003	37,3
1000	0	62,00	0,095	0,34	0,033	0,0011	10,5
1250	0,6	57,29	0,037	0,33	0,012	0,0002	27,0
1600	1	57,06	0,038	1,36	0,052	0,0027	26,0
2000	1,2	65,09	0,256	1,69	0,434	0,1884	3,9
2500	1,3	57,75	0,048	0,26	0,012	0,0002	20,7
3150	1,2	61,23	0,105	0,37	0,039	0,0015	9,5
4000	1	61,92	0,118	0,60	0,071	0,0050	8,5
5000	0,5	61,66	0,099	0,28	0,028	0,0008	10,1
6300	-0,1	61,69	0,087	0,30	0,026	0,0007	11,5
8000	-1,1	61,12	0,060	0,69	0,042	0,0018	16,6
10000	-2,5	58,27	0,023	0,39	0,009	0,0001	44,0
					u _c (L _{WA}) dB(A)	U(L _{WA}) dB(A)	
Global					0,450	0,90	k = 2,0

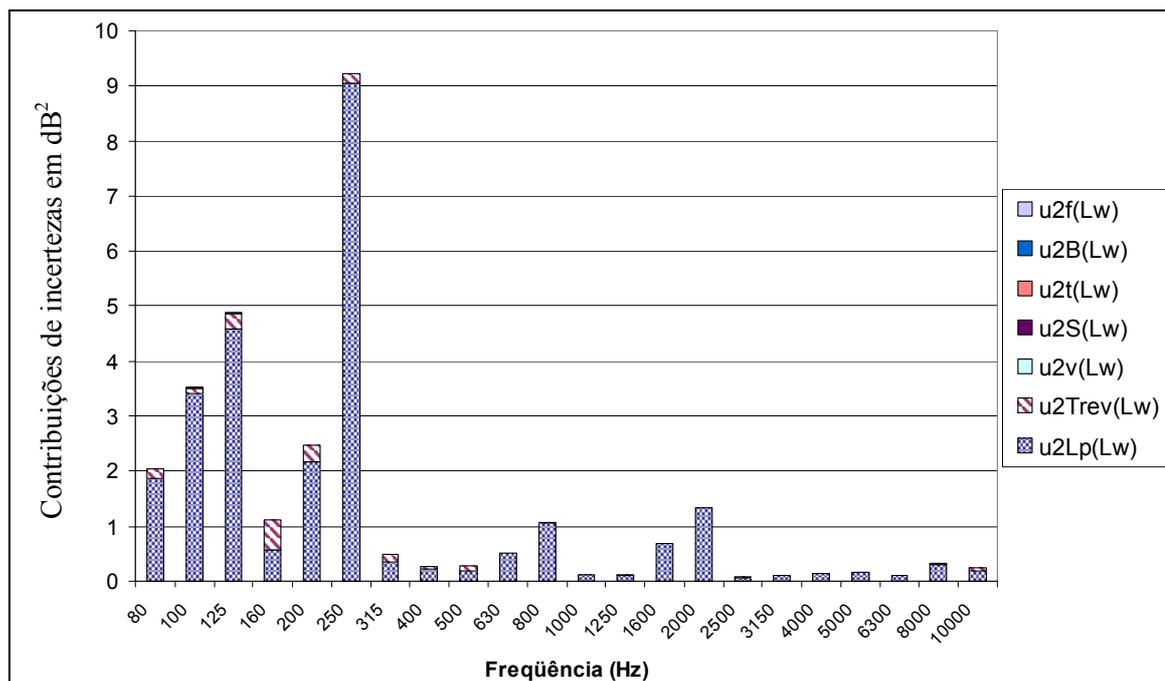


Figura 71 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para cada banda de terço de oitava. **Secador de cabelo** ensaiado na câmara de 193 m^3 do LVA-UFSC.

O gráfico da Figura 71 é a representação das contribuições de incertezas referentes a cada banda de terço de oitava através das estimativas de incertezas padrão elevadas ao quadrado (u^2). Cada banda é representada por uma barra composta de contribuições de incertezas, onde predominaram as fontes de incertezas de medição de níveis de pressão sonora (representadas por u_{Lp}^2), e dos tempos de reverberação (representadas por $u_{T_{rev}}^2$); contribuições de incertezas em decibel ao quadrado. Nota-se que ocorreram valores de incertezas relativamente elevados nas bandas de baixas frequências, principalmente na banda de 250 Hz. Somente na banda de 160 Hz as incertezas estimadas para L_p e T_{rev} tiveram contribuições da mesma ordem de grandeza. Nas outras bandas de frequências as incertezas relativas às medições de L_p predominaram.

As incertezas relativas às medições de volume (V) e superfície (S) da câmara reverberante, temperatura (t), pressão atmosférica (B), e frequências (f) não aparecem nos gráficos das figuras 71, 72 e 73 devido aos valores relativamente muito pequenos, diante das incertezas estimadas para L_p e T_{rev} . Na Figura 72 somente as incertezas das bandas entre 800 e 8000 Hz são visíveis, e na Figura 73 apenas em 1600, 2000 e 4000 Hz aparecem as barras que representam as contribuições de incertezas. Em ambos os gráficos nota-se a predominância marcante da banda de 2000 Hz a qual produz a maior parcela da incerteza estimada para o nível de incerteza global em dB(A) dos ensaios com secador de cabelo.

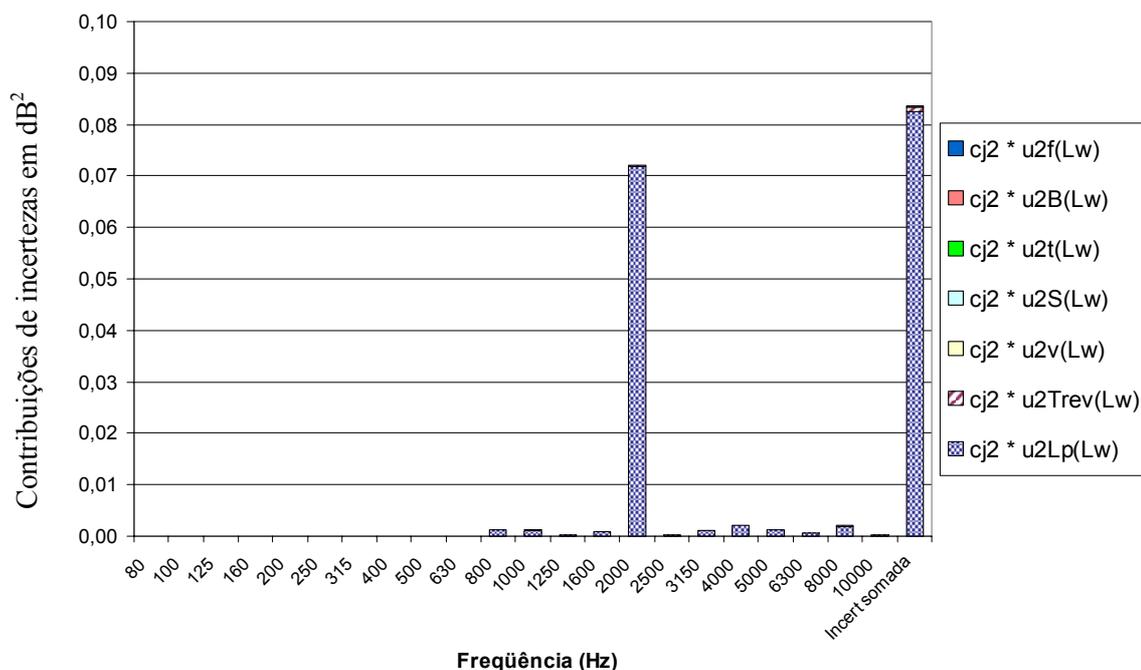


Figura 72 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). **Secador de cabelo** sob teste na câmara reverberante de 193 m³ do LVA-UFSC.

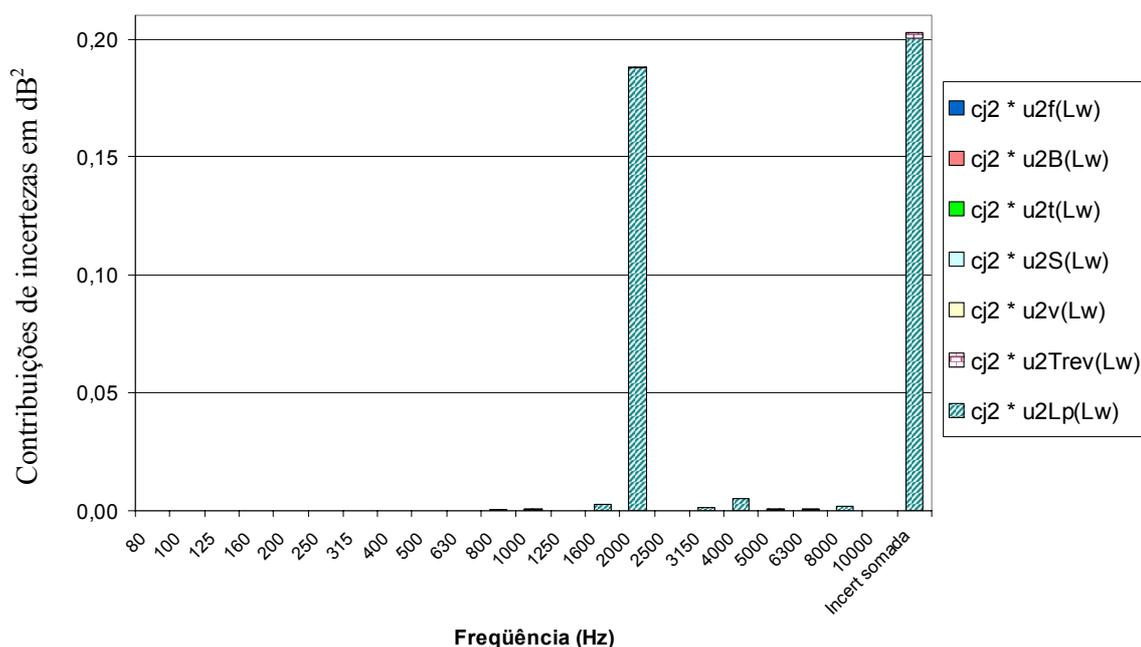


Figura 73 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). **Secador de cabelo** sob teste na câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC.

Ao se comparar os efeitos das características da fonte sonora Vibranihil e do modelo de secador de cabelo testado sobre o cálculo das incertezas padrão,

Considerando os resultados das investigações sobre as incertezas inerentes aos ensaios com a fonte sonora Vibranihil¹⁸⁷ e este modelo específico de secador de cabelo, é possível perceber a grande influência das características do espectro sonoro do aparelho sob teste no balanço de incertezas e, conseqüentemente, na incerteza do resultado global de nível de potência sonora. Principalmente quando a fonte sonora emite energia sonora de forma que esteja concentrada predominantemente em uma banda de frequência, ou em poucas bandas.

5.2.3 Análise comparativa dos resultados, secador de cabelo

Entre os resultados dos dois ensaios¹⁸⁸ realizados nas câmaras reverberantes do LVA, tendo o secador de cabelo sob teste, a diferença foi de apenas 0,14 dB(A). Resultados relativamente muito próximos e uma concordância que não era esperada de antemão. As barras de erros na Figura 74 representam as incertezas calculadas. As barras de erros envolvem os resultados obtidos em ambas as câmaras com folga, ou seja, houve boa concordância e, além disto, as incertezas estimadas podem estar além do necessário para contemplar as variações encontradas nestes ensaios em particular.

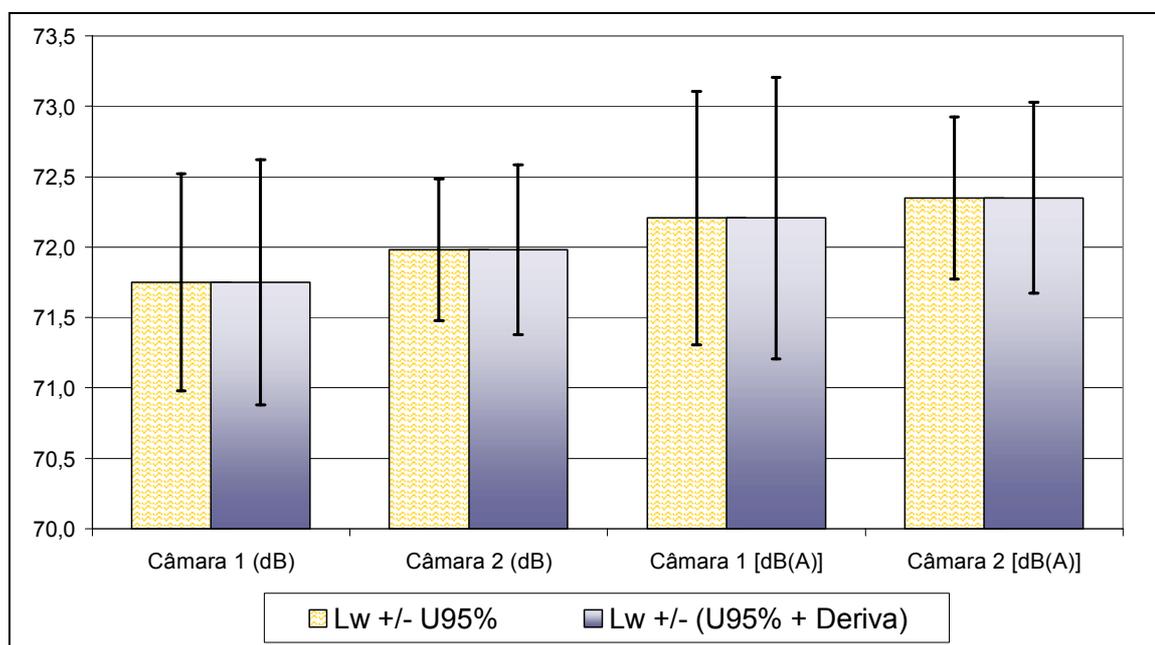


Figura 74 - Gráfico comparativo entre resultados obtidos com **secador de cabelo** sob teste nas câmaras reverberantes de 145 m³ e 193 m³ do LVA-UFSC (Câmara 1 e 2). Níveis de potência sonora globais em dB e em dB(A), e barras de erro ilustrando as incertezas calculadas.

As incertezas calculadas para L_w em dB, sem ponderação da curva “A”, obtidos com o secador de cabelo nas câmaras 1 e 2 do LVA-UFSC foram usadas para plotar as barras

¹⁸⁷ Ver Seção 5.1, principalmente em 5.1.4.1 e 5.1.4.2.

¹⁸⁸ De determinação de nível de potência sonora pelo método direto em câmaras reverberantes. Em dB(A).

de erros no gráfico da Figura 74 nas classes denominadas “Câmara 1 (dB)” e “Câmara 2 (dB)”. Os valores destas incertezas são: 0,77 dB, 0,87 dB, 0,50 dB e 0,60 dB, respectivamente.

Testes de conformidade dos resultados por banda de terço de oitavas e níveis globais foram computados na Tabela 5.19. São comparados os resultados obtidos nas duas câmaras reverberantes do LVA-UFSC. E, neste caso, não há uma referência que possa ser considerada *valor verdadeiro*; que poderia ser proveniente de resultados de ensaio(s) em um laboratório piloto, por exemplo. Praticamente todas as bandas de frequências apresentaram conformidade, os valores globais de L_{WA} também apresentaram conformidade, ver Tabela 5.19. A banda de 100 Hz foi uma exceção, onde a diferença ultrapassou a soma das incertezas estimadas, produzindo uma não-conformidade. Isto é explicado pelo baixo nível de pressão sonora gerado pelo secador de cabelo em baixas frequências, e pelo ruído de fundo que tende a interferir nos resultados que têm níveis de pressão e potência sonora baixos.

Tabela 5.19 - Análise da conformidade dos resultados das medições com **secador de cabelo**. Incertezas expandidas, $U_{95\%}$, de ambas as câmaras reverberantes foram somadas para avaliar a conformidade dos valores obtidos, em cada banda de terço de oitava e incertezas dos valores globais em dB(A).

Frequência central da banda (Hz)	Soma das incertezas expandidas $U_{95\%}$ (dB)	Diferença entre valores medidos nas câmaras reverberantes (dB)	Análise dos resultados
100	5,31	-6,50	Não-conformidade
125	7,58	-3,96	Conformidade
160	3,85	-1,72	Conformidade
200	4,30	-2,49	Conformidade
250	7,89	-3,08	Conformidade
315	3,53	-0,72	Conformidade
400	1,90	-0,77	Conformidade
500	2,04	-0,89	Conformidade
630	2,63	0,07	Conformidade
800	3,28	-1,30	Conformidade
1000	1,40	-0,33	Conformidade
1250	1,35	-0,38	Conformidade
1600	4,38	0,17	Conformidade
2000	5,71	0,29	Conformidade
2500	1,11	-0,40	Conformidade
3150	1,39	-0,14	Conformidade
4000	1,98	-0,16	Conformidade
5000	1,37	0,33	Conformidade
6300	1,27	0,14	Conformidade
8000	2,53	-1,36	Conformidade
10000	1,79	-1,01	Conformidade
Global dB(A)	1,48	-0,14	Conformidade
Considerando deriva do calibrador *	1,68	-0,14	Conformidade

* Deriva do calibrador de nível sonoro estimada em 0,10 dB

Ao se analisar a conformidade especificamente na banda de 2000 Hz pode-se concluir que a soma das incertezas é cerca de vinte vezes maior que a diferença entre os

resultados de níveis de potência sonora naquela banda de frequência. E com relação aos valores globais de L_{WA} , a soma das incertezas estimadas é cerca de dez vezes maior que a diferença entre valores de L_{WA} globais obtidos em ambas as câmaras reverberantes; ver Tabela 5.19.

Após estes estudos detalhados sobre as incertezas de medições dos ensaios com um modelo de secador de cabelo, é importante dar *um resultado final* a respeito do valor que deveria ser declarado, em um laudo por exemplo. Os níveis de potência sonora e as incertezas associadas foram estimados em: $72,35 \pm 0,68$ dB(A) obtido na câmara de 193 m^3 e $72,21 \pm 1,00$ dB(A) para a câmara¹⁸⁹ de 145 m^3 . E arredondando para apenas uma casa decimal: $L_{WA} = 72,4 \pm 0,8$ dB(A) (câmara de 193 m^3) e $L_{WA} = 72,2 \pm 1,0$ dB(A) (câmara de 145 m^3). Mesclando estes últimos e expressando como um *resultado geral*: $L_{WA_global} = 72,3 \pm 1,1$ dB(A).

5.3 Ensaio com liquidificador

O aparelho testado foi um modelo de liquidificador usado, marca Black & Decker, 220 volts. Foram determinados os níveis de potência sonora, em dB e dB(A), e calculadas as incertezas de medição do liquidificador; incertezas referentes aos valores em dB(A). Os ensaios foram realizados segundo a norma ISO 3741 : 1999, com exceção dos tempos de reverberação que foram medidos na faixa de decaimento de 20 dB (T_{20}) e não na faixa de 15 dB (T_{15}) como especificado na norma¹⁹⁰. Os valores de tempos de reverberação (T_{rev} ou T_{20}) das câmaras reverberantes, e as estimativas de incertezas $X_{T_{rev}}$, usados nos cálculos a seguir são os mesmos que foram usados para calcular os L_{WA} da fonte sonora Vibranihil e respectivas incertezas, ver Subseção 5.1.4.

O modelo de liquidificador sob teste tem duas opções de velocidades de rotação. Os cálculos de incertezas foram desenvolvidos apenas para a “velocidade 2” (velocidade máxima do aparelho), que é a velocidade de rotação mais rápida. O copo do liquidificador foi preenchido com $\frac{3}{4}$ litro de água, cerca da metade do volume total do mesmo. Durante os ensaios a temperatura da água aumentou significativamente, a ponto de ser necessário trocá-la algumas vezes para evitar que houvesse fervura dentro do copo do liquidificador. Durante as medições de níveis de pressão sonora, L_p , gerados pelo liquidificador, foram intercalados os ensaios com as

¹⁸⁹ Considerando a deriva do calibrador de nível sonoro.

¹⁹⁰ Foram usados os tempos de reverberação T_{20} (faixa de avaliação das curvas de decaimentos de 20 decibéis) nos cálculos referentes à fonte sonora Vibranihil, secador de cabelo e liquidificador.

velocidades de rotação 1 e 2 do liquidificador, sendo que todas as medições foram efetuadas em uma única bateria para cada câmara reverberante. Ou seja, para cada posição de microfone o liquidificador era ensaiado com velocidade 1 e posteriormente na velocidade 2, e assim sucessivamente até completar a bateria de medições planejada para cada uma das câmaras reverberantes.

Os equipamentos da cadeia de medição usada nos ensaios com o liquidificador estão discriminados na Subseção 5.1.1, porém não foi usado analisador de sinais marca Larson Davis, nem microfone de uma polegada.

5.3.1 Resultados experimentais obtidos nos testes com liquidificador

Na Tabela 5.20 estão os resultados de níveis de potência sonora em dB(A), L_{WA} , obtidos através de ensaios experimentais com liquidificador nas câmaras reverberantes de 145 m³ e 193 m³ do LVA-UFSC, e as incertezas expandidas $U_{95\%}$ em dB(A) calculadas através de avaliações de incertezas Tipo A e Tipo B. As incertezas foram calculadas apenas para os ensaios relativos à *velocidade 2* de rotação do liquidificador.

As três bandas de terço de oitava onde ocorreram os níveis de potência sonora em dB(A), L_{WA} , mais elevados foram: 1600 Hz, 2000 Hz e 1000 Hz; ver Tabela 5.20 e gráfico da Figura 75. Na banda de 1600 Hz, onde ocorreu o nível mais elevado, houve concordância entre os resultados de forma que a diferença entre os resultados de L_{WA} obtidos nas duas câmaras reverberantes na *velocidade 2* foi de apenas 0,09 dB(A), e na *velocidade 1* a diferença foi de 0,43 dB(A). Na banda de 2000 Hz a concordância foi maior, com diferenças entre os resultados de apenas 0,06 dB(A) em ambas as velocidades de rotação do liquidificador.

Tabela 5.20 - Valores dos níveis de potência sonora, L_{WA} , do liquidificador, nas velocidades 1 e 2, medidos em duas câmaras reverberantes do LVA-UFSC. Também valores de incertezas expandidas $U_{95\%}$ calculadas, apenas para a “velocidade 2”; temperatura e pressão atmosférica durante ensaios.

Frequência central da banda (Hz)	Reverberante 193 m ³ ($L_{WA} \pm U_{95\%}$) dB(A)		Reverberante 145 m ³ ($L_{WA} \pm U_{95\%}$) dB(A)		Média energética L_{WA} dB(A)	Diferença entre as 2 medições dB	Reverb. 193 m ³ L_{WA} dB(A)	Reverb. 145 m ³ L_{WA} dB(A)	Diferença entre as 2 medições
Liquidificador na velocidade 2							Velocidade 1		
100	28,04	3,36	23,89	2,31	26,45	-4,16	31,15	25,32	-5,83
125	46,32	6,04	38,61	3,86	43,99	-7,71	39,11	36,51	-2,60
160	44,67	2,59	42,27	2,68	43,64	-2,41	43,20	41,67	-1,53
200	52,11	2,82	50,23	3,65	51,27	-1,88	67,63	64,81	-2,82
250	73,15	3,43	69,90	6,07	71,82	-3,25	69,40	65,50	-3,90
315	60,51	1,35	59,22	1,67	59,92	-1,29	59,90	59,14	-0,76
400	65,47	1,21	65,45	1,69	65,46	-0,02	68,70	69,45	0,75
500	71,22	3,64	68,55	2,61	70,09	-2,67	68,87	67,63	-1,23
630	69,32	1,49	68,56	1,10	68,96	-0,76	72,85	71,28	-1,57
800	74,31	1,18	73,43	1,47	73,89	-0,88	72,95	72,59	-0,35
1000	80,13	1,37	79,45	1,40	79,80	-0,69	78,36	77,74	-0,62
1250	77,99	0,94	77,51	0,92	77,76	-0,48	77,54	76,97	-0,58
1600	81,80	0,74	81,89	0,99	81,85	0,09	80,06	80,49	0,43
2000	81,26	0,75	81,32	1,10	81,29	0,06	77,77	77,72	-0,06
2500	75,95	1,83	74,74	0,54	75,39	-1,22	74,25	73,19	-1,07
3150	73,80	1,12	73,14	1,17	73,48	-0,66	70,08	69,54	-0,54
4000	72,48	2,31	71,18	1,04	71,88	-1,30	70,05	68,97	-1,09
5000	70,15	0,82	70,47	0,86	70,31	0,32	67,87	68,14	0,27
6300	69,55	0,80	69,88	0,73	69,72	0,33	66,80	67,11	0,31
8000	66,35	1,76	66,10	0,92	66,22	-0,25	63,40	63,40	0,00
10000	60,14	5,35	59,73	0,91	59,94	-0,42	56,97	56,93	-0,04
Global dB(A)	88,00	0,40*	87,59	0,43*	87,80	-0,41	86,20	85,86	-0,33
Temperatura (°C)	25,0		26,1		***	***	25,0	26,1	***
Pressão atmosférica (milibar)	1012		1008		***	***	1012	1008	***
* Obs.: incertezas expandidas ($U_{95\%}$) calculadas sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro. Valores de incertezas foram arredondados para cima. As temperaturas foram medidas nos ensaios de medições de níveis de pressão sonora L_p .									

Na banda de 250 Hz ocorreram as maiores diferenças de níveis de potência sonora entre os resultados obtidos nas duas câmaras reverberantes; diferenças da ordem de 3,2 a 3,9 dB(A), ver Tabela 5.20. Esta banda de frequência tem uma grande quantidade de energia sonora, considerando o valor de L_{WF} ; nível de potência sonora em dB, como se pode ver mais adiante nas Tabelas 5.24 e 5.25. Onde se encontram valores de L_{WF} de 78,50 e 81,75 dB para a banda de 250 Hz. Além disto, os maiores desvios padrão de L_p e maiores incertezas de medição estão relacionadas com a banda de 250 Hz. No gráfico da Figura 75 nota-se que as incertezas estimadas para a banda de 250 Hz são superiores em relação às bandas adjacentes. São variações relativamente grandes em uma banda de baixa frequência que não ocorreram nos ensaios com a fonte sonora Vibranihil, ver Tabela 5.11 na Subseção 5.1.5. Diferença entre resultados em ambas as câmaras reverberantes de 3,08 dB(A) ocorreu com o secador de cabelo, na banda de 250 Hz,

ver Tabela 5.19 na Subseção 5.2.3. Estes fatos indicam que a difusividade das câmaras reverberantes está perdendo desempenho em uma banda de terço de oitava específica, possivelmente pela presença de tons puros no espectro da fonte sonora sob teste. Considerando que a excitação do campo sonoro da câmara reverberante depende das características da fonte sonora a ser testada. No caso do liquidificador também pode haver variações relativamente grandes de potência sonora devido ao princípio de funcionamento do próprio aparelho, que possui hélice que gira em alta velocidade em contato com água, além de outras partes mecânicas específicas que não serão detalhadas neste trabalho.

A banda de 1000 Hz apresentou variações (diferenças) entre os resultados em ambas as câmaras reverberantes de aproximadamente 0,6 a 0,7 dB(A). Esta banda de frequência possui energia sonora considerável e por isto também é importante na avaliação de incertezas de medição dos ensaios feitos com o liquidificador. Note que os valores numéricos relativos às bandas de terço de oitavas comentadas anteriormente foram realçadas na Tabela 5.20 e nas outras tabelas a seguir, para facilitar a interpretação destes resultados experimentais e dos cálculos de incertezas.

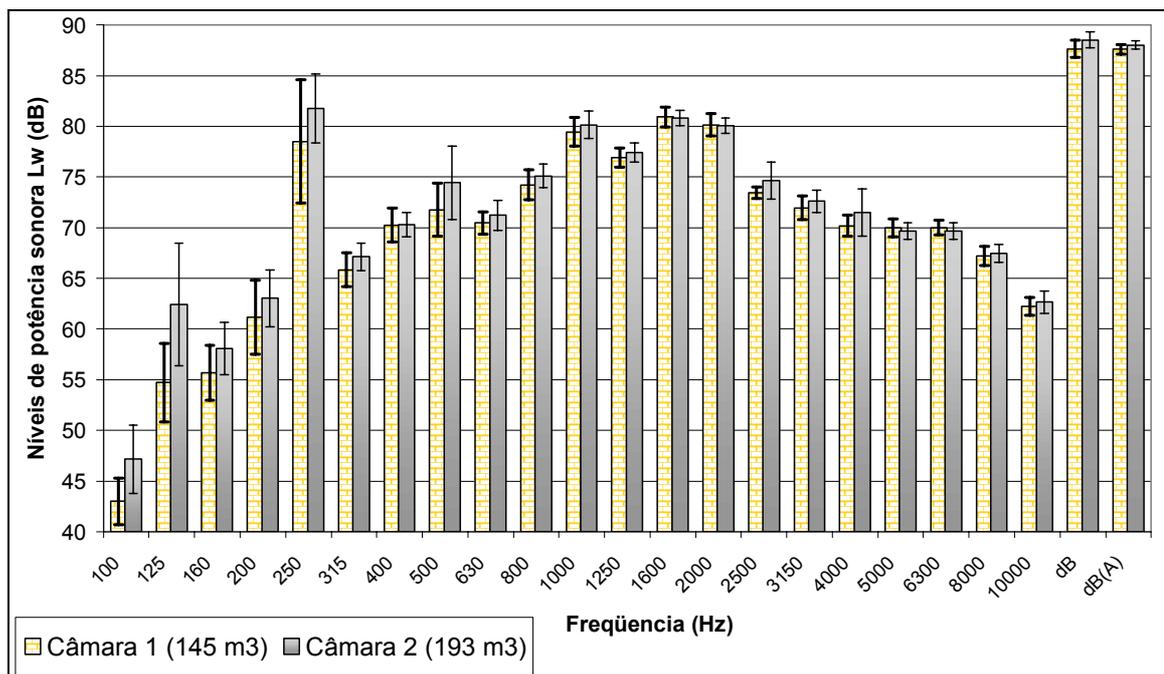


Figura 75 - Gráfico de barras; comparativo de resultados obtidos nas câmaras reverberantes de 193 m³ e 145 m³ do LVA-UFSC, níveis de potência sonora de um modelo de **liquidificador** (velocidade 2), em dB. Barras de erros representam as incertezas expandidas U_{95%}.

5.3.2 Cálculos de incertezas dos ensaios com liquidificador nas câmaras reverberantes do LVA

Em relação aos ensaios com fonte Vibranihil e secador de cabelo, a diferença mais significativa da análise das incertezas dos ensaios com o liquidificador ocorreu nas incertezas das medições de níveis de pressão sonora, L_p . As outras fontes de incertezas tiveram praticamente os mesmos valores que foram aplicados nos cálculos referentes aos ensaios com o secador de cabelo; ver Subseção 5.2.2.

Foram doze posições de microfone para medir os L_p na câmara reverberante de 193 m³, e oito posições de microfone na câmara de 145 m³. Da mesma forma que nas outras análises de incertezas feitas anteriormente, os *desvios padrão dos níveis de pressão sonora*, $S(L_p)$, foram usados como estimativas de incertezas padrão¹⁹¹. Na Tabela 5.21 são apresentados os valores¹⁹² das estimativas de incertezas padrão da cadeia de medição, u_{ccm} , os desvios padrão de L_p , e as estimativas calculadas para as incertezas padrão de níveis de pressão sonora, u_{Lp} .

Nos ensaios na câmara reverberante de 193 m³ e nas bandas de 1600 Hz e 2000 Hz ocorreram os menores valores de desvios padrão de níveis de pressão sonora, da ordem de 0,3 dB. Sendo que estas bandas de frequência têm elevados níveis de potência sonora espera-se que isto contribua para que a incerteza do L_{WA} global seja menor que na câmara de 145 m³, ver Tabela 5.21. Para a câmara de 145 m³ e nas bandas de 1600 e 2000 Hz os desvios padrão dos L_p foram um pouco maiores, da ordem de 0,4 a 0,5 dB. E na banda de 1000 Hz, em ambas as câmaras reverberantes, os desvios padrão foram praticamente iguais; 0,66 e 0,65 dB. Isto levou a incertezas padrão u_{Lp} quase iguais; 0,68 e 0,67 dB. O maior¹⁹³ desvio padrão, 3,01 dB, ocorreu na banda de 250 Hz na câmara de 145 m³. É um desvio padrão causado por variações consideráveis de L_p em uma banda de frequência específica. Lembrando que 3 dB corresponde ao dobro da energia sonora, e que desvios padrão são “bilaterais”, ou seja, de fato o desvio padrão citado corresponde a ± 3 dB.

¹⁹¹ Na Tabela 5.21, S_{Lp} é apresentado como “Desvio padrão de L_p (dB)”.

¹⁹² Para detalhes de cálculos destes valores, ver Equações 5.12 a 5.14, na Subseção 5.1.4.1.

¹⁹³ Desvio padrão da mesma ordem de grandeza, 2,97 dB, ocorreu em 125 Hz na câmara reverberante de 193 m³, porém esta banda tem nível de potência sonora relativamente baixo, e por isto é menos interessante nesta análise de incertezas.

Tabela 5.21 - Incertezas padrão calculadas para os níveis de pressão sonora, L_p , sem considerar a deriva do calibrador de nível sonoro. Câmaras reverberantes de 193 m³ e 145 m³ do LVA-UFSC.**Liquidificador** sob teste (na velocidade 2). Novembro de 2005.

Frequência central (Hz)	Desvio padrão de L_p (dB)		u_{ccm} (dB)	$X_{Lp_aleatório}$ (dB)		c_1	d_{Lp}	$u_{Lp}(L_w)$ [dB]	
	Câmara 193 m ³	Câmara 145m ³		Câmara 193 m ³	Câmara 145m ³			Câmara 193 m ³	Câmara 145m ³
100	1,63	1,14	0,172	1,64	1,15	1,0	1,0	1,64	1,15
125	2,97	1,88	0,172	2,97	1,89	1,0	1,0	2,97	1,89
160	1,05	1,27	0,172	1,06	1,28	1,0	1,0	1,06	1,28
200	1,28	1,78	0,172	1,29	1,79	1,0	1,0	1,29	1,79
250	1,65	3,01	0,172	1,66	3,01	1,0	1,0	1,66	3,01
315	0,54	0,81	0,172	0,57	0,83	1,0	1,0	0,57	0,83
400	0,55	0,75	0,172	0,58	0,77	1,0	1,0	0,58	0,77
500	1,78	1,25	0,172	1,79	1,26	1,0	1,0	1,79	1,26
630	0,72	0,49	0,172	0,74	0,52	1,0	1,0	0,74	0,52
800	0,55	0,64	0,172	0,58	0,67	1,0	1,0	0,58	0,67
1000	0,66	0,65	0,172	0,68	0,67	1,0	1,0	0,68	0,67
1250	0,41	0,42	0,172	0,45	0,46	1,0	1,0	0,45	0,46
1600	0,31	0,42	0,172	0,35	0,45	1,0	1,0	0,35	0,45
2000	0,32	0,51	0,172	0,37	0,54	1,0	1,0	0,37	0,54
2500	0,88	0,16	0,172	0,90	0,23	1,0	1,0	0,90	0,23
3150	0,52	0,53	0,172	0,55	0,56	1,0	1,0	0,55	0,56
4000	1,14	0,49	0,172	1,15	0,51	1,0	1,0	1,15	0,51
5000	0,36	0,36	0,172	0,40	0,40	1,0	1,0	0,40	0,40
6300	0,32	0,27	0,215	0,39	0,34	1,0	1,0	0,39	0,34
8000	0,69	0,39	0,215	0,72	0,44	1,0	1,0	0,72	0,44
10000	0,76	0,38	0,215	0,79	0,44	1,0	1,0	0,79	0,44

Os valores de tempos de reverberação T_{rev} e estimativas de incertezas $X_{T_{rev}}$ da câmara reverberante de 193 m³ utilizados nos cálculos de incerteza de ensaios com liquidificador são **os mesmos** que foram usados nos cálculos de incerteza da fonte sonora Vibranihil, na Subseção 5.1.4.1, ver Tabela 5.4. Os valores de T_{rev} da câmara de 145 m³ e os valores de suas estimativas de incertezas são **os mesmos** que foram usados nos cálculos expostos na Subseção 5.1.4.2; cálculos relativos à fonte sonora Vibranihil, ver Tabela 5.8.

Quanto aos valores de incertezas padrão de tempos de reverberação, $u_{T_{rev}}$, usados nos cálculos de incertezas padrão combinadas mostrados na Tabela 5.22 (câmara reverberante de 193 m³), são os mesmos que foram usados para calcular incertezas das medições da fonte Vibranihil, ver Tabela 5.5, na Subseção 5.1.4.1, e Tabela 5.22. De forma similar, os valores de $u_{T_{rev}}$, referentes à câmara de 145 m³, também são os mesmos utilizados anteriormente, ver Tabela 5.9, na Subseção 5.1.4.2, e Tabela 5.23.

Tabela 5.22 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Liquidificador sob teste, na velocidade 2. Câmara de 193 m³ LVA-UFSC, novembro de 2005.

Frequência central (Hz)	$u_{Lp}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_i(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_f(L_W)$ [dB]	$u_c(L_W)$ [dB]	$U(L_W)$ [dB]
100	1,64	0,34	0,018	0,005	0,015	0,019	0,080	1,68	3,36
125	2,97	0,54	0,020	0,005	0,015	0,019	0,068	3,02	6,04
160	1,06	0,74	0,021	0,004	0,014	0,019	0,062	1,30	2,59
200	1,29	0,56	0,022	0,003	0,014	0,019	0,047	1,41	2,82
250	1,66	0,44	0,023	0,002	0,014	0,019	0,039	1,72	3,43
315	0,57	0,36	0,024	0,002	0,014	0,019	0,033	0,67	1,35
400	0,58	0,16	0,024	0,001	0,013	0,019	0,028	0,60	1,21
500	1,79	0,33	0,025	0,001	0,013	0,019	0,021	1,82	3,64
630	0,74	0,08	0,025	0,001	0,013	0,019	0,018	0,74	1,49
800	0,58	0,12	0,025	0,001	0,013	0,019	0,015	0,59	1,18
1000	0,68	0,10	0,026	0,000	0,013	0,019	0,011	0,69	1,37
1250	0,45	0,13	0,026	0,000	0,013	0,019	0,009	0,47	0,94
1600	0,35	0,11	0,026	0,000	0,013	0,019	0,008	0,37	0,74
2000	0,37	0,08	0,026	0,000	0,013	0,019	0,006	0,38	0,75
2500	0,90	0,15	0,026	0,000	0,013	0,019	0,005	0,91	1,83
3150	0,55	0,09	0,027	0,000	0,012	0,019	0,004	0,56	1,12
4000	1,15	0,05	0,027	0,000	0,012	0,019	0,003	1,16	2,31
5000	0,40	0,08	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,41	0,82
6300	0,39	0,09	0,027	0,001	0,012	0,019	0,002	0,40	0,80
8000	0,72	0,51	0,028	0,001	0,012	0,019	0,002	0,88	1,76
10000	0,79	2,55	0,028	0,001	0,012	0,019	0,001	2,67	5,35

Os cálculos necessários para obter as estimativas de incertezas padrão combinadas, u_c , mostradas nas Tabelas 5.22 e 5.23 foram feitos usando as Equações 5.8, 5.9 e 5.10, da Subseção 5.1.4. A Equação 5.10 corresponde ao somatório quadrático das incertezas padrão apresentadas nas Tabelas 5.22 e 5.23. Nas quais se pode notar que os valores de u_{Lp} predominam como fontes de incertezas em praticamente todas as bandas de terço de oitavas.

Tabela 5.23 - Valores das fontes de incertezas no cálculo da incerteza padrão combinada de nível potência sonora em cada banda de terço de oitava. Liquidificador sob teste, na velocidade 2. Câmara reverberante de 145 m³ LVA-UFSC, novembro de 2005.

Frequência central (Hz)	$u_{Lp}(L_W)$ [dB]	$u_{Trev}(L_W)$ [dB]	$u_v(L_W)$ [dB]	$u_s(L_W)$ [dB]	$u_i(L_W)$ [dB]	$u_B(L_W)$ [dB]	$u_f(L_W)$ [dB]	$u_c(L_W)$ [dB]	$U(L_W)$ [dB]
100	1,15	0,07	0,021	0,007	0,015	0,019	0,090	1,16	2,31
125	1,89	0,39	0,023	0,006	0,015	0,019	0,078	1,93	3,86
160	1,28	0,39	0,024	0,005	0,015	0,019	0,071	1,34	2,68
200	1,79	0,35	0,026	0,004	0,014	0,019	0,055	1,83	3,65
250	3,01	0,33	0,027	0,003	0,014	0,019	0,046	3,03	6,07
315	0,83	0,09	0,028	0,002	0,014	0,019	0,039	0,83	1,67
400	0,77	0,35	0,029	0,002	0,013	0,019	0,033	0,84	1,69
500	1,26	0,34	0,030	0,001	0,013	0,019	0,025	1,31	2,61
630	0,52	0,18	0,030	0,001	0,013	0,019	0,021	0,55	1,10
800	0,67	0,31	0,031	0,001	0,013	0,019	0,018	0,74	1,47
1000	0,67	0,21	0,031	0,001	0,013	0,019	0,013	0,70	1,40
1250	0,46	0,04	0,031	0,000	0,013	0,019	0,011	0,46	0,92
1600	0,45	0,19	0,032	0,000	0,013	0,019	0,009	0,49	0,99
2000	0,54	0,11	0,032	0,000	0,013	0,019	0,007	0,55	1,10
2500	0,23	0,13	0,032	0,000	0,012	0,019	0,006	0,27	0,54
3150	0,56	0,18	0,033	0,000	0,012	0,019	0,005	0,59	1,17
4000	0,51	0,05	0,033	0,001	0,012	0,019	0,004	0,52	1,04
5000	0,40	0,16	0,033	0,001	0,012	0,019	0,003	0,43	0,86
6300	0,34	0,12	0,034	0,001	0,012	0,019	0,002	0,36	0,73
8000	0,44	0,14	0,034	0,001	0,012	0,019	0,002	0,47	0,94
10000	0,44	0,25	0,034	0,001	0,012	0,019	0,001	0,50	1,00

Tabela 5.24 - Valores do cálculo da incerteza do valor global de potência sonora em dB(A), câmara de 193 m³ nominal do LVA-UFSC, liquidificador sob teste, na velocidade 2, novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Correção curva "A" (dB)	L_{Wj} dB	c_j	$u_c(L_{Wj})$ (dB)	$c_j u_c$ (dB)	$(c_j u_c)^2$ (dB) ²	$1 / c_j$	
100	-19,1	47,14	0,000	1,68	0,000	0,0000	990358,2	
125	-16,1	62,42	0,000	3,02	0,000	0,0000	14727,2	
160	-13,4	58,07	0,000	1,30	0,000	0,0000	21513,9	
200	-10,9	63,01	0,000	1,41	0,000	0,0000	3879,2	
250	-8,6	81,75	0,033	1,72	0,056	0,0032	30,5	
315	-6,6	67,11	0,002	0,67	0,001	0,0000	560,6	
400	-4,8	70,27	0,006	0,60	0,003	0,0000	179,0	
500	-3,2	74,42	0,021	1,82	0,038	0,0015	47,7	
630	-1,9	71,22	0,014	0,74	0,010	0,0001	73,9	
800	-0,8	75,11	0,043	0,59	0,025	0,0006	23,4	
1000	0	80,13	0,163	0,69	0,112	0,0126	6,1	
1250	0,6	77,39	0,100	0,47	0,047	0,0022	10,0	
1600	1	80,80	0,240	0,37	0,089	0,0079	4,2	
2000	1,2	80,06	0,212	0,38	0,079	0,0063	4,7	
2500	1,3	74,65	0,062	0,91	0,057	0,0032	16,0	
3150	1,2	72,60	0,038	0,56	0,021	0,0005	26,3	
4000	1	71,48	0,028	1,16	0,032	0,0011	35,6	
5000	0,5	69,65	0,016	0,41	0,007	0,0000	61,0	
6300	-0,1	69,65	0,014	0,40	0,006	0,0000	70,0	
8000	-1,1	67,45	0,007	0,88	0,006	0,0000	146,4	
10000	-2,5	62,64	0,002	2,67	0,004	0,0000	610,7	
					$u_c(L_{WA})$	$U(L_{WA})$		
Global					0,20 dB(A)	0,40 dB(A)	k = 2,0	

Os coeficientes de sensibilidade c_j e incertezas padrão combinada do nível de potência sonora global, $u_c(L_{WA})$, mostrados nas Tabelas 5.24 e 5.25 foram calculados a partir das Equações 5.17 e 5.18, da Subseção 5.1.4.1. Pode-se observar nas Tabelas 5.24 e 5.25, que nas bandas de 1000 a 2000 Hz, por exemplo, os indicadores $1/c_j$ seguem um padrão similar de valores: {6,1; 10,0; 4,2; 4,7} e {6,5; 10,2; 3,7; 4,2}, porém na banda de 250 Hz ocorreu uma variação de aproximadamente o dobro entre os indicadores $1/c_j$; 30,5 relativo à câmara de 193 m³ e 58,8 relativo à câmara de 145 m³. Isto mostra que a ponderação exercida pelo coeficiente de sensibilidade c_j sobre as diversas bandas de terço de oitavas pode variar significativamente entre ensaios em câmaras reverberantes distintas. Sendo variável em função do nível do nível de potência sonora da banda de frequência (L_{Wj} em dB), do nível global (L_{WA} global) e da ponderação utilizada, neste caso a “curva de ponderação A”. Ver Equação 5.17 na Subseção 5.1.4.1.

A banda de 250 Hz teve o nível de potência sonora L_{Wj} mais elevado, 81,75 dB, dentre outras bandas, considerando o ensaio na câmara reverberante de 193 m³; ver Tabela 5.24. Se caso fosse considerados apenas os valores de dB, sem a ponderação “A”, a incerteza do L_{WA} global seria significativamente maior. Isto pode ser notado através dos valores apresentados e dos gráficos das figuras 76, 77, 78 e 79 a seguir.

Tabela 5.25 - Valores do cálculo da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), câmara de 145 m³ nominal do LVA-UFSC, liquidificador sob teste, na velocidade 2, novembro 2005.

Frequência central (Hz)	Correção curva "A" (dB)	L_{Wj} dB	c_j	$u_c(L_{Wj})$ (dB)	$c_j u_c$ (dB)	$\frac{(c_j u_c)^2}{(dB)^2}$	$1/c_j$
100	-19,1	42,99	0,000	1,16	0,000	0,0000	2347391,6
125	-16,1	54,71	0,000	1,93	0,000	0,0000	79055,3
160	-13,4	55,67	0,000	1,34	0,000	0,0000	34101,8
200	-10,9	61,13	0,000	1,83	0,000	0,0000	5448,0
250	-8,6	78,50	0,017	3,03	0,052	0,0027	58,8
315	-6,6	65,82	0,001	0,83	0,001	0,0000	687,6
400	-4,8	70,25	0,006	0,84	0,005	0,0000	163,9
500	-3,2	71,75	0,012	1,31	0,016	0,0003	80,3
630	-1,9	70,46	0,012	0,55	0,007	0,0000	80,0
800	-0,8	74,23	0,038	0,74	0,028	0,0008	26,1
1000	0	79,45	0,153	0,70	0,107	0,0115	6,5
1250	0,6	76,91	0,098	0,46	0,045	0,0020	10,2
1600	1	80,89	0,269	0,49	0,133	0,0176	3,7
2000	1,2	80,12	0,236	0,55	0,130	0,0169	4,2
2500	1,3	73,44	0,052	0,27	0,014	0,0002	19,3
3150	1,2	71,94	0,036	0,59	0,021	0,0004	27,9
4000	1	70,18	0,023	0,52	0,012	0,0001	43,8
5000	0,5	69,97	0,019	0,43	0,008	0,0001	51,6
6300	-0,1	69,98	0,017	0,36	0,006	0,0000	59,0
8000	-1,1	67,20	0,007	0,47	0,003	0,0000	141,2
10000	-2,5	62,23	0,002	0,50	0,001	0,0000	612,1
					$u_c(L_{WA})$	$U(L_{WA})$	
Global					0,230 dB(A)	0,46 dB(A)	$k = 2,0$

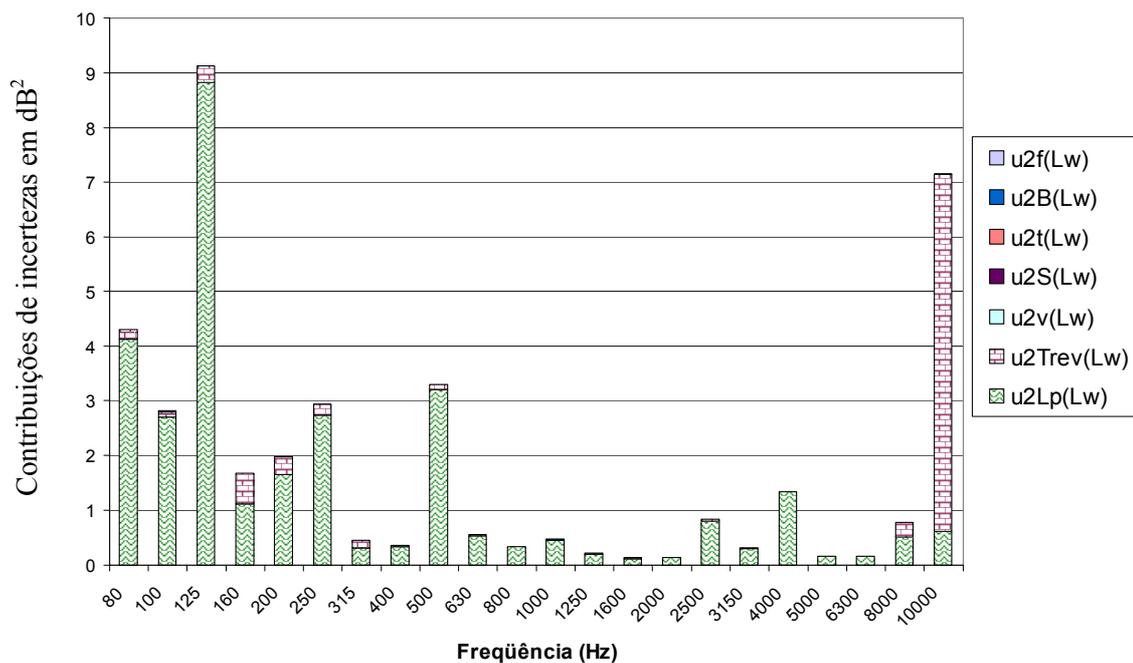


Figura 76 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para cada banda de terço de oitava. Liquidificador (na velocidade 2) ensaiado na câmara de 193 m^3 do LVA-UFSC.

Observando os gráficos das figuras 76 e 77 é possível perceber que há barras que representam as incertezas que sobressaem em baixas frequências, especialmente as bandas de 125, 250 e 500 Hz, dentre outras. Não se pode afirmar que haja presença de harmônicas, mesmo sendo frequências múltiplas. Nem que estas contribuições elevadas de incertezas estejam ligadas a alguma característica específica de cada câmara reverberante, dimensões da câmara, por exemplo. As incertezas destas bandas de frequências chegam a cerca de 3 dB e se tratando da escala decibel, que é logarítmica, variações desta ordem de grandeza têm características não-lineares. De fato, os valores nestes gráficos estão em decibel ao quadrado para demonstrar, através de comparação entre gráficos, o impacto da ponderação proporcionada pelo coeficiente de sensibilidade c_j . Comparando-se, por exemplo, os gráficos das figuras 76 e 78, pode-se notar que as bandas de maiores níveis de potência sonora: 1000, 1600 e 2000 Hz produziram contribuições predominantes para a incerteza do nível de potência sonora global, L_{WA} em dB(A) .

De forma similar ao que foi apresentado na análise de incertezas das outras fontes sonoras, fonte Vibranihil e secador de cabelo, nos gráficos cada banda de terço de oitava é representada por uma barra composta de contribuições de incertezas, onde predominaram as fontes de incertezas de medição de níveis de pressão sonora u_{Lp}^2 , e dos tempos de reverberação u_{Trev}^2 . Contribuições em decibel ao quadrado.

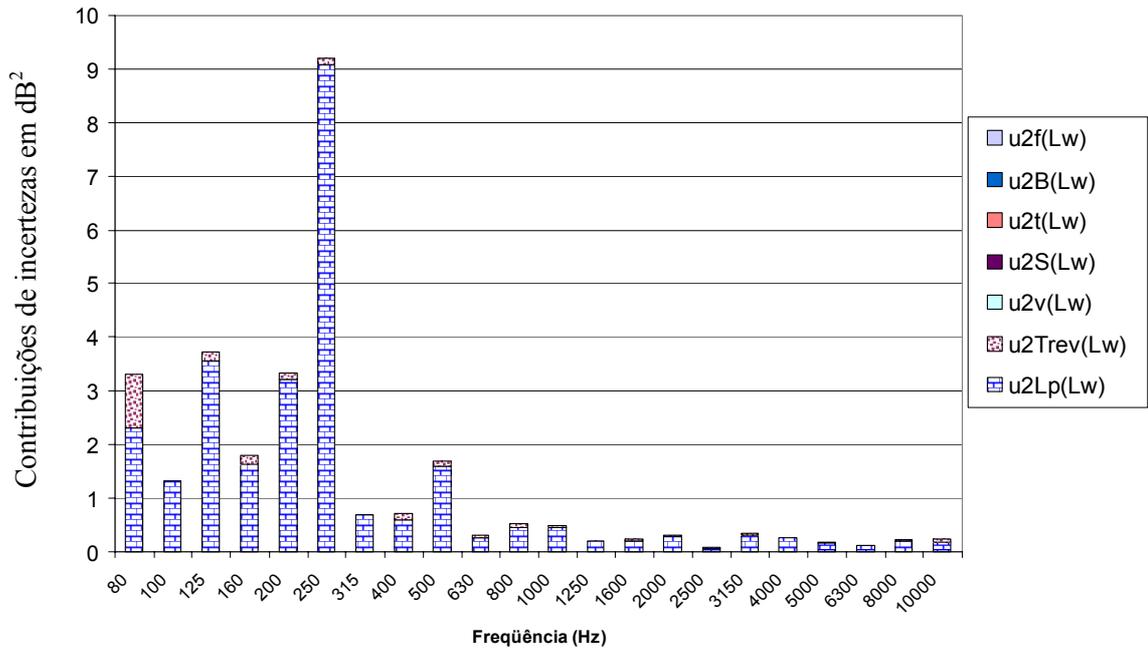


Figura 77 - Gráfico de barras. Incertezas padrão combinadas ao quadrado u_c^2 , em dB^2 , calculadas para cada banda de terço de oitava. Liquidificador (na velocidade 2) ensaiado na câmara de $145\ m^3$ do LVA-UFSC.

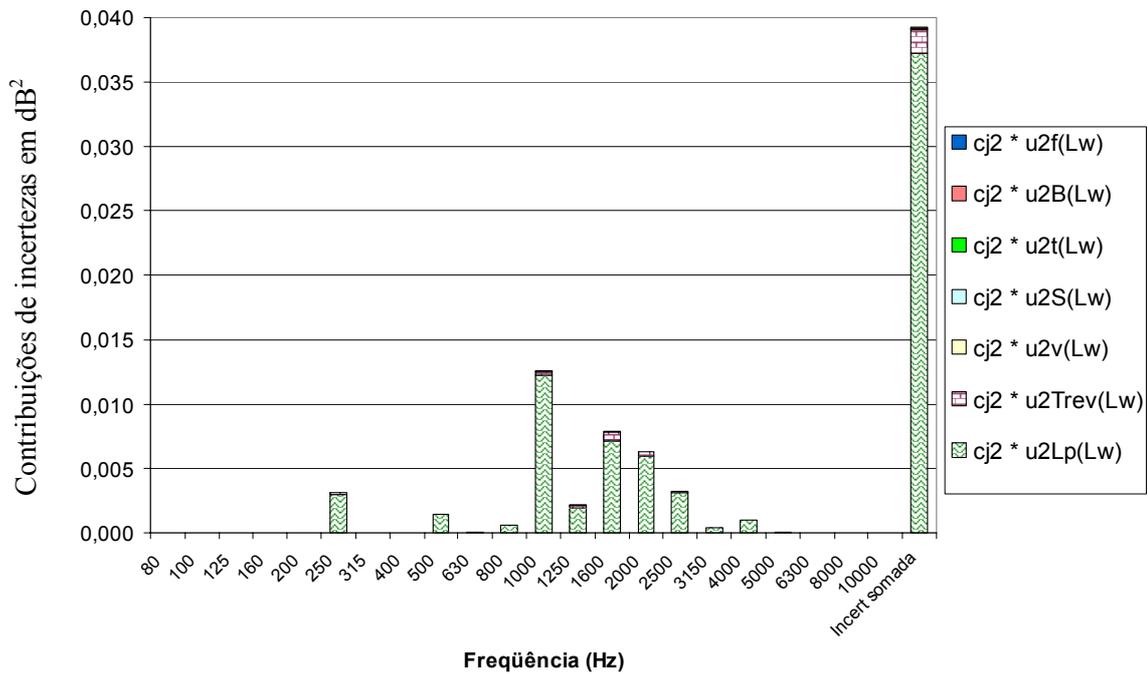


Figura 78 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em $dB(A)$. Liquidificador (na velocidade 2) sob teste na câmara reverberante de $193\ m^3$ do LVA-UFSC.

Outras fontes de incertezas não aparecem nos gráficos porque têm valores muito pequenos diante das incertezas predominantes. Apenas aparecem as barras que representam as incertezas relacionadas com os níveis de pressão sonora, legendadas por “u2Lp(Lw)” ou por

“ $cj2 * u2Lp(Lw)$ ”, e incertezas relacionadas com os tempos de reverberação legendadas por “ $u2Trev(Lw)$ ” ou por “ $cj2 * u2Trev(Lw)$ ”.

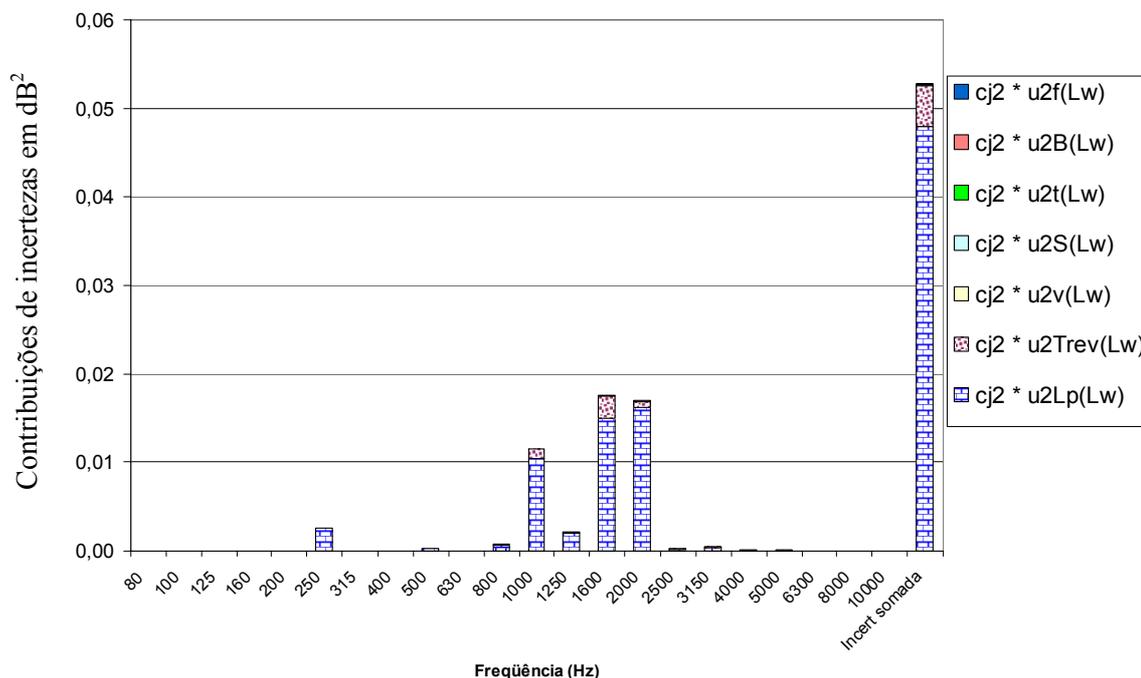


Figura 79 - Gráfico de barras. Contribuições de incertezas de cada banda de terço de oitava para a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). Liquidificador, na velocidade 2 (máxima), sob teste na câmara reverberante de 145 m³ do LVA-UFSC.

Novamente é possível perceber a grande influência das características do espectro sonoro do aparelho sob teste no balanço de incertezas e na incerteza do nível de potência sonora global. Principalmente quando a fonte sonora emite energia sonora concentrada predominantemente em uma banda de frequência, ou em poucas bandas.

5.3.3 Análise comparativa geral dos resultados, liquidificador

Com objetivo de fazer uma comparação geral dos resultados obtidos nos ensaios de potência sonora com o liquidificador, foi elaborado o gráfico da Figura 80, onde foram plotadas barras com os valores dos níveis de potência sonora em dB e em dB(A), e barras de erros que representam as incertezas calculadas. Pode-se concluir que os resultados obtidos experimentalmente tiveram boa concordância e que há conformidade entre estes os valores globais em dB e dB(A), $L_{Wglobal}$ e L_{WA_global} . Isto em função da observação do alcance das barras de erros relativas aos resultados de ambas as câmaras, câmara 1 e 2, na Figura 80.

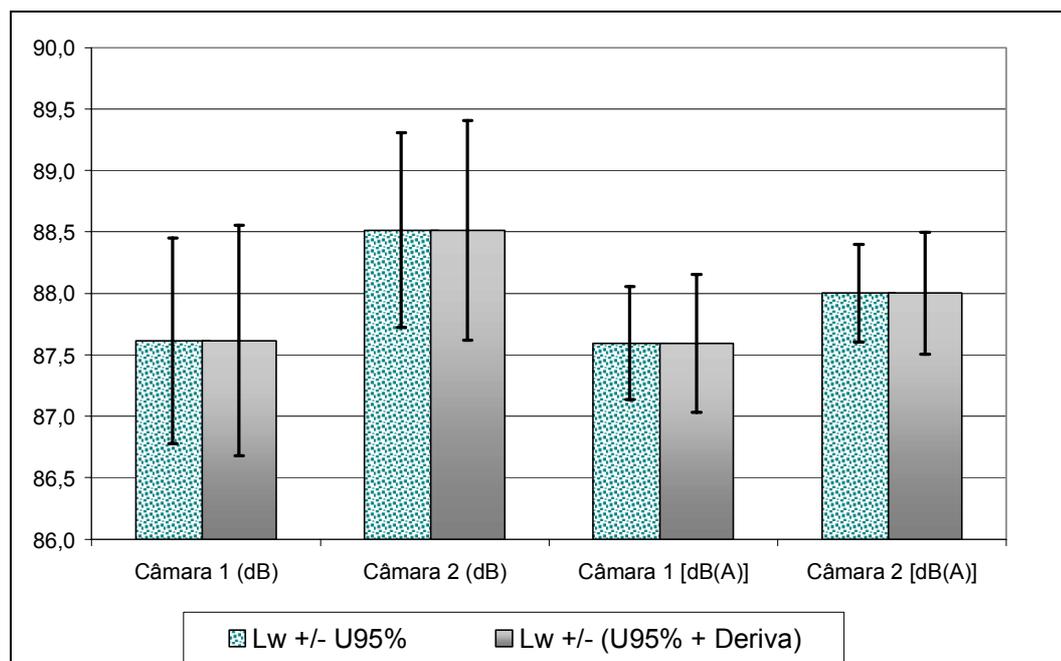


Figura 80 - Gráfico comparativo entre resultados obtidos com **liquidificador** (velocidade máxima) sob teste nas câmaras reverberantes de 145 m³ e 193 m³ do LVA-UFSC (Câmara 1 e 2). Níveis de potência sonora globais em dB e dB(A), e barras de erros representando as incertezas calculadas.

As incertezas calculadas para L_w em dB, sem ponderação da curva “A”, obtidos com o liquidificador nas câmaras 1 e 2 do LVA-UFSC foram usadas para plotar as barras de erros no gráfico da Figura 80 nas classes denominadas “Câmara 1 (dB)” e “Câmara 2 (dB)”. Os valores destas incertezas são: 0,84 dB, 0,94 dB, 0,80 dB e 0,90 dB, respectivamente.

A análise numérica de conformidade dos resultados em bandas de terço de oitavas é dada na Tabela 5.26, onde em cada banda de frequência as incertezas referentes às medições em ambas as câmaras foi somada e comparada com as diferenças dos resultados provenientes de cada câmara reverberante. É um tipo de análise simplificada que não considera a existência de zonas duvidosas em relação à avaliação da conformidade, resultando somente em *conformidade* ou *não-conformidade*.

Tabela 5.26 - Análise da conformidade dos resultados das medições com liquidificador, nas velocidades 1 e 2. Incertezas expandidas, $U_{95\%}$, de ambas as câmaras reverberantes foram somadas para avaliar a conformidade dos valores obtidos, em cada banda de terço de oitava e dos valores globais em dB(A).

Frequência central da banda (Hz)	Velocidade 2	Velocidade 1		Velocidade 2	
	Soma das incertezas expandidas $U_{95\%}$	Diferença entre valores medidos nas duas câmaras reverberantes	Análise dos resultados	Diferença entre valores medidos nas duas câmaras reverberantes	Análise dos resultados
100	5,67	-5,83	Não-conformidade	-4,16	Conformidade
125	9,90	-2,60	Conformidade	-7,71	Conformidade
160	5,27	-1,53	Conformidade	-2,41	Conformidade
200	6,48	-2,82	Conformidade	-1,88	Conformidade
250	9,50	-3,90	Conformidade	-3,25	Conformidade
315	3,02	-0,76	Conformidade	-1,29	Conformidade
400	2,90	0,75	Conformidade	-0,02	Conformidade
500	6,25	-1,23	Conformidade	-2,67	Conformidade
630	2,59	-1,57	Conformidade	-0,76	Conformidade
800	2,65	-0,35	Conformidade	-0,88	Conformidade
1000	2,77	-0,62	Conformidade	-0,69	Conformidade
1250	1,86	-0,58	Conformidade	-0,48	Conformidade
1600	1,73	0,43	Conformidade	0,09	Conformidade
2000	1,85	-0,06	Conformidade	0,06	Conformidade
2500	2,37	-1,07	Conformidade	-1,22	Conformidade
3150	2,29	-0,54	Conformidade	-0,66	Conformidade
4000	3,35	-1,09	Conformidade	-1,30	Conformidade
5000	1,69	0,27	Conformidade	0,32	Conformidade
6300	1,53	0,31	Conformidade	0,33	Conformidade
8000	2,68	0,00	Conformidade	-0,25	Conformidade
10000	6,25	-0,04	Conformidade	-0,42	Conformidade
Global	0,83	-0,33	Conformidade	-0,41	Conformidade
Considerando deriva do calibrador *	1,03	-0,33	Conformidade	-0,41	Conformidade

* Deriva do calibrador de nível sonoro estimada em 0,10 dB

Obs.: Valores das somas de incertezas e das diferenças entre medições em decibéis, dB.
Não foram estimadas as incertezas associadas aos ensaios com liquidificador em velocidade 1.

Com relação às somas de incertezas, obtidas em ambas as câmaras reverberantes e com liquidificador em *velocidade 2*, que são apresentadas na segunda coluna da Tabela 5.26, ocorreram valores muito elevados nas bandas de 125 e 250 Hz; valores da ordem de 10 dB. Isto indica um baixo desempenho metrológico das medições de níveis de pressão sonora em baixas frequências quando foi ensaiado o liquidificador. O qual pode ter apresentado variações de emissão sonora inerentes ao próprio funcionamento do aparelho (principalmente quando era ligado e desligado durante a bateria de testes) e/ou presença forte de tons discretos que prejudicam o desempenho das câmaras reverberantes; prejudicam a difusividade do campo sonoro dentro deste tipo de câmaras.

As não-conformidades em baixas frequências foram atribuídas aos baixos níveis de pressão sonora gerados pelo liquidificador dentro da câmara reverberante. Como os níveis de

potência sonora, L_W , são diretamente proporcionais¹⁹⁴ aos níveis de pressão sonora, L_p , quando são encontrados valores baixos destas grandezas, devido ao espectro sonoro da fontes sob teste, a não-conformidade será devida aos ruídos de fundo acústico e/ou eletrônico da instrumentação de medição. Ou seja, quando os L_p obtidos experimentalmente são baixos¹⁹⁵ é mais provável que ocorram não-conformidades em testes comparativos como o apresentado na Tabela 5.26.

Em resumo, os resultados de L_{WA} globais com as incertezas associadas dos ensaios com liquidificador foram:

- $88,00 \pm 0,40$ dB(A) obtido na câmara de 193 m^3 , e $87,59 \pm 0,43$ dB(A) obtido na câmara de 145 m^3 (sem considerar a incerteza inerente à deriva do calibrador de nível sonoro);
- $88,00 \pm 0,50$ dB(A) obtido na câmara de 193 m^3 , e $87,59 \pm 0,53$ dB(A) obtido na câmara de 145 m^3 (considerando a incerteza inerente à deriva do calibrador de nível sonoro);
- arredondando para apenas uma casa decimal: $88,0 \pm 0,5$ dB(A) na câmara de 193 m^3 , e $87,6 \pm 0,6$ dB(A) na câmara de 145 m^3 (considerando a incerteza inerente à deriva do calibrador de nível sonoro).

Também é possível estipular valor de incerteza(s) através da observação do gráfico da Figura 80. Procurando dar um valor único de estimativa do resultado; um valor generalizado e com incerteza associada estimada grosseiramente. Observando a Figura 80, o valor médio é de aproximadamente $87,8$ dB(A), assim pode-se estipular um valor geral destas medições em $87,8$ dB(A) com incerteza entre $0,6$ e $0,7$ dB(A), com o objetivo de englobar os dois resultados experimentais e os respectivos cálculos de incertezas.

5.4 Análise das incertezas de medição calculadas

Ao se observarem os resultados dos cálculos de incertezas dos aparelhos ensaiados nas câmaras reverberantes do LVA-UFSC, conclui-se que houve variações

¹⁹⁴ Exceto pelas parcelas referentes ao tempo de reverberação e correções de absorção do ar (de Vorländer) e correções de Waterhouse, de temperatura e pressão barométrica; em cada banda de frequência, que em condições de repetitividade pode-se considerar como constantes. Então L_W e L_p podem ser considerados “grandezas afins”; que variam na mesma proporção. Ver Equações 5.4 e 5.5, na Subseção 5.1.1.

¹⁹⁵ Nível de pressão sonora baixo em relação ao ruído de fundo, na banda de frequência em questão, significa que a diferença entre o nível medido e o ruído de fundo é **menor que** 15 dB aproximadamente.

relativamente pequenas entre as incertezas relacionadas ao mesmo aparelho sob teste. O melhor exemplo disto foram as incertezas dos ensaios com a fonte sonora Vibranihil, porque ambas ficaram em 0,30 dB(A) aproximadamente¹⁹⁶. Porém os resultados experimentais dos quatro ensaios, dois deles em câmara semi-anecóica, apresentaram diferenças maiores, da ordem de 1,5 dB(A), ver Figura 69, na Subseção 5.1.5. As incertezas estimadas para os ensaios com secador de cabelo e liquidificador na câmara reverberante de 145 m³, 1,00 dB(A) e 0,53 dB(A), respectivamente¹⁹⁷, foram ligeiramente maiores que as incertezas encontradas para a câmara reverberante de 193 m³ com os mesmos aparelhos; 0,68 dB(A) e 0,50 dB(A), respectivamente¹⁹⁸.

A partir dos valores citados, conclui-se que houve algumas diferenças significativas entre as incertezas calculadas, e que isto ocorreu devido às diferentes características dos aparelhos sob teste. Houve uma relação de dependência entre o desempenho metrológico e as características do espectro da fonte sonora. E tendo em vista que ocorreram incertezas altas em bandas de baixas frequências, para ambas as câmaras, concluí-se que é importante procurar melhorar o desempenho metrológico das medições principalmente visando fontes sonoras com energia sonora predominante em baixas frequências.

Também é interessante ressaltar a boa concordância entre os resultados e incertezas obtidas com o liquidificador¹⁹⁹, nos quais foram obtidos valores todos da ordem de 0,40 dB(A), tanto de diferenças entre os dois L_{WA} experimentais quanto para as incertezas expandidas²⁰⁰.

¹⁹⁶ Considerando a deriva do calibrador de nível sonoro.

¹⁹⁷ Idem.

¹⁹⁸ Idem.

¹⁹⁹ Apesar dos problemas em baixas frequências (banda de 250 Hz), onde ocorreram variações grandes dos L_p medidos.

²⁰⁰ Incertezas que não consideram a deriva do calibrador de nível sonoro no seu cálculo.

Capítulo 6

Os modelos de cálculos de incertezas

Este capítulo trata de assuntos relacionados com os modelos de cálculos de incertezas das determinações de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo **método direto** e **método da comparação**²⁰¹. As incertezas da cadeia de medição são comentadas e seus valores estimados, ver Tabela 6.1.

É apresentada uma verificação da curva de resposta do analisador Pulse 3560-C, a qual demonstra a **rastreabilidade** necessária para que as medições sejam válidas nas diversas bandas de frequências.

Na Subseção 6.2 é apresentado e discutido o modelo de cálculo de incertezas (método da comparação) proposto por COSTA-FÉLIX (2000), além de ser analisada a questão da correlação entre as bandas de terço de oitava em função das afirmações de (BESSAC e BLANQUART, 2005), COSTA-FÉLIX (2000) e do ISO GUIA (2003). Na seqüência são apresentadas investigações sobre dois métodos para estimar incertezas em laboratórios de ensaios (BLANQUART, 2005); se é possível achar indícios de correlações em bandas de terço de oitava em resultados experimentais através de um parâmetro que foi chamado $u_c(L_{WA_R})$; os coeficientes de sensibilidade com suas validações e características; aplicação de dois métodos de combinações de incertezas e seus resultados com base em valores experimentais, (somente com fonte sonora BK 4204).

²⁰¹ Comparação com fonte sonora de referência, métodos dados nas normas ISO 3741 e ISO 3743-1.

6.1 As fontes de incertezas

A determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto, na verdade, é um *processo de medição indireto* porque tem diversas grandezas de entrada. Desta forma, a questão de definir como as grandezas de influência podem atuar sobre os resultados deste tipo de medição torna-se complexa. Por exemplo, a temperatura pode influenciar no comportamento metrológico dos diversos equipamentos da cadeia de medição, tais como calibrador de nível sonoro, microfone, pré-amplificador, analisador de sinais. Tem-se que a temperatura ambiente pode diferir das temperaturas internas de determinados equipamentos, tornando mais difícil a tarefa de especificar como se comporta a influência das variações das temperaturas e a quantificação destas influências. Além disto, a velocidade do som no ar é função da temperatura, dentre outros parâmetros, o que pode influenciar o campo sonoro dentro de câmaras reverberantes.

As fontes de incertezas que podem ser citadas, neste processo de medição, podem ser classificadas conforme o dispositivo a que estão relacionadas:

Calibrador de nível sonoro: incerteza herdada (relativa ao valor declarado no certificado de calibração), variações de temperatura e pressão atmosférica, deriva (variações sistemáticas que ocorrem com o passar do tempo no valor do nível de pressão sonora gerado pelo calibrador), influência da umidade relativa do ar.

Microfone de medição capacitivo (de meia polegada): influências da temperatura ambiente, da pressão atmosférica, da umidade relativa do ar; deriva relacionada com a membrana metálica (elemento sensor), deriva do material polarizado (do microfone pré-polarizado), erros de linearidade do microfone, efeito da presença da grade de proteção. Além disto, há incertezas inerentes à calibração do microfone. Desta forma, as **correções de resposta do(s) microfone(s)**²⁰² em função do campo sonoro, ou considerações que levam a não utilizar as correções de resposta do microfone podem agregar incertezas ao processo de medição. As incertezas tendem a aumentar quando não se utilizam as correções de resposta de determinado microfone de medição.

Pré-amplificador de medição: influências da temperatura, erro de linearidade; a incerteza herdada (certificado de calibração) é da ordem de 0,02 dB. Estas incertezas foram desconsideradas nos balanços de incertezas destas investigações.

²⁰² As correções de resposta de microfones de medição são provenientes da calibração do microfone, que podem ser em campo sonoro de pressão, campo livre, ou campo difuso.

Analisador dinâmico de sinais com filtros de bandas de terço de oitavas: incerteza herdada (certificado de calibração), variações da temperatura ambiente e interna, umidade relativa do ar, resolução dos valores lidos no dispositivo mostrador, erros de linearidade. O analisador também avalia as curvas de decaimentos do método da interrupção de ruído para obtenção dos **tempos de reverberação**.

Cabo de conexão coaxial entre pré-amplificador e analisador de sinais: podem haver tensões elétricas geradas por efeitos termoelétricos (efeito termoelétrico de Peltier, termoelétricidade), isto devido a diferenças de temperaturas entre as conexões de metais diferentes.

A distribuição do **campo sonoro** dentro da câmara reverberante (**difusividade** do campo sonoro): as medições são efetuadas em vários pontos dentro da câmara para obter valores médios de níveis de pressão sonora, isto porque o campo sonoro não é plenamente difuso (pressão sonora igualmente distribuída em todas as posições). O **posicionamento do(s) microfone(s)** e da **fonte sonora sob teste** no espaço delimitado pelas condições da norma ISO 3741 (1999) acrescenta incertezas muito significativas nos resultados de níveis de potência sonora. Isto porque as medições de níveis de pressão sonora, e as medições de tempos de reverberação, têm resultados que variam significativamente em função das **posições de microfone(s) e de fonte sonora**.

O comportamento da fonte sonora, variações do nível de potência sonora gerado pela fonte sonora sob teste podem ocorrer em função de grandezas de influência alheias às condições da cadeia de medição e do desempenho da câmara reverberante utilizada. Por exemplo, pode haver variação na velocidade de rotação da fonte sonora fonte BK 4204 em função da rede elétrica de alimentação, o que induz variação no nível de potência sonora gerado.

Na Tabela 6.1, são apresentadas as fontes de incertezas Tipo B utilizadas neste trabalho. São estimativas que podem ser re-estudadas (repensadas) para obter balanços de incertezas ainda mais refinados. Principalmente as questões de incertezas de calibração de microfones em campo sonoro difuso têm apresentado dificuldades no que tange a valores para aplicação prática. As incertezas atribuídas a pré-amplificadores e condicionadores de sinais foram desconsideradas devido aos valores relativamente baixos.

As incertezas Tipo A, provenientes dos experimentos e estimativas de outros parâmetros, são apresentadas ao longo dos Capítulos 4 e 5.

Tabela 6.1 - Valores de fontes de incertezas (Tipo B) relacionadas com os equipamentos das cadeias de medição utilizados no LVA-UFSC e no LAENA-INMETRO. Estimativas foram usadas nos balanços de incertezas desenvolvidos nos Capítulos 4 e 5.

Símbolo	Fonte de incerteza	Incerteza estimada (dB)	Divisor	Incerteza padrão (dB)
u_{cal}	Calibrador sonoro: modelos GRAS 42AB e LD CAL 250 (LVA-UFSC)	0,11	2,07	0,0531
u_{cal}	Calibrador sonoro BK4231 (LAENA INMETRO)	0,1	2,0	0,05
u_{mic}	Microfones GRAS 40AE (LVA-UFSC)	0,2 ^(a) 0,3 ^(b)	$\sqrt{3}$	0,116 ^(a) 0,173 ^(b)
u_{corr}	Incerteza atribuída à correção do microfone	***	***	***
u_{mic}	Microfones BK 4134 (LAENA-INMETRO)	0,05 ^(c) 0,07 ^(d) 0,12 ^(e)	2,0	0,025 ^(c) 0,035 ^(d) 0,060 ^(e)
u_{corr}	Incerteza atribuída à correção do microfone	0,04	2,0	0,02
$u_{pré}$	Pré-amplificadores e condicionadores de sinais	***	***	***
$u_{analisador}$	Analisador: Pulse 3560-C e Larson Davis 824 (LVA-UFSC)	0,2	$\sqrt{3}$	0,116
$u_{analisador}$	Analisador: Norsonic 840 (LAENA-INMETRO)	0,2	2,0	0,1
u_{ccm}	Incerteza padrão da cadeia de medição (LVA-UFSC)			0,172 ^(a) 0,215 ^(b)
	Sem computar u_{cal}			0,163 ^(a) 0,208 ^(b)
u_{ccm}	Incerteza padrão da cadeia de medição (LAENA-INMETRO)			0,116 ^(c) 0,119 ^(d) 0,128 ^(e)
	Sem computar u_{cal}			0,105 ^(c) 0,108 ^(d) 0,118 ^(e)

Obs: ^(a) 100 Hz a 5 kHz, ^(b) 6,3 a 10 kHz; ^(c) 100 Hz a 1600 Hz, ^(d) 2 a 3,15 kHz, ^(e) 4 a 10 kHz.

Os símbolos na primeira coluna são das incertezas padrão.

As incertezas quantificadas na Tabela 6.1 são função das bandas de terço de oitava, por isto são apresentados dois ou três valores de incertezas para u_{mic} e u_{ccm} . Algumas incertezas são generalizadas com o mesmo valor para todas as bandas de frequência. Também se pode notar, na Tabela 6.1, que a incerteza padrão da cadeia de medição u_{ccm} é calculada de duas formas distintas, uma que considera a *incerteza padrão atribuída ao calibrador de nível sonoro* u_{cal} , e outra que não computa u_{cal} . Isto é explicado na Subseção 6.4 que trata dos procedimentos de combinações de incertezas e correlações entre as bandas de terço de oitava.

Os valores mostrados na terceira coluna da Tabela 6.1, “Incerteza estimada”, foram obtidos de institutos metrológicos, de certificados de calibração de equipamentos, e através de comunicação com especialista na área de calibração de microfones (SOARES, 2005). Alguns dos valores são o mínimo que se deve atribuir como incerteza de determinado equipamento de medição, por isto os valores podem (e deverão) mudar em cada caso de aplicação deste tipo de balanço de incertezas. Na verdade, atualmente as questões relativas à quantificação das incertezas de calibração de microfones ainda estão em desenvolvimento e discussão (SOARES, 2005).

O analisador Larson Davis 824 foi usado em uma das medições na câmara semi-anecóica, em algumas das medições em câmaras reverberantes para comparação de resultados, e uma comparação com o analisador Pulse 3560-C através de sinais elétricos (conexão direta). Esta última para verificar a resposta em frequência do analisador Pulse 3560-C. De fato, a resolução do analisador Larson Davis 824 é de 0,1 dB, sendo que a incerteza declarada no certificado de calibração do mesmo já inclui esta resolução²⁰³. Porém, no momento de usar o analisador a resolução tem influência sobre os valores obtidos, e assim, deverá ser contabilizada novamente no cálculo de incerteza. De qualquer forma, a resolução usada na maioria dos testes realizados no contexto deste trabalho foi de 0,01 dB, e a incerteza inerente a esta resolução não foi computada nos cálculos de incertezas por ser desprezível.

Foram feitos testes usando dois analisadores de sinais LVA-UFSC, nos quais o analisador Pulse 3560-C foi usado como gerador de sinais. Os sinais elétricos foram medidos simultaneamente pelos dois analisadores para verificação da resposta em frequência e linearidade do analisador Pulse 3560-C. O teste de linearidade é reportado através dos valores na Tabela 6.2.

²⁰³ Conforme comunicação com LAETA-INMETRO.

Tabela 6.2 - Resultados de teste comparativo entre analisadores de sinais Brüel & Kjær Pulse 3560-C e Larson Davis 824 (LVA-UFSC). Teste de linearidade com sinais elétricos entre 1 e 256 mV_{rms}.

Pulse 3560-C Gerador de sinais (mV _{rms})	Pulse 3560-C canal 1 (dB re 1 V _{rms})	Pulse 3560-C canal 2 (dB re 1 V _{rms})	Larson Davis 824 (dB)	Desvios relativos Canal 1 (dB)	Desvios relativos Canal 2 (dB)
1	-60,2	-60,4	62,0	122,2	122,4
2	-54,1	-54,1	68,0	122,1	122,1
4	-48,0	-48,1	74,1	122,1	122,2
8	-42,0	-42,0	80,1	122,1	122,1
16	-36,0	-36,0	86,1	122,1	122,1
32	-30,0	-30,0	92,1	122,1	122,1
64	-24,0	-24,0	98,2	122,2	122,2
128	-18,0	-18,0	104,2	122,2	122,2
256	-11,9	-11,9	110,2	122,1	122,1

6.2 Modelo de cálculo de incertezas baseado no ISO GUM

De acordo com COSTA-FÉLIX (2000), pode se usar o método de avaliação de incertezas estabelecido no ISO GUM (2003) para obter um modelo de cálculo de incertezas da determinação de níveis de potência sonora pelo método da comparação em câmaras reverberantes. Método descrito nas normas ISO 3741 (1999) e ISO 3743-1 (1994), com algumas diferenças entre si. Para implementar o modelo de cálculo de incertezas, COSTA-FÉLIX (2000) usou da aplicação da lei de propagação de incertezas dada através da Equação 6.5, que é uma maneira de combinar incertezas não-correlacionadas segundo o ISO GUM (2003). COSTA-FÉLIX utilizou este modelo para calcular incertezas de níveis de potência sonora de liquidificadores testados no LAENA-INMETRO.

Tanto o método direto quanto o método da comparação são estabelecidos na norma ISO 3741. Porém seus princípios de medição diferem e, portanto a realização do mensurando não é a mesma. O método da comparação de determinação de níveis de potência sonora é baseado na Equação 6.1, onde L_{Wi} é o nível de potência sonora da i -ésima banda de oitava ou terço de oitava, L_{Wfi} é o nível de potência sonora da fonte sonora de referência utilizada (também por bandas de oitava ou terço de oitava), L_{Pi} é o nível de pressão sonora gerado pela fonte sob teste e L_{Pfi} é o nível de pressão sonora gerado pela fonte sonora de referência, na i -ésima banda de oitava ou terço de oitava.

$$L_{Wi} = L_{Wfi} + (L_{Pi} - L_{Pfi}) \quad (6.1)$$

COSTA-FÉLIX (2000) inclui o termo δ_{DP} relativo à medição do nível de pressão sonora L_{Pi} para representar a contribuição da *não difusividade do campo acústico no cálculo da incerteza total*, ver Equação 6.2. Pois L_{Pi} é obtido através de j posições de microfone(s) na câmara reverberante, segundo estabelecido em norma.

$$L_{Pi} = 10 \cdot \log \left[\left(\sum_{j=1}^{N_{mic}} 10^{L_{PiMj}/10} \right) \cdot \frac{1}{N_{mic}} \right] + \delta_{DP} \quad (6.2)$$

Segundo COSTA-FÉLIX, δ_{DP} tem valor nulo, e uma incerteza associada que pode ser estimada pelo desvio padrão da média espacial entre os L_p obtidos em cada posição de microfone(s), simbolizado por σ_p . Este último é equivalente ao desvio padrão dos níveis de pressão sonora dividido por $\sqrt{N_{mic}}$, que é a raiz quadrada do número de posições de microfone(s) utilizadas no ensaio. As mesmas considerações são feitas para as medições com a fonte sonora de referência, através da Equação 6.3, e do desvio padrão da média espacial dos L_p obtidos com a fonte sonora de referência denominado σ_{Pf} .

$$L_{Pfi} = 10 \cdot \log \left[\left(\sum_{j=1}^{N_{mic}} 10^{L_{PiMj}/10} \right) \cdot \frac{1}{N_{mic}} \right] + \delta_{DPf} \quad (6.3)$$

$$L_{WA} = 10 \cdot \log \left(\sum_{i_{min}}^{i_{max}} 10^{(L_{wi} + A_i)/10} \right) + \delta_C \quad (6.4)$$

$$u_c^2 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \right)^2 \cdot u_k^2 \quad (6.5)$$

A Equação 6.4 representa o nível de potência sonora global em dB(A), L_{WA} , obtido através do somatório de energia sonora das i bandas de terço de oitava, ou terço de oitava. A partir da aplicação da Equação 6.5 na Equação 6.4 COSTA-FÉLIX (2000) forneceu a Equação 6.6. Considerando que δ_C tem valor nulo (apenas representa a contribuição de incerteza de arredondamento), e que Δc é o arredondamento do nível de potência sonora global L_{WA} em função do número de casas decimais em que é apresentado o valor numérico.

$$u_{WA}^2 = \frac{\sum_{i_{min}}^{i_{max}} \left[\left(10^{(L_{wi} + A_i)/10} \right) \cdot u_i \right]^2}{\left(10^{L_{WA}/10} \right)^2} + \frac{(\Delta c)^2}{12} \quad (6.6)$$

Ao se deduzir a Equação 6.6, apresentada por COSTA-FÉLIX (2000), pode-se obter uma forma mais compacta dada pela Equação 6.7, na qual é mais fácil perceber a afirmação de (BESSAC e BLANQUART, 2005), e que foi diversas vezes constatada neste trabalho de tese²⁰⁴, que a incerteza do nível de potência global é fortemente influenciada por incertezas das bandas com mais energia sonora. Note-se que na Equação 6.7 o coeficiente de sensibilidade é dado por $\left(10^{(L_{W_i}-L_{WA}+A_i)/10}\right)^2$ sendo que com L_{W_i} relativamente menores o valor do i -ésimo coeficiente de sensibilidade será menor. Portanto, bandas com pouca energia sonora, baixo nível de potência sonora, têm pouca influência na incerteza do nível de potência sonora global; L_{WA} . Por outro lado, bandas com mais energia sonora contribuem fortemente no cálculo da incerteza de L_{WA} .

$$u_{WA}^2 = \sum_{i=i_{\min}}^{i_{\max}} \left[\left(10^{(L_{W_i}-L_{WA}+A_i)/10} \right) \cdot u_i \right]^2 + \frac{(\Delta c)^2}{12} \quad (6.7)$$

Para estabelecer a avaliação de incerteza de cada (i -ésima) banda de oitava ou de terço de oitava, u_i , COSTA-FÉLIX (2000) considera que os valores (padronizados) da “curva de ponderação A” agregam incertezas ao modelo de cálculo de níveis de potência sonora. Isto é representado pela Equação 6.8, na qual u_{A_i} é considerada a incerteza atribuída a cada i -ésimo valor de ponderação da “curva A”. Neste trabalho **não** se aplicou tal princípio, pois os valores de ponderação são normalizados, ou seja, sempre se usam exatamente os mesmos valores em todo ensaio que necessite ponderação da “curva A”. Concluindo que a “ponderação A” **não** acrescenta incertezas, pelo menos neste caso.

$$u_i^2 = u_{W_i}^2 + u_{A_i}^2 \quad (6.8)$$

De acordo com COSTA-FÉLIX (2000), a incerteza da “ponderação A” é dada pela Equação 6.9, pois tem distribuição retangular. E a incerteza padrão u_{W_i} apresentada na Equação 6.8 é calculada através da Equação 6.10, que inclui incertezas padrão da potência sonora da fonte de referência $u_{W_{fi}}$, e dos níveis de pressão sonora medidos com a fonte sonora de referência e da fonte sonora sob teste, $u_{P_{fi}}$ e u_{P_i} , respectivamente. A Equação 6.10 é resultado da aplicação da lei de propagação de incertezas do ISO GUM (2003), Equação 6.5 na Equação 6.1.

$$u_{A_i}^2 = \frac{(\Delta a)^2}{12} \quad (6.9)$$

²⁰⁴ Investigações teóricas e experimentais nos Capítulos 4 e 5.

$$u_{Wi}^2 = u_{Wfi}^2 + u_{Pi}^2 + u_{Pfi}^2 \quad (6.10)$$

A incerteza padrão u_{Pi} é dada na Equação 6.11, para a i -ésima banda de terço de oitava e para a j -ésima posição de microfone(s) (COSTA-FÉLIX 2000). Esta equação é o resultado da aplicação da Equação 6.5 na Equação 6.2. A incerteza u_{Pfi} é dada por procedimento e equação similares à u_{Pi} , pois se trata também de medição de níveis de pressão sonora.

$$u_{Pi}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_{mic}} \left[\left(10^{L_{PiMj}/10} \right) \cdot u_{PiMj} \right]^2}{\left(N_{mic} \cdot 10^{L_{Pi}/10} \right)^2} + \sigma_P^2 \quad (6.11)$$

A Equação 6.11 foi obtida através da lei de propagação de incertezas do ISO GUM (2003), exceto o último termo à direita. A forma apresentada por COSTA-FÉLIX foi deduzida através de regras matemáticas até chegar a Equação 6.12. Além disto, se os níveis de pressão sonoras L_{PiMj} e a sua média energética L_{Pi} forem considerados praticamente iguais, a Equação 6.12 pode ser transformada na Equação 6.13.

$$u_{Pi}^2 = \sum_{j=1}^{N_{mic}} \left[\left(\frac{1}{N_{mic}} \cdot 10^{(L_{PiMj} - L_{Pi})/10} \right) \cdot u_{PiMj} \right]^2 + \sigma_P^2 \quad (6.12)$$

$$u_{Pi}^2 = \sum_{j=1}^{N_{mic}} \left(\frac{u_{PiMj}}{N_{mic}} \right)^2 + \sigma_P^2 \quad (6.13)$$

Neste trabalho de tese **não** foi usado o princípio de propagação de incertezas nas medições feitas em diversas (N_{mic}) posições de microfone(s) da mesma forma que foi dado por COSTA-FÉLIX (2000) através das Equações 6.11, 6.12 e 6.13. A estatística utilizada, nestes casos, foi o desvio padrão experimental dos L_p medidos nas posições aleatórias de microfone(s). Isto se deve à política de avaliação de incertezas adotada no LVA-UFSC para este tipo de medição.

Segundo o modelo de avaliação de incerteza proposto por COSTA-FÉLIX (2000), as incertezas de medições dos níveis de pressão sonora (fonte sonora de referência e fonte sob teste), u_{PiMj} e u_{PfiMj} são estimadas através do somatório quadrático da incerteza da cadeia de medição u_{Sij} e da incerteza atribuída à resolução²⁰⁵ do instrumento de medição (analisador de sinais) u_d , ver Equação 6.15. E a incerteza padrão combinada da cadeia de medição (instrumentação) é composta por incertezas inerentes a cada um dos j -ésimos microfones, pré-

²⁰⁵ Resolução dada por Δl .

amplificadores, cabos; ao multiplexador ou condicionador de sinais, ao analisador de sinais e ao calibrador de nível sonoro. Ver Equação 6.14.

$$u_{Sij}^2 = u_{i,mic_j}^2 + u_{i,pré_j}^2 + u_{i,cabo_j}^2 + u_{i,mpx}^2 + u_{i,analisador}^2 + u_{cal}^2 \quad (6.14)$$

$$u_{PiMj}^2 = u_{PfiMj}^2 = u_{Sij}^2 + u_d^2 = u_{Sij}^2 + (\Delta l)^2 / 12 \quad (6.15)$$

A incerteza padrão u_{Sij} dada na Equação 6.14 equivale a incerteza u_{ccm} que é a incerteza padrão da cadeia de medição amplamente abordada nos Capítulos 4 e 5; capítulos que reportam investigações experimentais. Com relação aos valores esperados através das estimativas de incertezas padrão u_{Pi} dada no modelo proposto por COSTA-FÉLIX (2000), e u_{Lp} abordada neste trabalho de tese, concluí-se que os valores de u_{Lp} devem ser significativamente maiores em relação à u_{Pi} . Isto se deve as diferentes formas de construção dos modelos matemáticos de avaliação de incertezas que foram propostos.

De fato, os modelos de cálculo de incertezas elaborados por COSTA-FÉLIX (2000) e por (BESSAC E BLANQUART, 2005) são baseados na lei de propagação de incertezas do ISO GUM, através de incertezas padrão combinadas, e são aplicados de forma a considerarem as grandezas de entrada e os níveis de potência sonora das bandas de terço de oitava como **variáveis não-correlacionadas**. Portanto considera-se que neste processo de medição todas as grandezas de entrada são **independentes**. De qualquer maneira, segundo o ISO GUM (2003) Subseção 5.2.4, “*pode existir correlação significativa entre duas grandezas de entrada, se os mesmos instrumentos de medição, padrão de medição físico, ou dados de referência, tendo uma incerteza padrão significativa, são usados na sua determinação*”.

6.2.1 Estimativas de incertezas baseadas nos níveis de potência sonora obtidos experimentalmente e combinados como variáveis não correlacionadas

Segundo BLANQUART (2005), dois métodos são usados para estimar incertezas em laboratórios de ensaios. Um conforme a lei de propagação de incertezas estabelecida no ISO GUM (2003), no qual diferentes componentes de incertezas são individualmente estimados e sua combinação produz a estimativa da incerteza. E o outro método é obtido através de abordagem estatística, onde a incerteza é estimada a partir da dispersão de resultados experimentais obtidos sob diferentes, e variadas, condições (por exemplo, comparações

interlaboratoriais). BLANQUART afirma que ambos os métodos aplicados ao mesmo processo de medição devem conduzir a resultados similares.

Os níveis de potência sonora L_W e L_{WA} , por bandas e valores globais em dB(A), obtidos através dos ensaios realizados no LVA-UFSC e LAENA-INMETRO foram utilizados para calcular (estimar) incertezas através de seus desvios padrão. Também foi calculado um parâmetro denominado $u_c(L_{WA_R})$ cuja combinação foi feita a partir das estimativas de incertezas por bandas de terço de oitava consideradas não-correlacionadas no processo de medição. Esta investigação é reportada na Tabela 6.4, onde também se encontram as médias energéticas dos níveis de potência sonora por bandas e globais dos resultados de ensaios escolhidos. As Equações 6.16 e 6.17 foram utilizadas para calcular os parâmetros apresentados na Tabela 6.4.

Foram treze resultados de L_W (por bandas) e L_{WA} (globais) de ensaios no LAENA e LVA tanto em câmaras reverberantes quanto semi-aneecóica, cuja média resultou em 94,46 dB(A) e parâmetro estimador de incerteza $u_c(L_{WA_R})$ igual a 0,099 dB(A), enquanto que o desvio padrão dos L_{WA} globais foi 0,155 dB(A). Destes treze resultados de L_W e L_{WA_global} foram selecionados apenas os de ensaios realizados no LVA e somente em câmaras reverberantes (apenas oito resultados de ensaios), sendo novamente calculado o parâmetro $u_c(L_{WA_R})$, ver Tabela 6.4. Este último resultou em 0,068 dB(A) enquanto que o desvio padrão dos oito L_{WA} globais resultantes dos ensaios escolhidos foi de 0,142 dB(A). Estes valores de $u_c(L_{WA_R})$ menores que os desvios padrão dos resultados experimentais de L_{WA} globais podem ser indício de **correlações** entre as bandas de terço de oitava no processo de medição. De qualquer forma, a combinação dos desvios padrão do L_W resultantes dos ensaios através do conceito dado na Equação 6.5 (na Subseção 6.2) leva a valores inferiores aos desvios padrão dos L_{WA} globais. Assim corre-se risco em avaliar (estimar) incertezas com valores significativamente inferiores às dispersões que ocorrem em ensaios experimentais²⁰⁶. E isto demonstra que os métodos de estimativas de incertezas nem sempre levam a resultados similares contrariando o que BLANQUART (2005) afirmou.

²⁰⁶ Os ensaios aqui investigados **não** têm condições de repetitividade entre si. Foram realizados em meses diferentes, e em alguns casos com equipamentos e operadores diferentes, e em câmaras acústicas diferentes.

Tabela 6.3 - Cálculos de incertezas a partir de níveis de potência sonora L_W obtidos experimentalmente em ensaios no LVA-UFSC e LAENA-INMETRO. Considerando bandas de terço de oitava como grandezas de entrada independentes (não-correlacionadas).

Frequência (Hz)	Treze resultados de L_{WA} , ensaios no LAENA e LVA. Câmaras reverberantes e semi-aneecóica			Oito resultados de L_{WA} , ensaios no LVA. Câmaras reverberantes somente		
	Desvios padrão de L_{Wi} (s_{Lw}) dB	Média energética $\overline{L_{Wi}}$ em dB(A)	$c_i^2 \cdot s_{Lw}^2$	Desvios padrão de L_{Wi} (s_{Lw}) dB	Média energética $\overline{L_{Wi}}$ em dB(A)	$c_i^2 \cdot s_{Lw}^2$
100	1,86	56,95	0,000000	2,01	56,57	0,000000
125	1,12	60,60	0,000000	0,82	60,48	0,000000
160	0,82	64,27	0,000001	0,55	64,02	0,000000
200	0,64	67,75	0,000002	0,44	67,55	0,000001
250	0,48	71,46	0,000006	0,23	71,50	0,000001
315	0,71	73,35	0,000030	0,52	73,34	0,000016
400	0,38	74,99	0,000019	0,09	75,10	0,000001
500	0,34	76,61	0,000031	0,16	76,78	0,000008
630	0,35	78,65	0,000082	0,12	78,73	0,000010
800	0,26	82,66	0,000304	0,17	82,80	0,000141
1000	0,29	84,58	0,000920	0,17	84,62	0,000332
1250	0,18	86,04	0,000653	0,14	86,10	0,000413
1600	0,29	86,23	0,001863	0,20	86,21	0,000862
2000	0,40	85,90	0,003066	0,22	85,84	0,000910
2500	0,23	84,23	0,000488	0,18	84,17	0,000290
3150	0,32	82,61	0,000446	0,33	82,63	0,000473
4000	0,37	82,58	0,000575	0,34	82,47	0,000467
5000	0,50	81,32	0,000600	0,42	81,16	0,000385
6300	0,77	79,27	0,000548	0,59	79,02	0,000286
8000	0,58	76,50	0,000085	0,18	76,11	0,000000
10000	1,53	72,72	0,000105	0,82	71,42	0,000000
Global	0,155	$\overline{L_{WA}}$ 94,46	$u_c(L_{WA_R})$ 0,099 dB(A)	0,142	$\overline{L_{WA}}$ 94,43	$u_c(L_{WA_R})$ 0,068 dB(A)

$$c_i^2 \cdot s_{Lwk}^2 = \left(10^{0,1(\overline{L_{Wi}} - \overline{L_{WA}})} \cdot s_{Lw}\right)^2 \tag{6.16}$$

$$u_c(L_{WA_R}) = \sqrt{\sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} c_i^2 \cdot s_{Lw}^2} \tag{6.17}$$

onde $\overline{L_{Wi}}$ é a média energética dos níveis de potência sonora, em dB(A), de cada i-ésima banda de terço de oitava dos resultados de ensaios escolhidos; $\overline{L_{WA}}$ é a média energética dos níveis de potência sonora globais em dB(A); s_{Lw} é o desvio padrão dos níveis de potência sonora entre os ensaios escolhidos.

6.3 Os coeficientes de sensibilidade

Os coeficientes de sensibilidade relativos às grandezas de entrada da determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes **pelo método direto** foram calculados, e são apresentados nesta subseção. Especificamente neste trabalho os coeficientes foram denominados através de subíndices numéricos, coeficientes de sensibilidade c_1 a c_7 relativos às sete grandezas de entrada do processo de medição. Estes coeficientes variam em função da banda de terço de oitava (variam em função da frequência) exceto os coeficientes c_1 e c_6 . A função dos coeficientes de sensibilidade é ponderar as contribuições de incertezas de cada grandeza de entrada do processo de medição.

O desenvolvimento dos coeficientes de sensibilidade c_1 a c_7 está baseado na equação de cálculo de L_W dada pela norma ISO 3741 de 1999; ver Equações 4.4 e 4.5 no Capítulo 4. Na verdade, através das derivadas parciais da Equação 4.4. O coeficiente de sensibilidade referente aos níveis de pressão sonora é dado pela derivada parcial do nível de potência sonora pelo nível de pressão sonora; Equação 6.18.

$$c_1 = \frac{\partial L_W}{\partial L_p} = 1,0 \quad (6.18)$$

O desenvolvimento dos coeficientes de sensibilidade referente aos tempos de reverberação é dado através das Equações 6.19 e 6.20. Eles são calculados através da derivada parcial do nível de potência sonora L_W (por banda de terço de oitava) pelo tempo de reverberação T_{rev} .

$$c_2 = \frac{\partial L_W}{\partial T_{rev}} = \frac{\partial}{\partial T_{rev}} \left(-10 \log T_{rev} + \frac{11,96V}{T_{rev} S \sqrt{273 + \theta}} \right) \text{ em dB/s} \quad (6.19)$$

$$c_2 = -10 \frac{0,4343}{T_{rev}} + \left(\frac{-1}{T_{rev}^2} \right) \frac{11,96V}{S \sqrt{273 + \theta}} = \frac{-4,343}{T_{rev}} - \frac{11,96V}{T_{rev}^2 S \sqrt{273 + \theta}} \text{ em dB/s} \quad (6.20)$$

Os coeficientes de sensibilidade c_3 , relativos ao volume da câmara reverberante foram calculados de acordo com as Equações 6.21 a 6.22:

$$c_3 = \frac{\partial L_W}{\partial V} = \frac{\partial}{\partial V} \left[10 \log V + \frac{11,96V}{T_{rev} S \sqrt{273 + \theta}} + 10 \log \left(1 + \frac{2,506S \sqrt{273 + \theta}}{Vf} \right) \right] \text{ em dB/m}^3 \quad (6.21)$$

$$c_3 = 10 \frac{\log(e)}{V} + \frac{11,96}{T_{rev} S \sqrt{273 + \theta}} + 10 \cdot \left(1 + \frac{2,506S \sqrt{273 + \theta}}{Vf} \right)^{-1} \cdot \frac{(-1)}{V^2} \cdot \frac{2,506S \sqrt{273 + \theta}}{f} \cdot \log(e)$$

$$c_3 = \frac{4,343}{V} + \frac{11,96}{T_{rev} S \sqrt{273 + \theta}} - \frac{10,88 V f S \sqrt{273 + \theta}}{(V f + 2,506 S \sqrt{273 + \theta}) \cdot V^2 f} \text{ em dB/m}^3$$

$$c_3 = \frac{4,343}{V} + \frac{11,96}{T_{rev} S \sqrt{273 + \theta}} - \frac{10,88 \cdot S \sqrt{273 + \theta}}{V^2 f + 2,506 V S \sqrt{273 + \theta}} \text{ em dB/m}^3 \quad (6.22)$$

Os coeficientes de sensibilidade c_4 são calculados através da derivada parcial do nível de potência sonora L_W (por banda de terço de oitava) pela área de superfície S , de acordo com as Equações 6.23 a 6.24:

$$c_4 = \frac{\partial L_W}{\partial S} = \frac{\partial}{\partial S} \left[\frac{4,34 \cdot 55,26 \cdot V}{20,05 \cdot \sqrt{273 + \theta} \cdot T_{rev} S} + 10 \log \left(1 + \frac{S \cdot 20,05 \cdot \sqrt{273 + \theta}}{8 V f} \right) \right] \quad (6.23)$$

$$c_4 = \left(\frac{-1}{S^2} \right) \cdot \frac{11,96 V}{T_{rev} \sqrt{273 + \theta}} + 10 \cdot \log(e) \cdot \left(1 + \frac{2,506 \cdot S \sqrt{273 + \theta}}{V f} \right)^{-1} \cdot \frac{2,506 \sqrt{273 + \theta}}{V f}$$

$$c_4 = \frac{-11,96 V}{S^2 T_{rev} \sqrt{273 + \theta}} + \frac{10,88 \sqrt{273 + \theta}}{V f + 2,506 \cdot S \sqrt{273 + \theta}} \text{ em dB/m}^2 \quad (6.24)$$

Os coeficientes de sensibilidade relativos às variações de temperatura ambiente são dados através do desenvolvimento apresentado nas Equações 6.25 e 6.26:

$$c_5 = \frac{\partial L_W}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[(-10) \log(20,05 \sqrt{273 + \theta}) + \frac{11,96 V}{T_{rev} S \sqrt{273 + \theta}} + 10 \log \left(1 + \frac{2,506 \sqrt{273 + \theta} \cdot S}{V f} \right) - 25 \log \left(\sqrt{\frac{273}{273 + \theta}} \right) \right] \quad (6.25)$$

$$c_5 = \frac{-2,171}{273 + \theta} - \frac{5,98 V}{T_{rev} S (273 + \theta)^{3/2}} + \frac{5,442 \cdot S}{(V f + 2,506 \sqrt{273 + \theta} \cdot S) \cdot \sqrt{273 + \theta}} + \frac{5,429}{273 + \theta} \text{ em dB/}^\circ\text{C} \quad (6.26)$$

O coeficiente de sensibilidade referente à pressão atmosférica (barométrica) **não** varia em função da frequência f , e é dado através da Equação 6.27:

$$c_6 = \frac{\partial L_W}{\partial B} = \frac{-25 \cdot \log(e)}{B} = \frac{-10,86}{B} \text{ em dB/Pa} \quad (6.27)$$

O coeficiente de sensibilidade referente ao *erro de medição da frequência central de cada banda de terço de oitava* é deduzido através das Equações 6.28 a 6.29.

$$c_7 = \frac{\partial L_W}{\partial f} = \frac{\partial}{\partial f} \left[10 \log \left(1 + \frac{2,506 \cdot S \sqrt{273 + \theta}}{Vf} \right) \right] \quad (6.28)$$

$$c_7 = 10 \cdot \log(e) \cdot \left(1 + \frac{2,506 \cdot S \sqrt{273 + \theta}}{Vf} \right)^{-1} \cdot \frac{(-1)}{f^2} \cdot \frac{2,506 \cdot S \sqrt{273 + \theta}}{V}$$

$$c_7 = \frac{-10,88 \cdot S \sqrt{273 + \theta}}{Vf^2 + 2,506 \cdot S \sqrt{273 + \theta} \cdot f} \text{ em dB/Hz} \quad (6.29)$$

Algumas das grandezas de entrada dizem respeito a termos (parcelas) de correções na formulação de L_W dada pela Equação 4.4 (no Capítulo 4). Por isto, os respectivos coeficientes de sensibilidade têm valores significativamente (ou relativamente) baixos. Assim suas contribuições de incertezas são pouco significativas para a incerteza global, e isto já era esperado desde o início deste trabalho de investigação experimental.

Para validar os cálculos destes coeficientes de sensibilidade, foram elaborados gráficos com a curva de L_W e reta com inclinações de acordo com os coeficientes calculados. Os dados usados são provenientes de um ensaio experimental na câmara reverberante de 145 m³ em novembro de 2005, com fonte sonora BK 4204, e na frequência de 1000 Hz; ver Tabela 4.38 no Capítulo 4. Estes gráficos são apresentados nas Figuras 81, 82, 83 e 84, sendo que a validação consiste na verificação das inclinações das curvas plotadas nos gráficos.

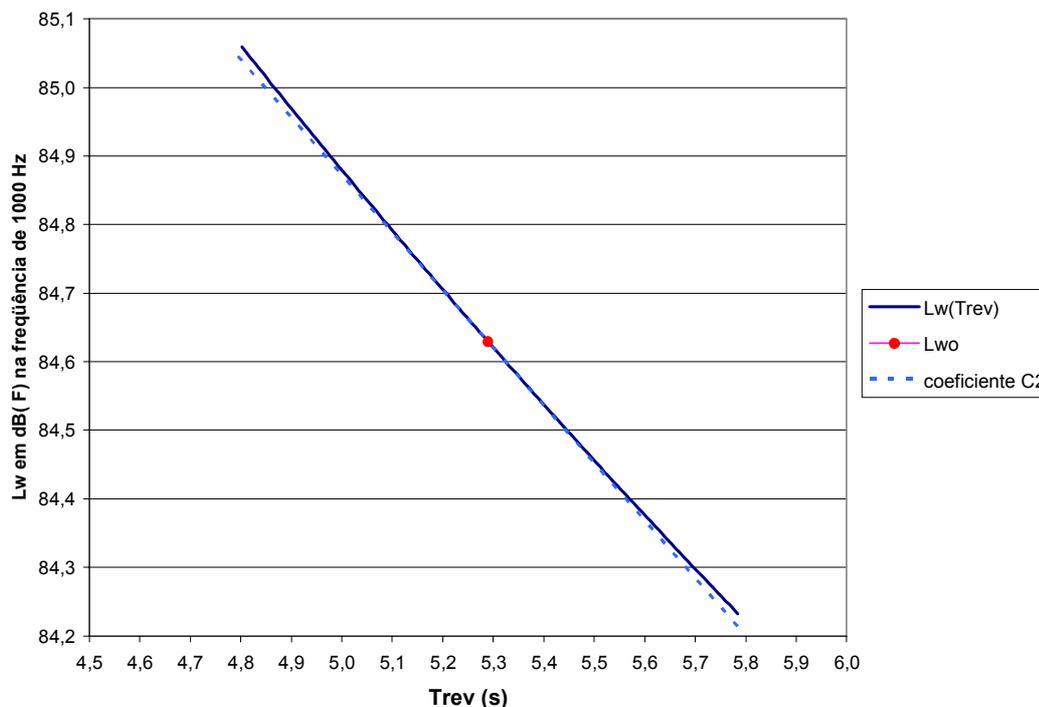


Figura 81 - Validação do cálculo do coeficiente de sensibilidade de tempo de reverberação, c_2 , para a frequência de 1000 Hz, e com dados do ensaio de novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m³ do LVA.

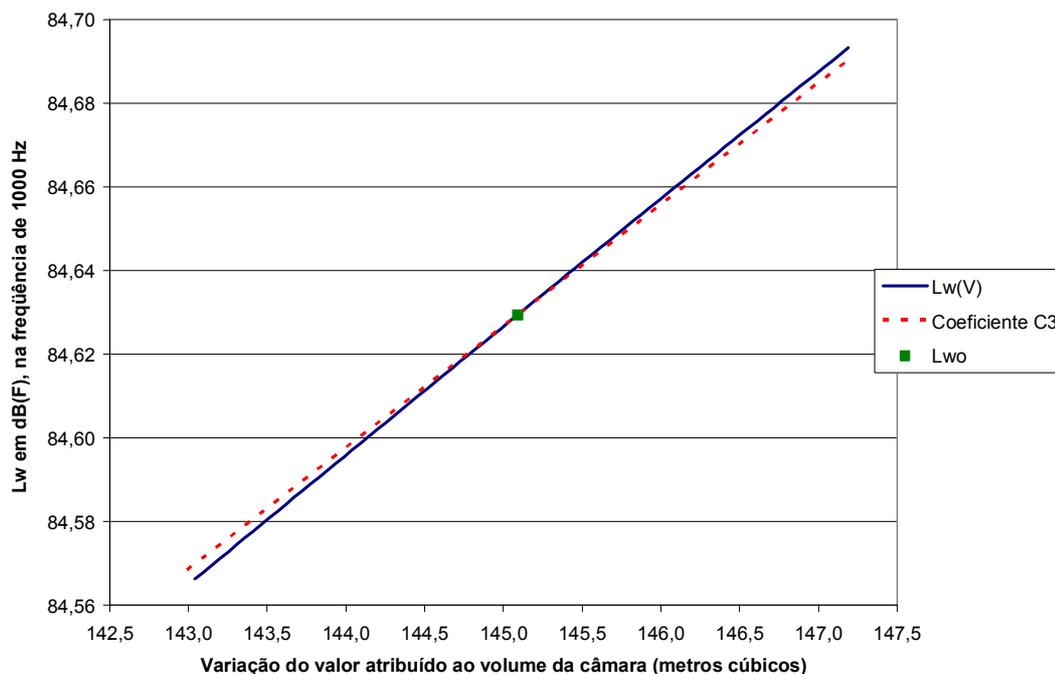


Figura 82 - Validação do cálculo do coeficiente de sensibilidade de volume da câmara reverberante, c_3 , para a frequência de 1000 Hz, e com dados do ensaio de novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m^3 do LVA-UFSC.

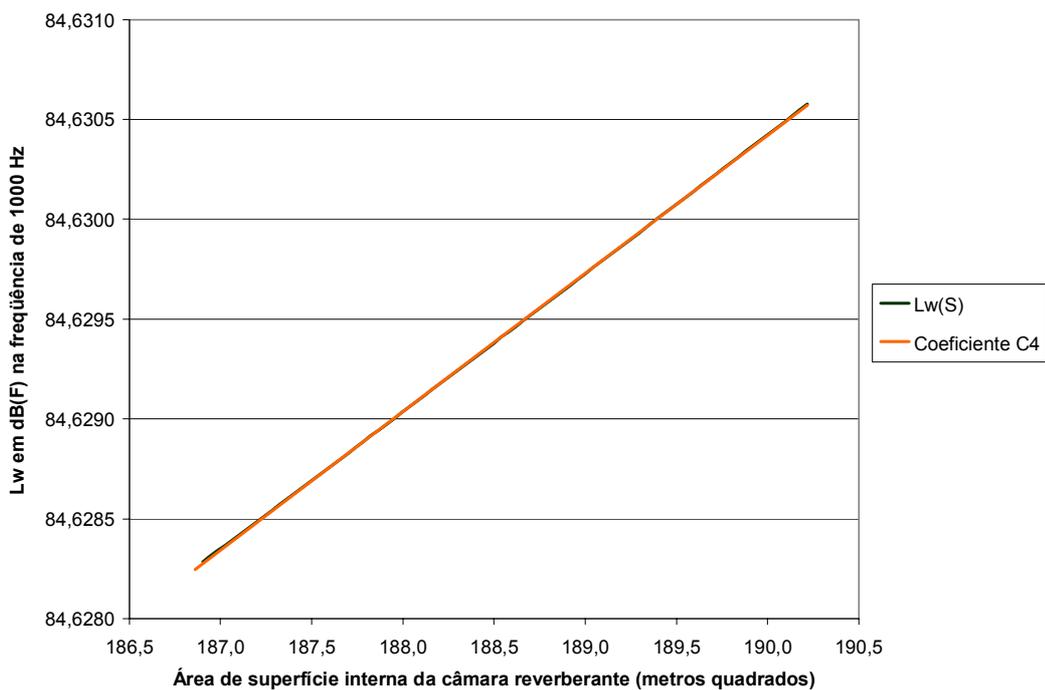


Figura 83 - Validação do cálculo do coeficiente de sensibilidade de área de superfície, c_4 , para a frequência de 1000 Hz. Dados do ensaio realizado em novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m^3 do LVA-UFSC.

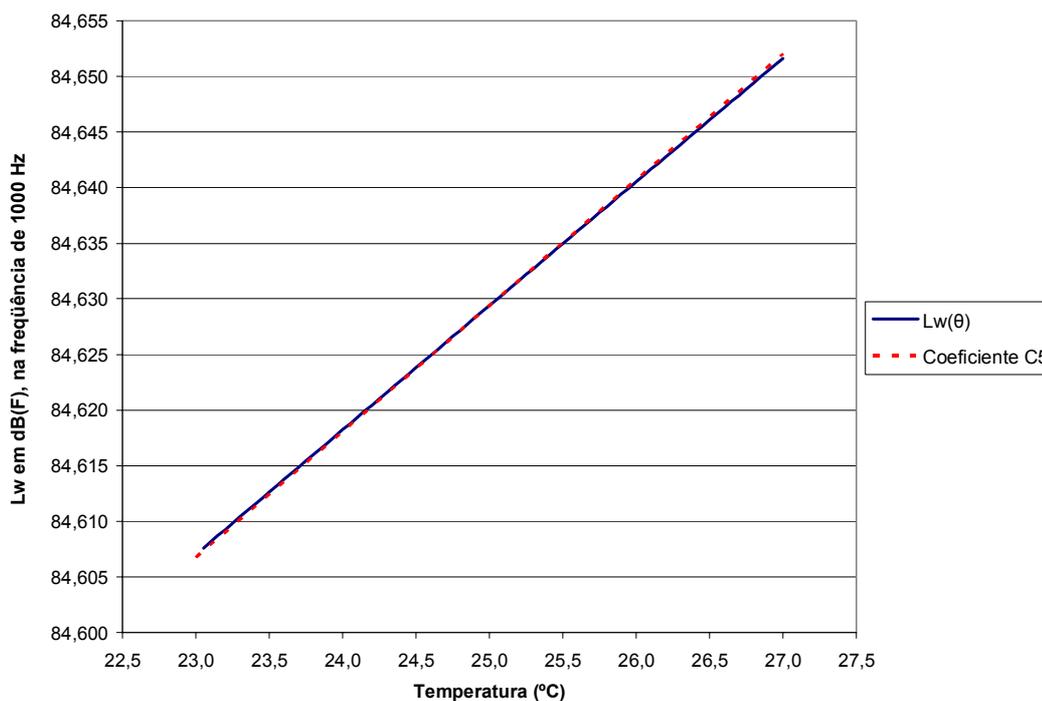


Figura 84 - Validação do cálculo do coeficiente de sensibilidade de temperatura, c_5 , para a frequência de 1000 Hz, e com dados do ensaio de novembro de 2005 na câmara reverberante de 145 m³ do LVA.

6.3.1 Coeficientes de sensibilidade calculados para as bandas de terço de oitava

Foram calculados os coeficientes de sensibilidade aqui denominados c_j , que ponderam as influência das incertezas de cada banda de terço de oitava sobre a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A). As Equações 6.30 a 6.38 demonstram a dedução dos coeficientes c_j e da incerteza padrão combinada $u_c(L_{WA})$, note que o resultado final é equivalente ao do modelo calculado por COSTA-FÉLIX (2000), pois ambos são decorrentes da aplicação do mesmo princípio (propagação de incertezas de grandezas não correlacionadas segundo o Capítulo 5, em 5.1.2, do ISO GUM, versão 2003). Ver Equação 6.5, na Subseção 6.2.

$$L_{WA} = 10 \log \left[\sum_{j_{\min}}^{j_{\max}} 10^{0,1(L_{Wj} + A_j)} \right] \quad (6.30)$$

$$\varepsilon = \sum_{j_{\min}}^{j_{\max}} 10^{0,1(L_{Wj} + A_j)} = 10^{L_{WA}/10} \quad (6.31)$$

Na Equação 6.31 o símbolo ε é proporcional à energia (ou potência) sonora global, ou seja, o somatório das potências sonoras de todas as bandas de terço de oitava

consideradas; que neste trabalho são as bandas de 100 Hz a 10 kHz. Na seqüência, as equações desenvolvem as derivadas parciais, seguindo os preceitos do ISO GUM (2003). As Equações 6.33 e 6.35 demonstram as propriedades de derivadas de funções logarítmicas e exponenciais.

$$c_j = \frac{\partial L_{WA}}{\partial L_{Wj}} = \frac{\partial}{\partial L_{Wj}} [10 \log(\varepsilon)] = \frac{\partial}{\partial L_{Wj}} \left[10 \log \left(\sum_{j_{\min}}^{j_{\max}} 10^{0,1(L_{Wj} + A_j)} \right) \right] \text{ em dB / dB} \quad (6.32)$$

$$\frac{d}{dx} \log_a u = \frac{\log_a e}{u} \cdot \frac{du}{dx} \quad a \neq 0,1 \quad (6.33)$$

$$c_j = 10 \cdot \frac{\partial}{\partial L_{Wj}} [\log(\varepsilon)] = 10 \cdot \frac{\log(e)}{\varepsilon} \cdot \varepsilon' = \frac{10 \cdot \log(e)}{10^{L_{WA}/10}} \cdot \frac{\partial}{\partial L_{Wj}} [10^{0,1(L_{Wj} + A_j)}] \quad (6.34)$$

$$\frac{d}{dx} a^u = a^u \cdot \ln a \cdot \frac{du}{dx} \quad \text{para } (a > 0) \quad (6.35)$$

$$c_j = \frac{10 \cdot \log(e)}{10^{0,1L_{WA}}} \cdot 10^{0,1(L_{Wj} + A_j)} \ln(10) \cdot 0,1 = \frac{1,0}{10^{0,1L_{WA}}} \cdot 10^{0,1(L_{Wj} + A_j)} = 10^{-0,1L_{WA}} \cdot 10^{0,1(L_{Wj} + A_j)} \quad (6.36)$$

$$c_j = 10^{0,1(L_{Wj} + A_j - L_{WA})} \quad (6.37)$$

O parâmetro A_j dado na Equação 6.37 se refere aos valores da ponderação da “curva A” de cada j-ésima banda; usados para obter valores em dB(A). A partir do coeficiente de sensibilidade c_j se pode calcular a incerteza padrão atribuída ao nível de potência sonora global em dB(A), dado na Equação 6.38:

$$u_c^2(L_{WA}) = \sum_{j_{\min}}^{j_{\max}} c_j^2 \cdot u_j^2 \quad (6.38)$$

Segundo (BESSAC e BLANQUART, 2005) “*O coeficiente de sensibilidade é proporcional à potência da banda sob consideração dividida pela potência global. As incertezas associadas às bandas dominantes irão influenciar fortemente a incerteza do nível global*”. Isto se refere às determinações de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo **método da comparação**, mas também se aplica ao **método direto**, porque esta parte do equacionamento é igual em ambos os métodos de determinação de níveis de potência sonora. Neste caso o coeficiente de sensibilidade é denominado c_j .

6.4 Procedimentos de combinações de incertezas

A partir das investigações e estudos expostos até este ponto, foram elaborados dois modelos, ou procedimentos, de combinações de incertezas. Cada um deles dividido em duas partes; *Parte 1* e *Parte 2*. O primeiro, denominado *Método 1*, computa a incerteza padrão do calibrador de nível sonoro (u_{cal}) através de soma quadrática junto com as incertezas padrão dos outros equipamentos da cadeia de medição acústica. O segundo, é denominado *Método 2*, sendo que a incerteza do calibrador de nível sonoro **não** é computada junto com as incertezas padrão dos instrumentos da cadeia de medição; isto na *Parte 1* do *Método 2*. A incerteza padrão do calibrador de nível sonoro (u_{cal}) é acrescentada ao balanço de incertezas através de soma quadrática com a incerteza padrão do nível de potência sonora global ($u_{L_{WA}}$), ver diagrama na Figura 88. Os dois procedimentos (ou métodos) de combinação de incertezas são ilustrados pelas figuras 85, 86, 87 e 88.

Em ambos os procedimentos de combinação de incertezas, *Método 1* e *Método 2*, a incerteza padrão do calibrador de nível sonoro u_{cal} é considerada, porém em etapas diferentes do balanço de incertezas.

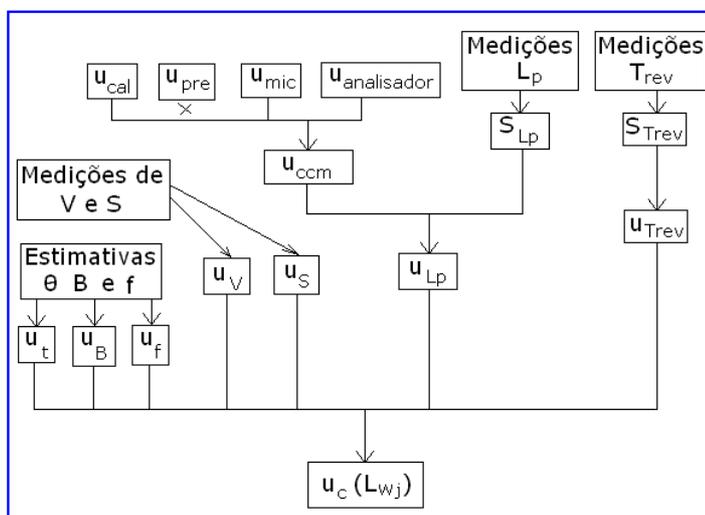


Figura 85 - Diagrama de blocos que representa o procedimento de combinações de incertezas padrão para cada j -ésima banda de terço de oitava. “Método 1 – Parte 1” no qual u_{cal} é combinada com incertezas da cadeia de medição u_{mic} e $u_{analisador}$.

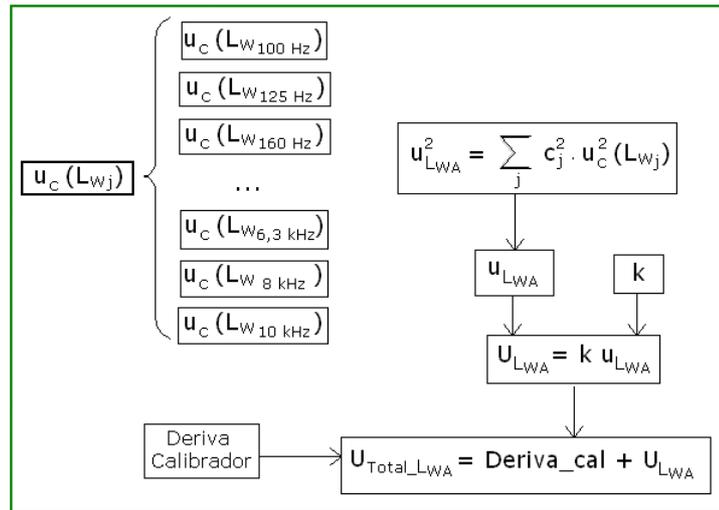


Figura 86 - Diagrama de blocos que esboça o procedimento de cálculo da incerteza “total” do nível de potência sonora global. As incertezas relativas às bandas de 100 Hz a 10 kHz são combinadas para obtenção da incerteza do nível de potência sonora global L_{WA} . “Método 1 – Parte 2”.

Nas figuras 85 e 86 os diagramas de blocos esboçam a *Parte 1* e *2* do procedimento de combinação de incertezas (das fontes de incertezas) da forma como foram combinadas as incertezas nas investigações reportadas nos Capítulos 4 e 5. Este é denominado *Método 1* no qual eram esperados valores de incerteza ligeiramente menores que no *Método 2*. E este último é esboçado através dos diagramas nas figuras 87 e 88.

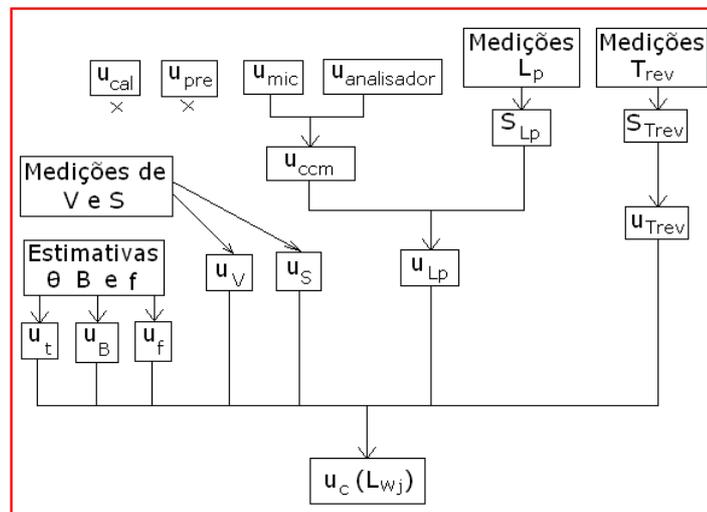


Figura 87 - Diagrama de blocos que representa o procedimento de combinações de incertezas padrão para cada j -ésima banda de terço de oitava. “Método 2 – Parte 1” no qual u_{cal} **não** é combinada com incertezas padrão da cadeia de medição u_{mic} e $u_{analizador}$

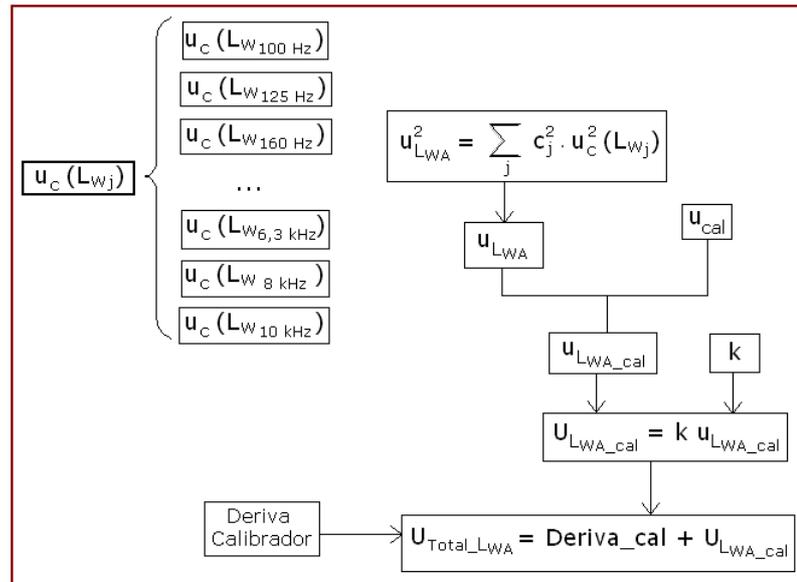


Figura 88 - Diagrama de blocos que esboça o procedimento de cálculo da incerteza “total” do nível de potência sonora global. As incertezas relativas às bandas de 100 Hz a 10 kHz são combinadas para obtenção da incerteza do nível de potência sonora global u_{LWA} . Incertezas padrão u_{cal} e u_{LWA} são combinadas por somatório quadrático. “Método 2 – Parte 2”.

Tanto no *Método 1* quanto no *Método 2* o fator de abrangência k é o considerado com valor 2,0.

6.4.1 Correlações entre as bandas de terço de oitava

No modelo de cálculo de incertezas foi considerada a existência de deriva do nível de pressão sonora gerado pelo calibrador de nível sonoro; simbolizada por “*Deriva_cal*”. Também foi considerado que esta deriva provoca um efeito sistemático no resultado de nível de potência sonora global em dB(A), de forma que o valor atribuído, *Deriva_cal* igual a 0,1 dB, foi somado algebricamente à incerteza expandida U_{LWA} (ou a U_{LWA_cal}). Resultando nas incertezas expandidas U_{Total_LWA} e U_{Final_LWA} ; ver figuras 86 e 88. Esta soma algébrica parte do princípio que há correlação máxima (correlação igual a 1) entre todas as bandas de terço de oitava com relação à deriva do calibrador de nível sonoro. Este princípio é aplicado nos dois procedimentos de combinação de incertezas; *Método 1* e *Método 2*.

Quanto aos filtros de bandas de terço de oitava do analisador de sinais, **não** foi considerada qualquer correlação entre os mesmos. Apesar de que possa haver algum tipo de efeito sistemático, que caracterize correlação²⁰⁷ entre as medições das diversas bandas, por exemplo, variações de temperatura do analisador poderiam influenciar todos os filtros eletrônicos de forma tendenciosa. A **não** consideração de correlação entre estes filtros está

²⁰⁷ Interdependência entre as medições feitas com os diferentes filtros de banda de terço de oitava implementados dentro do mesmo analisador de sinais.

baseada principalmente no fato que eles são calibrados independentemente, e isto pode ser verificado nos certificados de calibração dos analisadores de sinais com filtros de bandas de oitava e/ou terço de oitava.

Grandezas de influência tais como: temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica; atuam sobre o nível de pressão sonora gerado pelo calibrado sonoro. Sendo variações consideradas de caráter aleatório que são estimadas através da incerteza padrão u_{cal} . Apesar disto, quando o analisador é ajustado²⁰⁸ a partir do nível de pressão sonora do calibrador sonoro, os efeitos sistemáticos (variações de caráter aleatório) se propagam em todas as bandas de terço de oitava. Por isto, no *Método 2* somente se incluí a incerteza padrão u_{cal} na *Parte 2* junto com a incerteza u_{LWA} . Desta forma foi computada a correlação atribuída entre as diversas bandas de frequência devida à incerteza do calibrador sonoro u_{cal} . Ver diagrama na Figura 88.

Não foi considerada qualquer correlação (interdependência) entre as respostas do microfone de medição nas diversas bandas de terço de oitava, isto porque as estimativas de incertezas do microfone variam em função da banda de frequência considerada. Por isto, nos dois *Métodos* de combinações de incertezas u_{mic} foi computado na *Parte 1* junto com $u_{analisador}$.

6.4.2 Comparações entre resultados de cálculos de incertezas globais obtidas por procedimentos de combinações distintos

Os cálculos de incertezas apresentados nos Capítulos 4 e 5 seguiram o procedimento de combinação de incertezas aqui²⁰⁹ denominado *Método 1*. Com objetivo de comparar as estimativas de incertezas de níveis de potência sonora globais em dB(A), os aqueles balanços de incertezas foram adaptados para seguir o *Método 2* e os valores recalculados. Estes valores de incertezas globais tendem a aumentar em relação aos obtidos através do *Método 1*, como se pode notar nos valores apresentados na Tabela 6.5. Isto acontece porque a incerteza do calibrador de nível sonoro u_{cal} é considerada correlacionada entre as bandas de terço de oitava, e é incluída apenas na *Parte 2* do *Método 2* de combinações de incertezas²¹⁰. Os valores das incertezas expandidas U_{Total_LWA} são os mesmos apresentados no Capítulo 4.

²⁰⁸ Processo de ajuste da escala de medição de analisadores de sinais é confundido com calibração, isto acontece também no idioma inglês quando é usado o termo *calibration*. No processo de ajuste do analisador, o valor de pressão sonora gerado pelo calibrador sonoro (dado no certificado de calibração do mesmo) deve coincidir com o valor indicado pelo analisador no seu mostrador (visor).

²⁰⁹ Ver subseção anterior.

²¹⁰ Idem.

Tabela 6.4 - Incertezas globais em dB(A) calculadas através de dois procedimentos (métodos) de combinação de incertezas distintos; Método 1 e Método 2. Fonte sonora BK 4204.

Ensaio	Incerteza do L_{WA} global em dB(A), <i>Método 1</i>	Incerteza do L_{WA} global em dB(A), <i>Método 2</i>
	$U_{Total\ LWA}$	$U_{Final\ LWA}$
LVA fev 2005 – câmara 193 m ³	0,25	0,28
LVA julho 2005 – câmara 193 m ³	0,27	0,30
LVA agosto 2005 – câmara 193 m ³ Canal 1 (Microfone 1)	0,27	0,30
LVA agosto 2005 – câmara 193 m ³ Canal 2 (Microfone 2)	0,29	0,32
LVA agosto 2005 – câmara 145 m ³ Canal 1 (Microfone 1)	0,28	0,31
LVA agosto 2005 – câmara 145 m ³ Canal 2 (Microfone 2)	0,27	0,30
LAENA outubro 2005 – câmara 197 m ³ ; *DPE	0,29	0,31
LAENA outubro 2005 – câmara 197 m ³ ; **DPEM	0,19	0,23
LVA nov 2005 – câmara 193 m ³	0,27	0,30
LVA nov 2005 – câmara 145 m ³	0,30	0,33

* DPE – baseado em desvios padrão experimentais.
 ** DPEM – baseado em desvios experimentais da média

Valores de incertezas arredondados para cima e com duas casas decimais.

Nos valores de incertezas de níveis de potência sonora globais apresentados na Tabela 6.5 nota-se que através do *Método 2* a incertezas de níveis globais de potência sonora estimadas são 0,02 a 0,04 dB superiores as obtidas através do *Método 1*; em média são 0,03 dB superiores no *Método 2*.

Supondo que por algum motivo as incertezas dadas na Tabela 6.5 tenham que ser arredondadas para apenas uma casa decimal, este arredondamento deverá ser feito *para cima*. Neste caso, os valores de incertezas resultariam de 0,2 dB(A) a 0,4 dB(A), (especialmente entre 0,3 dB(A) a 0,4 dB(A)), lembrando que estes valores correspondem especificamente a investigação com a fonte sonora padrão de referência BK 4204 de Brüel & Kjær.

Portanto, o procedimento de cálculo de incertezas proposto é: calcular as incertezas dos L_w das bandas de terço de oitavas através da *Parte 1* do *Método 1*; e calcular a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A) através do *Método 2*. Desta maneira os valores obtidos serão ligeiramente mais elevados, o que foi julgado mais consistente através do conhecimento técnico deste tipo de processo de medição.

6.5 Comentários sobre os modelos de cálculos de incertezas

Neste capítulo inicialmente foram destacadas as possíveis fontes de incertezas e a complexidade relativa ao processo de medição abordado. Foram apresentadas as similaridades entre os modelos de cálculo de incertezas relacionados com a determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto e método da comparação (com fonte sonora de referência calibrada). A determinação do nível global de potência sonora, L_{WA} em dB(A), a partir dos níveis de potência sonora das diversas bandas de terço de oitava segue a mesma regra tanto no **método da comparação** quanto no **método direto**, assim a combinação das incertezas das bandas de terço de oitavas para calcular $U(L_{WA})$ deve seguir os mesmos princípios em ambos os métodos de determinação de L_{WA} .

Foram dados valores de estimativas de incertezas da cadeia de medição considerando a incerteza padrão do calibrador de nível sonoro de duas maneiras distintas, sendo que houve ligeira diferença nos resultados de incertezas de acordo com o método de combinação de incertezas investigado (calculado). Também foi computada a deriva do calibrador de nível sonoro, estimada em 0,1 dB, nos cálculos de incertezas.

Com relação às incertezas inerentes aos microfones de medição capacitivos utilizados para medir os níveis de pressão sonora, concluiu-se que é tema de discussões e desenvolvimento no âmbito da pesquisa científica atual (SOARES, 2005). Porém, os modelos de cálculo de incerteza dos níveis de potência sonora continuam sendo válidos independentemente dos valores de incertezas que futuramente poderão ser atribuídos aos microfones de medição nas utilizações em campo sonoro difuso.

Foi verificado que a influência dos níveis de potência sonora mais elevados (mais energia sonora) têm forte influência sobre a incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), (BESSAC E BLANQUART, 2005). Sendo que os valores dos coeficientes de sensibilidade denominados c_j são funções do nível de potência sonora da respectiva banda e do nível de potência sonora global em dB(A).

Na investigação feita através do parâmetro denominado $u_c(L_{WA_R})$ e de desvios padrão de L_W experimentais foram obtidos indícios de que pode haver correlações entre as bandas de terço de oitava. Não há comprovação plena, mas as duas combinações feitas através de somatórios quadráticos resultam em valores menores do que os desvios padrão dos L_{WA} experimentais (ver Tabela 6.4). Isto mostra que há tendência em encontrar valores de dispersões menores ao se usar o somatório quadrático dos desvios das bandas de terço de oitava; método de

combinação (de grandezas de entrada não-correlacionadas) que foi adaptado em função do estabelecido no ISO GUIA (2003).

Através das investigações experimentais e cálculos efetuados foi identificada maior consistência ao se usar o denominado *Método 1 (Parte 1)* para estimar as incertezas das bandas de terço de oitava, e usar o *Método 2* para estimar incertezas do nível de potência sonora global; no tipo de processo de medição estudado.

No Apêndice 1 desta tese encontra-se um balanço de incerteza no formato tabular²¹¹, o qual é um modelo de cálculo de incertezas que visa contribuir para o desenvolvimento do projeto de revisão da norma internacional ISO 3741 que está em andamento. Os símbolos e o formato lá utilizados são similares aos adotados no documento EA-4/02 S1 (European Co-operation for Accreditation of Laboratories, 1999) e no projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006).

²¹¹ Formato tabular é solicitado no item 4 do documento ISO/TC 43 N 1023 de junho de 2004.

7 Conclusões

Pode-se notar através da revisão bibliográfica que em diversos países do mundo, especialmente na Europa, a questão da incerteza está cada vez mais sendo levada a sério. Os conceitos do ISO GUIA (2003) e da norma ISO 17025 estão sendo implementados na prática, e inclusive no andamento da revisão de normas internacionais (que definem processos de medição), isto por solicitação dos usuários destas normas; laboratórios de calibração e de ensaios.

Quanto à avaliação de incertezas, segundo PRIEL (2005), são quatro tipos distintos de abordagem para avaliar as incertezas, especialmente em laboratórios de ensaio. As investigações abordadas neste trabalho se enquadram apenas em um dos tipos; a abordagem baseada em *modelo matemático*. E foi obtido relativo sucesso nos resultados através desta abordagem que se baseia na combinação de incertezas padrão e coeficientes de sensibilidade, de acordo com o ISO GUIA (2003). O sucesso é dito relativo porque nem todos os níveis de potência sonora (mesmo com estimativa de incerteza calculada) têm como serem efetivamente testados e verificados por comparações. No caso da fonte sonora padrão de referência modelo BK 4204 do LVA foi realizada a comparação bilateral entre o LAENA-INMETRO e o LVA-UFSC cujos resultados²¹² podem ser vistos na **Figura 89**. Concluiu-se que a rastreabilidade pode ser garantida nas bandas de 100 Hz a 4 kHz, porém não houve boa concordância entre os resultados a partir de 5 kHz. Isto por causa da questão da calibração de microfones em campo difuso, principalmente em altas frequências, a partir de 5 kHz. Nos casos das outras fontes de ruído não houve verificação da confiabilidade dos resultados da mesma forma que com a fonte sonora BK 4204, ou seja, a comparação bilateral foi realizada apenas com a fonte BK 4204.

²¹² Valores dos níveis de potência sonora globais referentes a Figura 89: $(94,59 \pm 0,18)$ dB e $(94,28 \pm 0,17)$ dB(A) para LVA-UFSC, e $(94,87 \pm 0,20)$ dB e $(94,53 \pm 0,19)$ dB(A) para LAENA-INMETRO. Estas incertezas associadas **não** levam em consideração a deriva do calibrador de nível sonoro.

Somente foi possível comparar os resultados entre as duas câmaras reverberantes e a câmara semi-aneecóica disponíveis, o que faz sentido somente na observação das dispersões de resultados (diferença relativa apenas).

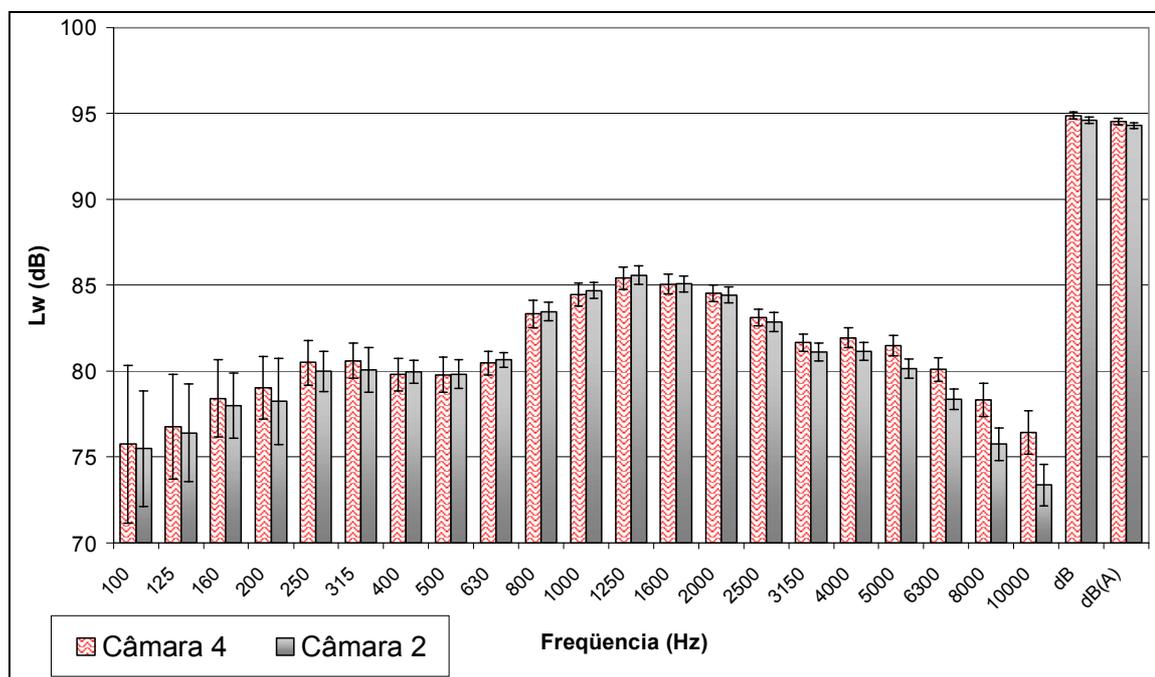


Figura 89 – Gráfico de barras dos níveis de potência sonora da comparação bilateral entre LAENA-INMETRO e LVA-UFSC. Barras de erros representam as incertezas expandidas. Fonte sonora BK4204, câmaras 4 e 2 são as reverberantes do LAENA e LVA (197 e 193 m³), respectivamente. Ensaios em outubro/05 e novembro/05, respectivamente.

Indo ao encontro com um dos objetivos deste trabalho, foi elaborada uma proposta de balanço de incertezas, em forma tabular, como é solicitado pelo documento ISO/TC 43 N1023, o qual está no Apêndice 1 desta tese. Poderá haver adaptações e aprimoramentos na divulgação científica deste anexo, inclusive adaptações devido à tradução do documento, além de revisões de rotina feitas em função do aconselhamento dado por especialistas da mesma área. Isto acontece antes da aprovação de artigos científicos. Portanto, espera-se que seja aperfeiçoado e/ou lapidado antes de ser publicado efetivamente no meio internacional.

Quanto aos testes de conformidade, os resultados foram comparados ao longo dos Capítulos 4 e 5, que tratam de reportar as investigações experimentais. De um modo geral, tais testes resultaram em *conformidade*, apesar de que no caso da fonte sonora Vibranihil os resultados obtidos nas câmaras reverberantes do LVA acusaram uma *não-conformidade* com relação aos L_{WA} encontrados, quando as incertezas não computavam a deriva do calibrador de nível sonoro; ver Capítulo 5.

Com relação às influências das posições de fonte de ruído e de microfones dentro de câmaras reverberantes, as conclusões são muito semelhantes entre os autores apontados na revisão bibliográfica (Capítulo 2) e os próprios resultados experimentais das baterias de ensaios realizadas no LVA-UFSC em 2005. Foi notado durante a execução das baterias de ensaios no LVA que com o aumento do número de posições de microfone(s) e de fonte de ruído, em alguns casos os desvios padrão diminuía em pequena proporção, e em outros casos ocorria o contrário, os desvios padrão aumentavam.

De acordo com o que foi apresentado na revisão bibliográfica, alguns pesquisadores afirmam que quando a posição de fonte de ruído é fixa, os desvios (e a incerteza) são menores. Conclui-se que o campo sonoro na câmara reverberante é fortemente afetado por mudanças na posição da fonte de ruído. Conseqüentemente, as estimativas de incertezas expandidas, U , poderão ser maiores ao se usar mais que uma posição de fonte de ruído. Posições de microfone poderão influenciar consideravelmente os resultados das medições. Então se pode concluir que as medições de L_p devem ser repetidas e avaliadas de forma a tentar reduzir as incertezas (desvios), pois é uma fonte de incerteza predominante neste tipo de medição.

Com relação aos ensaios com fontes de ruído comparadas a fonte sonora de referência (BK 4204), aconteceu o que foi afirmado por (BESSAC e BLANQUART, 2005): as incertezas podem aumentar dramaticamente em função do espectro sonoro *irregular* e com presença de tons puros. A incerteza da fonte BK 4204 foi estimada em torno de 0,15 a 0,17 dB(A); sem considerar a deriva do calibrador sonoro, enquanto que as incertezas estimadas para os L_{WA} do secador de cabelo ensaiado ficaram entre 0,58 e 0,90 dB(A); sem considerar a deriva do calibrador. Desta forma, conclui-se que não há como atribuir o desempenho das medições somente às características da câmara reverberante utilizada, certamente o espectro sonoro da fonte de ruído pode piorar o desempenho das medições através de altos desvios dos níveis de pressão sonora.

Outra conclusão que pode ser notada quanto ao conteúdo espectral dos ruídos investigados é que as bandas com níveis mais elevados (mais energia sonora) são as que predominam nas contribuições para a incerteza dos níveis globais, seja de níveis de pressão sonora ou níveis de potência sonora. Isto foi abordado desde a revisão bibliográfica e durante todas as investigações experimentais de determinações de níveis de potência sonora.

Com relação à investigação de possíveis correlações (interdependências) entre as grandezas de entrada, notou-se que o somatório quadrático das incertezas das diversas bandas de terço de oitava em alguns casos investigados apresentou valores de incertezas consideravelmente

inferiores ao esperado. No Capítulo 6, foram agrupados vários resultados experimentais e calculados desvios padrão e somatórios quadráticos; naquele caso os resultados investigados através de somatório quadrático (que considera grandezas de entrada independentes; sem correlação) produziram valores inferiores aos obtidos através dos desvios padrão dos $L_{WA_globais}$ de alguns resultados de ensaios realizados sem condições de repetitividade. De fato, esta diferença entre as dispersões de resultados experimentais necessita ser mais bem estudada.

Os valores das correções aplicados na equação da norma ISO 3741:1999 são relativamente pequenos e por conseqüência era esperado de antemão que as suas contribuições para as incertezas globais fossem menores ainda.

As correções de temperatura e pressão atmosférica (barométrica), que são modificadas a cada revisão de norma, dependem de estudos de outros parâmetros que estão fora do escopo deste trabalho de tese. Portanto, não se pode afirmar se as correções escolhidas nesta nova (futura) versão²¹³ da norma ISO 3741 serão mantidas, ou novamente na próxima revisão haverá alterações. Uma conclusão se pode ter: *as incertezas das correções têm contribuições pouco significativas se comparadas com as contribuições predominantes, que são as incertezas dos níveis de pressão sonora em campos difusos e dos tempos de reverberação medidos na câmara.*

De fato, foram feitos vários ensaios e estudos adicionais relacionados aos parâmetros envolvidos diretamente ou indiretamente com o processo de medição sob estudo. Por exemplo, a questão de comparar as curvas de respostas de microfones em função da resposta em campo livre dada pelo fabricante e a resposta em campo difuso ensaiada na prática. Concluiu-se que as respostas têm um perfil muito similar, porém para comprovar qualquer relação entre as respostas seriam necessários ainda mais testes, os quais estão além da perspectiva deste trabalho. Também foram avaliados os tempos de reverberação em diversas faixas de decaimentos T_{15} , T_{20} e T_{30} . Porém, na prática, a maioria utilizada nos cálculos de níveis de potência sonora foram os T_{20} , mais fáceis de se obter com o software utilizado; Pulse Labshop versão 9 e versão 10.

As questões de calibração de microfones em campo difuso também são passíveis de revisão. O desenvolvimento das questões metrológicas de calibração de microfones em campo difuso, da calibração de fontes sonoras de referência, e as incertezas estimadas estão em andamento atualmente, SOARES (2005).

²¹³ Que possivelmente será baseada no projeto atual ISO/DIS 3741 (2006).

É possível melhorar os resultados dos L_W determinados através de correções adequadas de campo difuso para os microfones de medição. Especialmente em altas frequências como se pode notar no gráfico de barras da Figura 89.

Foram usados os desvios padrão experimentais para estimar as incertezas padrão u_{Lp} e u_{Trev} , embora seja possível sugerir outros parâmetros, tal como os desvios máximos das amostras experimentais, por exemplo.

De modo generalizado neste trabalho foi observada a predominância de u_{Lp} e u_{Trev} nas contribuições de incertezas. Dificilmente se pode ver as contribuições das incertezas padrão u_V , u_B ou u_f , sendo que esta última nem é considerada no projeto de revisão de norma ISO/DIS 3741 (2006). E foi superestimada em 10 % nos cálculos. Portanto u_f deve ser realmente desconsiderada em função da pequena influência.

Com relação à temperatura, de fato, ela pode afetar vários dos componentes da instrumentação de medição, inclusive o calibrador de nível sonoro, mas nas avaliações somente foi computada a incerteza padrão u_t a qual diz respeito apenas à influência da correção referente à temperatura ambiente. Portanto conclui-se que há dificuldades em separar os componentes de incerteza, e obter todas as informações sobre as grandezas de influência baseando-se apenas na relação funcional f dada pelo mensurando (nível de potência sonora).

A propagação de distribuições de probabilidade como outro método para obter estimativas de incertezas é apontado como um possível trabalho futuro nesta área. Sendo que são quatro as abordagens citadas para a avaliação de incertezas, e apenas uma delas foi investigada no contexto deste trabalho. Portanto, há outras alternativas para se desenvolver estimativas de incertezas além do modelo matemático com propagação de incertezas padrão.

Referências

- BESSAC, F., BLANQUART, B. *Sound power level measurement of air-conditioning units in reverberation room: Estimation of the uncertainties and their use in laboratory*. Acoustique & Techniques. International INCE Symposium, Le Mans, junho 2005.
- BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. (ABNT, INMETRO – *Guia para a expressão da incerteza de medição*. Terceira edição brasileira em língua portuguesa, 2003).
- BLANQUART, B. *Why and how do metrologists organise inter-laboratory comparisons?* Acoustique & Techniques. International INCE Symposium, Le Mans, junho 2005.
- BRINKMANN, K., HIGGINSON, R., NIELSEN, L. *Treatment of measurement uncertainties in international and European standards on acoustics*. Acoustique & Techniques. International INCE Symposium, Le Mans, junho 2005.
- COSTA-FÉLIX. *Modelo de cálculo da incerteza em medições de potência sonora em câmara reverberante pelo método da comparação*. XIX Encontro da SOBRAC, Belo Horizonte, 15 a 19 de abril, 2000.
- DTI – Department of Trade and Industry. *Guide for Manufacturers to the Evaluation of Uncertainties*. Reino Unido. Primeira edição julho de 2000.
- EBBING, MALING, G. *Reverberation-room qualification for determination of sound power sources of discrete-frequency sound*. JASA 54(4), p.947, 1973.
- FAHY, F. *Foundations of engineering acoustics*. Academic Press, 2001.

- FUCHS, G. *Desenvolvimento de uma fonte sonora de referência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- FRADIQUE, J. LEAL, I. M. *Cálculo de incertezas em laboratórios de ensaios acústicos*. Portugal XXX Jornadas Nacionales de Acústica (Tecnicaústica 99) Y Encuentro Ibérico de Acústica Avila. Octubre, 1999.
- GERGES, S. N. Y. *Ruído, Fundamentos e controle*, 2ª ed. NR editora, Florianópolis, 2000.
- GUIA EURACHEM. *Versão em português do GUIA EURACHEM/CITAC, Quantificação da incerteza nas medições analíticas*. Traduzida e adaptada da segunda edição, 2000.
- INMETRO. Portaria INMETRO nº 029, de 10 de março de 1995. Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia.
- INMETRO, RH-METROLOGIA, SBM. *EA-4/02 SI – Suplemento ao documento EA-4/02*, INMETRO e SBM. Tradução autorizada pela *European Co-operation for Accreditation of Laboratories*. 1999.
- INMETRO, RH-METROLOGIA, SBM. *EA-4/02 – Versão Brasileira do documento de referência EA-4/02 – Expressão da incerteza de medição na calibração*. Tradução autorizada pela *European Co-operation for Accreditation of Laboratories*. 1999.
- INMETRO Norma NIT-DICLA-033. *Política para a implementação da estimativa de incerteza de medição em laboratórios de ensaio*. Revisão 01 de junho de 2005.
- INMETRO site: <http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/laboratorios/calibensaios.asp>
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 1183 – Electroacoustics – Random-incidence and diffuse-field calibration of sound level meters. Primeira edição, 1994.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3741 – Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources – Precision methods for broad-band sources in reverberation rooms. Segunda edição, 1988.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3741 – Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation rooms. Terceira edição, 1999.

- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/DIS 3741 (Draft) – Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation test rooms. Projeto de revisão, 07/2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3743-1 – Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources – Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields. Part 1 – Comparison method for hard-walled test rooms. Primeira edição, 1994.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6926 – Acoustics – Requirements for the performance and calibration of reference sound sources used for the determination of sound power levels. Segunda edição, 1999.
- KORTCHMAR, L. *Absorção sonora de baffles*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- MALING, G. *Calculation of the Acoustic Power Radiated by a Monopole in a Reverberation Chamber*. JASA, 42(4), 1967, pp.859-865.
- NABUCO DE ARAUJO. comunicação pessoal e por e-mail, 2005.
- NABUCO DE ARAUJO. comunicação por e-mail, 2004.
- NABUCO DE ARAUJO. *Investigações sobre os parâmetros envolvidos na medição de absorção sonora em câmaras reverberantes: Crítica e revisão da norma*. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2002.
- NABUCO DE ARAUJO. *Medição de potência sonora emitida por liquidificadores em câmaras reverberantes*. 18º Encontro da SOBRAC, 1998.
- PRIEL, Marc. *The approaches for measurement uncertainties evaluation*. Acoustique & Techniques. International INCE Symposium, Le Mans, junho 2005.
- SOARES, Zemar. 2005, comunicação via e-mail.
- VORLÄNDER, M. comunicação pessoal, no LVA-UFSC, Brasil. 2005.

- VORLÄNDER, M. *Revised relation between the sound power and the average sound pressure level in rooms and consequences for acoustics measurements*. *Acustica*, vol 81, 1995, pp 332-343.
- VORLÄNDER, M. **Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB)**. *Intercomparison on sound power measurements by use of reference sound sources – Part 1 – Report of phase II*. Novembro 1993.
- WIESE, Wieland. *Measurement uncertainties for sound field levels in rooms*. *Building Acoustics*, vol 10, n 4, 2003, pp 281-287.
- WITTSTOCK, V. *An analysis of the uncertainty associated with the emission sound pressure level determined by ISO 11201 (Draft)*. PTB, 2003.

Apêndice 1

Neste Apêndice da tese é apresentada uma proposta para colaborar com o desenvolvimento²¹⁴ do projeto da norma ISO 3741. Especificamente nas questões de declarações sobre as estimativas de incertezas de medições; determinações de níveis de potência sonora²¹⁵.

Conforme o estabelecido pelo Comitê Técnico ISO/TC 43 “Acústica” no documento ISO/TC 43 N 1023 de junho de 2004, no item 4, os anexos de normas que tratam de incerteza de medição (calibração e/ou ensaio) devem ter um balanço de incertezas²¹⁶ em forma tabular.

O balanço de incertezas dado na Tabela A.1 deverá ser calculado para cada i -ésima banda de terço de oitava. Alguns dos parâmetros, tais como os desvios relativos aos L_p e T_{rev} medidos, devem ser estimados por cada laboratório. Os valores apresentados na Tabela A.1 são estimativas provenientes do trabalho teórico e experimental desta tese, e portanto **não** são de caráter oficial (obrigatórios ou normalizados). A incerteza devida ao ruído de fundo **não** está incluída neste balanço de incertezas.

Cada laboratório poderá recalculá-lo (e substituir) os valores da Tabela A.1 para que estejam mais consistentes com a realidade específica de suas medições. Os valores na Tabela A.1 são exemplos típicos apenas, e não valores normalizados para serem aplicados diretamente nos cálculos de incertezas. Para obter mais detalhes sobre os cálculos abordados neste apêndice, ver Capítulo 6 – *Modelos de cálculos de incertezas*.

Na Tabela A.2 o coeficiente c_j é dado para o cálculo da incerteza do nível de potência sonora global L_{WA} em dB(A), para que seja encontrada a incerteza do valor em dB deve-se retirar a ponderação dada pelo parâmetro A_j na equação.

²¹⁴ Isto ocorrerá através da publicação (adaptada e traduzida) deste conteúdo em revista científica da área de acústica e/ou metrologia.

²¹⁵ Eventualmente parte do trabalho poderá colaborar para a questão de incertezas de níveis de energia sonora.

²¹⁶ Do original em inglês: *uncertainty budget*.

Tabela A.1 - Proposta de balanço de incertezas para cada i-ésima banda de terço de oitava da determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes pelo método direto. Formato e símbolos similares aos dados no documento EA-4/02-S1 (Suplemento 1 ao EA-4/02) da “European Co-operation for Accreditation of Laboratories”.

Grandeza	Estimativa	Distribuição de probabilidade	Incerteza padrão u_i	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição de incerteza
X_i	x_i		dB	c_i	$c_i u_{I_i}$ dB
δ_{cal} calibrador sonoro	0	Normal	0,053	1	0,053
δ_{mic} incerteza da calibração em campo de pressão do microfone	0	Normal	0,025 ^(a) 0,035 ^(b) 0,060 ^(c)	1	0,025 ^(a) 0,035 ^(b) 0,060 ^(c)
δ_{corr} incerteza da correção do microfone para campo difuso	$\Delta G_D + \Delta_{DP}$ (IEC 61183)	Normal	0,04	1	0,04
δ_{pre} pré-amplificador	***	***	***	***	***
δ_{ana} analisador com filtros de 1/3 de oitava	0	Normal	0,1	1	0,1
u_{ccm} incerteza padrão da cadeia de medição			$\sqrt{u_{cal}^2 + u_{mic}^2 + u_{corr}^2 + u_{pre}^2 + u_{ana}^2}$		0,116 ^(a) 0,119 ^(b) 0,128 ^(c)
L_p nível de pressão sonora	$\overline{L_p}$	Normal	$u(L_p) = \sqrt{u_{ccm}^2 + s^2(L_p)}$	1	
T_{rev} tempo de reverberação	$\overline{T_{rev}}$	Normal	$s(T_{rev})$	c_2	
δ_V volume da câmara reverberante	0		Δ_V	c_3	0,03
δ_S área de superfície da câmara reverb.	0		Δ_S	c_4	***
δ_θ temperatura	0		Δ_θ	c_5	0,02
δ_B pressão barométrica	0		Δ_B	c_6	0,02
δ_A ponderação curva A	***	***	***	***	***

Obs: ^(a) 100 Hz a 1600 Hz, ^(b) 2 a 3,15 kHz, ^(c) 4 a 10 kHz.

Incerteza padrão

combinada por banda de 1/3 de oitava

$$u_c(L_{wi}) = \sqrt{u_{Lp}^2 + u_{Trev}^2 + u_V^2 + u_S^2 + u_\theta^2 + u_B^2}$$

Tabela A.2 - Balanço da incerteza do nível de potência sonora global em dB(A), a partir de cada j-ésima banda de terço de oitava.

δ_{drift} Deriva do calibrador de nível sonoro	0,1 dB				
Incerteza do nível de potência sonora global			$U_{TOTAL} = k \cdot \sqrt{\sum_j c_j^2 \cdot u^2(L_{wj}) + u_{cal}^2} + \delta_{drift}$		
			$c_j = 10^{0,1(L_{wj} + A_j - L_{WA})}$		