

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Rafael Nagi Cruz Gerges

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMA PARA
ENSAIO DE ATENUAÇÃO PASSIVA DE RUÍDO DE
PROTETORES AUDITIVOS PELO MÉTODO
SUBJETIVO**

Florianópolis

2016

Rafael Nagi Cruz Gerges

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMA PARA
ENSAIO DE ATENUAÇÃO PASSIVA DE RUÍDO DE
PROTETORES AUDITIVOS PELO MÉTODO
SUBJETIVO**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Me-
cânica para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Erasmo Felipe Ver-
gara Miranda, Dr. Eng.

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gerges, Rafael Nagi Cruz

Avaliação metrológica de sistema para ensaio de atenuação passiva de ruído de protetores auditivos pelo método subjetivo / Rafael Nagi Cruz Gerges ; orientador, Erasmo Felipe Vergara Miranda - Florianópolis, SC, 2016.
283 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Protetores auditivos. 3. Atenuação de ruído. 4. Incerteza de ensaio. I. Miranda, Erasmo Felipe Vergara. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Rafael Nagi Cruz Gerges

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMA PARA
ENSAIO DE ATENUAÇÃO PASSIVA DE RUÍDO DE
PROTETORES AUDITIVOS PELO MÉTODO
SUBJETIVO**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 6 de Dezembro 2016.

Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador

Banca Examinadora:

Erasmio Felipe Vergara Miranda, Dr. Eng.
Presidente

Júlio Apolinário Cordioli, Dr. Eng.

Tiago Loureiro Fígaro da Costa Pinto, Dr. Eng.

Júlio Alexandre de Matheucci e Silva Teixeira, Dr. Eng.

Dedico este trabalho a toda minha família, minha mãe Márcia, minha irmã Nina Rosa, minha vó Célia e, principalmente, ao meu pai Samir e a todos aqueles que participam da minha vida de forma direta ou indireta.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois a Ele, tudo pertence.

À minha família, Samir, Márcia e Nina Rosa Gerges pelo apoio e amor incondicional e a toda minha família por sempre estar presente na minha vida.

Ao meu pai Samir Gerges e ao meu orientador Felipe Vergara pelos ensinamentos e direcionamentos realizados neste trabalho.

Aos professores do Laboratório de Vibração e Acústica (LVA), Júlio Cordioli, Roberto Jordan, Arcanjo Lenzi, Felipe Vergara, pelos ensinamentos e a todos os demais integrantes do laboratório que de alguma forma me ajudaram.

Ao Felipe Nascimento pelas realizações dos ensaios que forneceram os dados necessários para realizar este trabalho, à minha mãe Márcia e irmã Nina Rosa pelas correções realizadas nesse trabalho.

A todos os meus amigos e amigas que estiveram, estão ou estarão presentes na minha vida.

Ninguém chega a lugar algum sozinho.

Carlos Evandro Albernaz Muniz Neto e
Luiz Vicente Soares da Silva

RESUMO

Desde 2000, o Brasil vem adotando a Norma ANSI S12.6 como norma de ensaio de atenuação de ruído de protetores auditivos. Essa norma de ensaio é baseada em um método subjetivo denominado *Real Ear Attenuation at Threshold* (REAT), que consiste na determinação dos limiares auditivos sem e com o protetor auditivo de sujeitos pré-selecionados (ouvintes) de acordo com sua acuidade auditiva. A diferença entre esses limiares é a atenuação de ruído do protetor auditivo. Os ensaios são realizados com diversos ouvintes e com alguns ciclos (repetições) de medições com cada ouvinte, obtendo-se assim uma média e desvio padrão de atenuação de ruído para cada protetor auditivo. O ensaio de atenuação de ruído de protetores auditivos, conforme o método REAT, é realizado utilizando-se um sistema de ensaio computadorizado, os ouvintes e uma sala de ensaio responsável por prover um ambiente acústico adequado. Não existem sistemas de ensaios perfeitos, desta forma é impossível medir sem cometer erros de medição. Esses erros, apesar de serem indesejados, não impedem que informações confiáveis sejam obtidas sobre o mensurando. A Norma ANSI S12.6 e as equivalentes ISO 4869-1 e ISO 4869-5 não trazem informações suficientes sobre a incerteza de atenuação do ensaio. Para avaliar essa incerteza pelo método REAT, é utilizada a metodologia apresentada no Guia para a Expressão de Incerteza de Medição (ISO-GUM), avaliando os equipamentos, os parâmetros de ensaio, campo acústico da sala de ensaio e a resposta dos ouvintes para determinar as incertezas dos limiares auditivos com e sem o protetor auditivo, da atenuação individual de cada ouvinte e da atenuação média do ensaio. A metodologia desenvolvida foi aplicada em ensaios de protetores auditivos tipo concha, concha acoplável ao capacete de segurança e plugue, estimando a incerteza expandida na faixa entre $\pm 3,5$ dB e $\pm 6,5$ dB dependendo do tipo de protetor auditivo e do número de ouvintes utilizados. As fontes de incerteza mais significativas são os ouvintes e o sistema de medição, além disso constatou-se que o número de ouvintes afeta de forma significativa a incerteza da atenuação do ensaio.

Palavras-chave: Protetores auditivos. Atenuação de ruído. Incerteza de ensaio.

ABSTRACT

Since 2000, Brazil has adopted the standard ANSI S12.6 as a noise attenuation test standard for hearing protectors. This test standard is based on a subjective method called Real Ear Attenuation at Threshold (REAT), which consists of determining the thresholds of hearing without and with the hearing protector of pre-selected subjects according to their auditory acuity. The difference between these thresholds of hearing is the noise attenuation of the hearing protector. The tests are performed with several subjects and with some cycles (repetitions) of measurements with each subject, obtaining a mean and standard deviation of noise attenuation for each hearing protector. The noise attenuation test of hearing protectors according to subjective method is performed using a computerized test system, the subjects and a test room responsible for providing an adequate acoustic environment. There are no perfect test systems, so it is impossible to measure without making measurement errors. These errors, despite being undesired, do not prevent reliable information from being obtained on the measurand. ANSI S12.6 standard and the equivalents standards ISO 4869-1 and ISO 4869-5 do not provide sufficient information on the attenuation uncertainty of the test. In order to evaluate the attenuation uncertainty of the hearing protector test using the REAT method, the methodology presented in the Guide for Measurement Uncertainty Expression (ISO-GUM) is used, evaluating the equipment, the test parameters, the acoustic field of the test room and the response of the subjects to determine the uncertainty of the thresholds of hearing with and without the hearing protector, the individual attenuation of each subject and the average attenuation of the test. The developed methodology was applied in test of earmuffs, earmuffs attached to hard hat and plugs, estimating an expanded uncertainty in the range of $\pm 3,5$ dB e $\pm 6,5$ dB depending on the type of hearing protector and the number of subjects used. The most significant uncertainty sources are the subjects and the measurement system, in addition it was found that the number of subjects significantly affects the uncertainty of the attenuation test.

Keywords: Hearing protectors. Noise attenuation. Uncertainty.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 2.1 | Pressão acústica..... | 39 |
| Figura 2.2 | Orelha humana..... | 41 |
| Figura 2.3 | Processamento do som nos seres humanos..... | 41 |
| Figura 2.4 | Área de audição dos seres humanos..... | 42 |
| Figura 2.5 | Elementos do problema de controle de ruído..... | 43 |
| Figura 2.6 | Tipos de protetores auditivos..... | 45 |
| Figura 2.7 | Protetor auditivo tipo automoldável..... | 46 |
| Figura 2.8 | Protetor auditivo tipo pré-moldável..... | 48 |
| Figura 2.9 | Protetor auditivo tipo moldável..... | 49 |
| Figura 2.10 | Protetor auditivo tipo personalizado..... | 50 |
| Figura 2.11 | Protetor auditivo tipo semi-inserção..... | 51 |
| Figura 2.12 | Protetor auditivo tipo concha..... | 52 |
| Figura 2.13 | Protetor auditivo tipo concha acoplável ao capacete de segurança..... | 53 |
| Figura 2.14 | Protetor auditivo tipo capacete..... | 53 |
| Figura 2.15 | Exemplo de utilização de filtro passivo..... | 54 |
| Figura 2.16 | Exemplo de atenuação obtida com e sem o filtro passivo..... | 55 |
| Figura 2.17 | Técnica de cancelamento de ruído..... | 55 |
| Figura 2.18 | Exemplo de protetores auditivos com filtro ativo..... | 56 |
| Figura 2.19 | Diagrama de bloco dos quatro caminhos que o ruído percorre em um ouvido protegido..... | 57 |
| Figura 2.20 | Caminhos de transmissão do ruído..... | 57 |
| Figura 2.21 | Organograma dos métodos de medição de atenuação de ruído..... | 59 |
| Figura 2.22 | Exemplos de ATFs..... | 60 |
| Figura 2.23 | Exemplos de mini microfone e aplicação..... | 62 |
| Figura 2.24 | Métricas para medição de atenuação de ruído..... | 64 |
| Figura 2.25 | Organograma dos métodos e normas de medições de atenuação de ruído de protetores auditivos..... | 67 |
| Figura 2.26 | Diagrama da cadeia de medição..... | 75 |
| Figura 2.27 | Determinação do limiar de audição..... | 76 |
| Figura 2.28 | Exemplo do dispositivo de controle, botão de resposta..... | 77 |
| Figura 2.29 | Cálculo de atenuação do ensaio pelo método REAT... .. | 77 |

| | |
|---|-----|
| Figura 2.30 Diagrama do sistema desenvolvido por Lima em 2003. | 78 |
| Figura 2.31 Resultado da medição. | 80 |
| Figura 2.32 Fontes de erros de medição. | 82 |
| Figura 2.33 Fluxograma do processo de determinação da incerteza e expressão do resultado de medição. | 83 |
| Figura 2.34 Sensibilidade de um sistema de medição linear e não linear. | 84 |
| Figura 2.35 Correção de um erro sistemático. | 85 |
| Figura 2.36 Três distribuições de probabilidade e seus desvios padrão. | 87 |
| Figura 2.37 Distribuição de probabilidade normal. | 91 |
| Figura 2.38 Hierarquia de padrões e sua rastreabilidade às unidades do sistema internacional. | 93 |
| Figura 3.1 Traço do limiar de audição. | 99 |
| Figura 3.2 Diagrama das fontes de incerteza. | 101 |
| Figura 3.3 Cadeia do sistema de medição. | 102 |
| Figura 3.4 Representação binária. | 104 |
| Figura 3.5 Conversor DAC. | 106 |
| Figura 3.6 Representação do DAC. | 106 |
| Figura 3.7 Processo de reconstrução do sinal. | 109 |
| Figura 3.8 Erro devido à reconstrução do sinal. | 110 |
| Figura 3.9 Representação do erro de offset do DAC. | 111 |
| Figura 3.10 Interação da bobina móvel, ímã permanente e diafragma. | 112 |
| Figura 3.11 Representação do erro de ganho do DAC. | 114 |
| Figura 3.12 Representação do sinal amostrado com erros. | 116 |
| Figura 3.13 Resposta em frequência. | 117 |
| Figura 3.14 Erro devido à deriva térmica. | 118 |
| Figura 3.15 Cabo conectando a placa DSAG à caixa acústica. | 121 |
| Figura 3.16 Circuito simplificado com gerador, 2 cabos e 2 cargas. | 123 |
| Figura 3.17 Resposta em frequência do cabo. | 124 |
| Figura 3.18 Circuito com cabo blindado e estrutura do cabo. | 125 |
| Figura 3.19 Esquemático das caixas acústicas. | 127 |
| Figura 3.20 Resposta em frequência das 2 caixas acústicas. | 131 |
| Figura 3.21 Exemplo de Curva Característica de Resposta. | 134 |
| Figura 3.22 Ponto de referência na sala de ensaio. | 137 |
| Figura 3.23 Curva Característica de Resposta em 125 Hz. | 138 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.24 Curva Característica de Resposta em 250 Hz..... | 139 |
| Figura 3.25 Curva Característica de Resposta em 500 Hz..... | 139 |
| Figura 3.26 Curva Característica de Resposta em 1000 Hz..... | 140 |
| Figura 3.27 Curva Característica de Resposta em 2000 Hz..... | 140 |
| Figura 3.28 Curva Característica de Resposta em 4000 Hz..... | 141 |
| Figura 3.29 Curva Característica de Resposta em 8000 Hz..... | 141 |
| Figura 3.30 Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 125 Hz..... | 145 |
| Figura 3.31 Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 250 Hz..... | 145 |
| Figura 3.32 Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 500 Hz..... | 146 |
| Figura 3.33 Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 1000 Hz..... | 146 |
| Figura 3.34 Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 2000 Hz..... | 147 |
| Figura 3.35 Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 4000 Hz..... | 147 |
| Figura 3.36 Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 8000 Hz..... | 148 |
| Figura 3.37 Estimativa da incerteza padrão da CCR em 125 Hz. . . | 150 |
| Figura 3.38 Estimativa da incerteza padrão da CCR em 250 Hz. . . | 151 |
| Figura 3.39 Estimativa da incerteza padrão da CCR em 500 Hz. . . | 151 |
| Figura 3.40 Estimativa da incerteza padrão da CCR em 1000 Hz. . . | 152 |
| Figura 3.41 Estimativa da incerteza padrão da CCR em 2000 Hz. . . | 152 |
| Figura 3.42 Estimativa da incerteza padrão da CCR em 4000 Hz. . . | 153 |
| Figura 3.43 Estimativa da incerteza padrão da CCR em 8000 Hz. . . | 153 |
| Figura 3.44 Estimativa da incerteza padrão do SM em 125 Hz. | 154 |
| Figura 3.45 Estimativa da incerteza padrão do SM em 250 Hz. | 155 |
| Figura 3.46 Estimativa da incerteza padrão do SM em 500 Hz. | 155 |
| Figura 3.47 Estimativa da incerteza padrão do SM em 1000 Hz. | 156 |
| Figura 3.48 Estimativa da incerteza padrão do SM em 2000 Hz. | 156 |
| Figura 3.49 Estimativa da incerteza padrão do SM em 4000 Hz. | 157 |
| Figura 3.50 Estimativa da incerteza padrão do SM em 8000 Hz. | 157 |
| Figura 3.51 Incremento de amplitude. | 158 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.52 Média dos desvios padrão em função da frequência. | 159 |
| Figura 3.53 Pontos de medição da uniformidade sonora. | 163 |
| Figura 3.54 Esquemático da sala de ensaio. | 164 |
| Figura 3.55 Exemplo do histograma da resposta dos ouvintes. | 168 |
| Figura 3.56 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 125 Hz. | 170 |
| Figura 3.57 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 250 Hz. | 170 |
| Figura 3.58 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 500 Hz. | 171 |
| Figura 3.59 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 1000 Hz. | 171 |
| Figura 3.60 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 2000 Hz. | 172 |
| Figura 3.61 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 4000 Hz. | 172 |
| Figura 3.62 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 8000 Hz. | 173 |
| Figura 3.63 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 125 Hz. | 173 |
| Figura 3.64 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 250 Hz. | 174 |
| Figura 3.65 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 500 Hz. | 174 |
| Figura 3.66 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 1000 Hz. | 175 |
| Figura 3.67 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 2000 Hz. | 175 |
| Figura 3.68 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 4000 Hz. | 176 |
| Figura 3.69 Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 8000 Hz. | 176 |
| Figura 3.70 Estimativa da incerteza padrão do SM. | 178 |
| Figura 3.71 NRR_{SF} com nível de proteção de 84%. | 188 |
| Figura 3.72 Estimativa da incerteza padrão do NRR_{SF} | 189 |
| Figura 4.1 Traço do limiar de audição aberto da série B do ouvinte 5. | 192 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 4.2 | Contribuição das fontes de incerteza do ouvinte 5. | 208 |
| Figura 4.3 | Atenuação e incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo concha. | 211 |
| Figura 4.4 | Incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo concha. | 212 |
| Figura 4.5 | Atenuação e incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo concha acoplável ao capacete de segurança. | 213 |
| Figura 4.6 | Incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo concha acoplável ao capacete de segurança. | 214 |
| Figura 4.7 | Atenuação e incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo plugue. | 215 |
| Figura 4.8 | Incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo plugue. | 216 |
| Figura 4.9 | Análise de sensibilidade do NRR_{SF} e sua estimativa de incerteza para protetor auditivo tipo concha. | 218 |
| Figura 4.10 | Análise de sensibilidade do NRR_{SF} e sua estimativa de incerteza para protetor auditivo tipo concha acoplável ao capacete de segurança. | 219 |
| Figura 4.11 | Análise de sensibilidade do NRR_{SF} e sua estimativa de incerteza para protetor auditivo tipo plugue. | 220 |
| Figura 4.12 | Análise de sensibilidade do NRR_{SF} e sua estimativa de incerteza para os 3 modelos de protetores auditivos. | 221 |
| Figura B.1 | Circuito L. | 240 |
| Figura B.2 | Cabo coaxial. | 240 |
| Figura B.3 | Circuito equivalente com gerador, cabo e carga. | 241 |
| Figura B.4 | Circuito equivalente com gerador, 2 cabos e 2 cargas. | 242 |
| Figura B.5 | Circuito simplificado com gerador, 2 cabos e 2 cargas. | 242 |
| Figura C.1 | Curva Característica de Resposta em 125 Hz. | 247 |
| Figura C.2 | Curva Característica de Resposta em 250 Hz. | 248 |
| Figura C.3 | Curva Característica de Resposta em 500 Hz. | 248 |
| Figura C.4 | Curva Característica de Resposta em 1000 Hz. | 249 |
| Figura C.5 | Curva Característica de Resposta em 2000 Hz. | 249 |
| Figura C.6 | Curva Característica de Resposta em 4000 Hz. | 250 |
| Figura C.7 | Curva Característica de Resposta em 8000 Hz. | 250 |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|-------------|---|-----|
| Quadro 2.1 | Comparação entre normas de ensaio pelo método REAT. | 68 |
| Quadro 2.2 | Valores de α para vários níveis de proteção. | 73 |
| Quadro 2.3 | Diferenças entre as placas DSAG utilizadas no sistema. | 79 |
| Quadro 2.4 | Faixa de abrangência e probabilidade. | 90 |
| Quadro 2.5 | Incerteza do ensaio de acordo com ISO 4869-5. | 96 |
| Quadro 2.6 | Estimativa da repetibilidade. | 97 |
| Quadro 2.7 | Estimativa da reprodutibilidade. | 97 |
| Quadro 2.8 | Estimativa da repetibilidade. | 98 |
| Quadro 2.9 | Estimativa da reprodutibilidade. | 98 |
| Quadro 3.1 | Incerteza padrão do computador e software. | 105 |
| Quadro 3.2 | Incerteza padrão da placa DSAG em volts. | 120 |
| Quadro 3.3 | Incerteza padrão da placa DSAG em dB. | 120 |
| Quadro 3.4 | Parâmetros do cabo coaxial. | 122 |
| Quadro 3.5 | Incerteza padrão das caixas acústicas em volts. | 132 |
| Quadro 3.6 | Incerteza padrão das caixas acústicas em dB. | 132 |
| Quadro 3.7 | Correção do sistema de medição. | 142 |
| Quadro 3.8 | Incerteza padrão do sistema de medição. | 143 |
| Quadro 3.9 | Incerteza padrão dos parâmetros de ensaio. | 162 |
| Quadro 3.10 | Incerteza padrão do campo acústico. | 166 |
| Quadro 3.11 | Estimativa da incerteza padrão do sistema de medição. | 179 |
| Quadro 3.12 | Estimativa da incerteza padrão dos parâmetros do ensaio e campo acústico. | 179 |
| Quadro 3.13 | Coefficiente de correlação entre os limiares de audição fechado e aberto. | 182 |
| Quadro 3.14 | Coefficiente de correlação entre as atenuações dos ouvintes. | 184 |
| Quadro 3.15 | Ruído rosa em dBC e dBA. | 187 |
| Quadro 4.1 | Limiares de audição em dB. | 193 |
| Quadro 4.2 | Atenuação das séries de cada ouvinte em dB. | 194 |
| Quadro 4.3 | Atenuação de cada ouvinte em dB. | 195 |
| Quadro 4.4 | Atenuação e desvio padrão do ensaio em dB. | 195 |
| Quadro 4.5 | Incerteza padrão do sistema de medição em dB . | 196 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Quadro 4.6 | Incerteza padrão dos PE e CA em dB..... | 197 |
| Quadro 4.7 | Incerteza padrão da resposta do ouvinte em dB..... | 198 |
| Quadro 4.8 | Incerteza padrão do limiar de audição em dB..... | 200 |
| Quadro 4.9 | Graus de liberdade do limiar de audição..... | 201 |
| Quadro 4.10 | Incerteza padrão da atenuação das séries de cada ouvinte em dB..... | 202 |
| Quadro 4.11 | Graus de liberdade da atenuação de cada série..... | 203 |
| Quadro 4.12 | Incerteza padrão da atenuação média de cada ouvinte em dB..... | 204 |
| Quadro 4.13 | Graus de liberdade da atenuação média de cada ouvinte..... | 205 |
| Quadro 4.14 | Incerteza padrão do ensaio em dB..... | 205 |
| Quadro 4.15 | Estimativa da incerteza expandida da atenuação do ensaio..... | 207 |
| Quadro 4.16 | Contribuição das fontes de incerteza do ouvinte 5.... | 208 |
| Quadro 4.17 | Resultado do ensaio de atenuação de ruído em dB.... | 210 |
| Quadro C.1 | Correção de dB para dBA em bandas de frequência de 1/1 de oitava..... | 247 |
| Quadro C.2 | NPS medidos em 125 Hz..... | 251 |
| Quadro C.3 | NPS medidos em 250 Hz..... | 252 |
| Quadro C.4 | NPS medidos em 500 Hz..... | 253 |
| Quadro C.5 | NPS medidos em 1000 Hz..... | 254 |
| Quadro C.6 | NPS medidos em 2000 Hz..... | 255 |
| Quadro C.7 | NPS medidos em 4000 Hz..... | 256 |
| Quadro C.8 | NPS medidos em 8000 Hz..... | 257 |
| Quadro E.1 | Erro máximo de cada banda de frequência do ensaio. | 277 |
| Quadro E.2 | NPS relativo ao ponto de referência em 125 Hz..... | 277 |
| Quadro E.3 | NPS relativo ao ponto de referência em 250 Hz..... | 277 |
| Quadro E.4 | NPS relativo ao ponto de referência em 500 Hz..... | 277 |
| Quadro E.5 | NPS relativo ao ponto de referência em 1000 Hz. | 278 |
| Quadro E.6 | NPS relativo ao ponto de referência em 2000 Hz. | 278 |
| Quadro E.7 | NPS relativo ao ponto de referência em 4000 Hz. | 278 |
| Quadro E.8 | NPS relativo ao ponto de referência em 8000 Hz. | 278 |
| Quadro A.1 | Coefficiente t de <i>Student</i> | 281 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

| | |
|-------------------|--|
| ADC | <i>Analogic to Digital Converter</i> |
| AIL | <i>Active Insertion Loss</i> |
| APV | <i>Assumed Protection Values</i> |
| ATF | <i>Acoustic Test Fixture</i> |
| BIPM | Bureau Internacional de Pesos e Medidas |
| CA | Campo Acústico |
| CCR | Curva Característica de Resposta |
| CGCRE | Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO |
| CIPM | Comitê Internacional de Pesos e Medidas |
| DAC | <i>Digital to Analogic Converter</i> |
| DSAG | <i>Dynamic Signal Acquisition and Generation</i> |
| EPI | Equipamento de Proteção Individual |
| GUM | <i>Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement</i> |
| HML | <i>High Medium Low</i> |
| IL | <i>Insertion Loss</i> |
| IPIL | <i>Impulsive Peak Insertion Loss</i> |
| ISO | <i>Internacional Organization for Standardization</i> |
| LAEPI | Laboratório de Equipamentos de Proteção Individual |
| LSB | <i>Least Significant Bit</i> |
| MIRE | <i>Microphone In Real Ear</i> |
| MSB | <i>Most Significant Bit</i> |
| MTE | Ministério do Trabalho e Emprego |
| NPS | Nível de Pressão Sonora |
| NIOSH | <i>National Institute for Occupational Safety and Health</i> |
| NR | Norma Regulamentadora |
| NR | <i>Noise Reduction</i> |
| NRR | Nível de Redução de Ruído |
| NRR _{SF} | Nível de Redução de Ruído com colocação do protetor auditivo pelo sujeito de teste |
| NRS _A | <i>Noise Level Reduction Statistic for use with A-weighting</i> |
| NRS _G | <i>Noise Level Reduction Statistic, Graphical</i> |
| PAIR | Perda de Audição Induzida por Ruído |

| | |
|--------------------|---|
| PE | Parâmetros de Ensaio |
| PIL | <i>Passive Insertion Loss</i> |
| REAT | <i>Real Ear Attenuation at Threshold</i> |
| RMS | <i>Root Mean Square</i> |
| SFDC | <i>Spurious Free Dynamic Range</i> |
| SM | Sistema de medição |
| SNR | <i>Single Number Rating</i> |
| SNR | <i>Signal to Noise Ratio</i> |
| TFOE | <i>Transfer Function of Open Ear</i> |
| THD | <i>Total Harmonic Distortion</i> |
| TIL | <i>Total Insertion Loss</i> |
| TIL _{NPS} | <i>Total Insertion Loss with level dependence</i> |
| TL | <i>Transmission Loss</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|------------|------------|-------------------------------|
| A | dB | Atenuação |
| c | - | Coefficiente de sensibilidade |
| C | F | Capacitância |
| C | - | Correção |
| f | Hz | Frequência |
| G | S | Condutância |
| i | A | Corrente elétrica |
| I | dB | Inversão |
| L | H | Indutância |
| L | dB | Limiar de audição |
| LA | dB | Limiar de audição aberto |
| LF | dB | Limiar de audição fechado |
| NPS | dB | Nível de Pressão Sonora |
| P | Pa | Pressão acústica |
| r | - | Coefficiente de correlação |
| R | Ω | Resistência |
| RM | - | Resultado da medição |
| s | - | Desvio padrão |
| t | s | Tempo |
| t | - | Coefficiente t de {Student} |
| T | s | Período |
| V | V | Volts |
| VC | - | Valor Convencional |
| u | - | Incerteza padrão |
| U | - | Incerteza expandida |
| Z | Ω | Impedância |
| ν | - | Graus de liberdade |
| δ | m | Profundidade pelicular |
| ϵ | F/m | Permissividade elétrica |
| μ | H/m | Permeabilidade magnética |
| σ | Ω/m | Condutividade elétrica |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 35 |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO | 35 |
| 1.2 MOTIVAÇÃO E NECESSIDADES | 36 |
| 1.3 OBJETIVO GERAL | 36 |
| 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 36 |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO | 37 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 39 |
| 2.1 RUÍDO E A ORELHA HUMANA | 39 |
| 2.2 PROTETORES AUDITIVOS | 44 |
| 2.2.1 Tipos de protetores auditivos | 44 |
| 2.2.1.1 Automoldável | 46 |
| 2.2.1.2 Pré-moldável | 47 |
| 2.2.1.3 Moldável | 48 |
| 2.2.1.4 Personalizado | 49 |
| 2.2.1.5 Semi-inserção | 50 |
| 2.2.1.6 Concha | 51 |
| 2.2.1.7 Concha acoplável ao capacete de segurança | 52 |
| 2.2.1.8 Capacete | 53 |
| 2.2.1.9 Especiais | 54 |
| 2.2.2 Mecanismos de atenuação de protetores auditivos .. | 57 |
| 2.2.3 Métodos de ensaio de atenuação de ruído | 58 |
| 2.2.3.1 ATF (<i>Acoustic Test Fixture</i>) | 59 |
| 2.2.3.2 MIRE (<i>Microphone In Real Ear</i>) | 61 |
| 2.2.3.3 REAT (<i>Real Ear Attenuation at Threshold</i>) | 62 |
| 2.2.4 Métricas de medição de atenuação de ruído | 64 |
| 2.2.5 Normas de ensaio de atenuação de ruído | 66 |
| 2.2.6 Números de atenuação de ruído | 70 |
| 2.2.6.1 Método Longo | 71 |
| 2.2.6.2 NRR | 71 |
| 2.2.6.3 NRR_{SF} | 72 |
| 2.2.6.4 SNR | 73 |
| 2.2.6.5 HML | 74 |
| 2.2.6.6 NRS_A | 74 |
| 2.2.6.7 NRS_G | 74 |
| 2.3 INSTRUMENTAÇÃO | 75 |
| 2.3.1 Sistema de medição desenvolvido | 78 |
| 2.4 O PAPEL DA METROLOGIA EM MEDIÇÕES | 79 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| 2.4.1 | Sensibilidade | 84 |
| 2.4.2 | Correção | 84 |
| 2.4.3 | Incerteza padrão | 85 |
| 2.4.3.1 | Incerteza padrão Tipo A | 86 |
| 2.4.3.2 | Incerteza padrão Tipo B | 87 |
| 2.4.4 | Incerteza combinada | 88 |
| 2.4.5 | Número de graus de liberdade efetivos | 89 |
| 2.4.6 | Incerteza expandida | 90 |
| 2.4.7 | Expressão do resultado | 91 |
| 2.4.8 | Medição Direta e Indireta | 91 |
| 2.4.9 | Rastreabilidade e calibração | 92 |
| 2.4.10 | Metrologia nos ensaios de atenuação passiva de ruído de protetores auditivos pelo método REAT .. | 94 |
| 3 | AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO ENSAIO | 99 |
| 3.1 | DETERMINAÇÃO DO LIMIAR DE AUDIÇÃO | 99 |
| 3.2 | AVALIAÇÃO METROLÓGICA DA DETERMINAÇÃO DO LIMIAR DE AUDIÇÃO | 100 |
| 3.2.1 | Sistema de medição | 102 |
| 3.2.1.1 | Computador e software | 103 |
| 3.2.1.1.1 | <i>Truncamento</i> | 103 |
| 3.2.1.1.2 | <i>Correção e incerteza padrão combinada</i> | 104 |
| 3.2.1.2 | Placa DSAG | 105 |
| 3.2.1.2.1 | <i>Erro de quantização</i> | 105 |
| 3.2.1.2.2 | <i>Erro de reconstrução do sinal</i> | 108 |
| 3.2.1.2.3 | <i>Erro de offset</i> | 111 |
| 3.2.1.2.4 | <i>Erro de ganho</i> | 113 |
| 3.2.1.2.5 | <i>Erro devido aos ruídos</i> | 115 |
| 3.2.1.2.6 | <i>Erro da resposta em frequência</i> | 117 |
| 3.2.1.2.7 | <i>Erro devido à deriva térmica</i> | 117 |
| 3.2.1.2.8 | <i>Erro devido à deriva temporal</i> | 118 |
| 3.2.1.2.9 | <i>Correção e incerteza padrão combinada</i> | 120 |
| 3.2.1.3 | Cabos | 121 |
| 3.2.1.3.1 | <i>Erro da resposta em frequência</i> | 122 |
| 3.2.1.3.2 | <i>Erro devido ao ruído</i> | 124 |
| 3.2.1.3.3 | <i>Erro devido à deriva térmica</i> | 126 |
| 3.2.1.3.4 | <i>Erro devido à deriva temporal</i> | 126 |
| 3.2.1.3.5 | <i>Correção e incerteza padrão combinada</i> | 126 |
| 3.2.1.4 | Caixas acústicas e trajetória acústica | 127 |
| 3.2.1.4.1 | <i>Erro devido ao ruído</i> | 128 |
| 3.2.1.4.2 | <i>Erro devido à distorção harmônica</i> | 128 |
| 3.2.1.4.3 | <i>Erro de linearidade</i> | 129 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| 3.2.1.4.4 | <i>Erro da resposta em frequência</i> | 130 |
| 3.2.1.4.5 | <i>Correção e incerteza padrão combinada</i> | 132 |
| 3.2.1.5 | Sensibilidade do sistema de medição | 133 |
| 3.2.1.5.1 | <i>Procedimento de avaliação</i> | 133 |
| 3.2.1.5.2 | <i>Procedimento de medição</i> | 136 |
| 3.2.1.5.3 | <i>Resultados</i> | 138 |
| 3.2.1.6 | Correção | 142 |
| 3.2.1.7 | Incerteza padrão | 142 |
| 3.2.1.7.1 | <i>Incerteza padrão dos equipamentos</i> | 143 |
| 3.2.1.7.2 | <i>Incerteza padrão do sistema de referência</i> | 148 |
| 3.2.1.7.3 | <i>Incerteza padrão da CCR</i> | 149 |
| 3.2.1.7.4 | <i>Incerteza padrão do sistema de medição</i> | 154 |
| 3.2.2 | Parâmetros de ensaio | 158 |
| 3.2.2.1 | Incremento de amplitude | 158 |
| 3.2.2.2 | Resolução | 161 |
| 3.2.2.3 | Incerteza padrão dos parâmetros de ensaio | 162 |
| 3.2.3 | Campo acústico | 162 |
| 3.2.3.1 | Procedimento de avaliação | 164 |
| 3.2.3.2 | Procedimento de medição | 165 |
| 3.2.3.3 | Incerteza padrão do campo acústico | 166 |
| 3.2.4 | Ouvinte e amostra do protetor auditivo | 166 |
| 3.2.4.1 | Distribuição de probabilidade da resposta do ouvinte | 168 |
| 3.2.4.2 | Incerteza padrão da resposta do ouvinte | 177 |
| 3.2.5 | Incerteza padrão do limiar de audição | 177 |
| 3.2.6 | Contribuição das fontes de incerteza | 180 |
| 3.3 | DETERMINAÇÃO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA ATENUAÇÃO DO ENSAIO | 180 |
| 3.4 | AVALIAÇÃO METROLÓGICA DA ATENUAÇÃO DO ENSAIO | 181 |
| 3.4.1 | Incerteza padrão da atenuação média dos ouvintes | 181 |
| 3.4.2 | Incerteza padrão da média da atenuação | 185 |
| 3.4.3 | Incerteza padrão da atenuação do ensaio | 186 |
| 3.4.4 | Incerteza expandida da atenuação do ensaio | 186 |
| 3.5 | DETERMINAÇÃO DO NRR_{SF} | 187 |
| 3.6 | AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO NRR_{SF} | 188 |
| 3.6.1 | Incerteza padrão do NRR_{SF} | 188 |
| 3.6.2 | Incerteza expandida do NRR_{SF} | 190 |
| 4 | RESULTADOS | 191 |
| 4.1 | ESTUDO DE CASO | 191 |
| 4.1.1 | Determinação da atenuação e desvio padrão do ensaio | 191 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1.2 | Determinação da incerteza da atenuação do ensaio | 195 |
| 4.1.3 | Contribuição das fontes de incerteza | 207 |
| 4.1.4 | Determinação do NRR_{SF} | 209 |
| 4.1.5 | Determinação da incerteza do NRR_{SF} | 209 |
| 4.1.6 | Resultado do ensaio | 210 |
| 4.2 | AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE ENSAIO DE PROTE- TORES AUDITIVOS TIPO CONCHA | 211 |
| 4.3 | AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE ENSAIO DE PROTE- TORES AUDITIVOS TIPO CONCHA ACOPLÁVEL AO CAPACETE DE SEGURANÇA | 213 |
| 4.4 | AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE ENSAIO DE PROTE- TORES AUDITIVOS TIPO PLUGUE | 215 |
| 4.5 | AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE ENSAIO DE PROTE- TORES AUDITIVOS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE OU- VINTES | 217 |
| 5 | CONCLUSÕES | 223 |
| 5.1 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 223 |
| 5.2 | PROPOSTAS DE FUTUROS ESTUDOS | 225 |
| | REFERÊNCIAS | 227 |
| | APÊNDICE A – Erro em dB e NPS | 235 |
| | APÊNDICE B – Modelo elétrico do cabo | 239 |
| | APÊNDICE C – Determinação da curva caraterística de resposta do sistema de medição | 247 |
| | APÊNDICE D – Incerteza padrão do sistema de referência | 261 |
| | APÊNDICE E – Resultado das medições do campo acústico | 277 |
| | ANEXO A – Coeficiente t de Student | 281 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Em diversas situações, os trabalhadores estão expostos a ruídos durante suas jornadas de trabalho que podem ultrapassar o limite permitido pela legislação vigente. Quando não há possibilidades de empregar técnicas de controle de ruído de imediato em um ambiente ruidoso ou até que ações sejam tomadas para reduzi-lo até o limite permitido, o protetor auditivo se torna uma solução viável e prática para reduzir o nível de exposição ao ruído dos trabalhadores. Para selecionar corretamente o protetor auditivo para um ambiente qualquer, é necessário quantificar a atenuação de ruído fornecida pela utilização do protetor auditivo. Existem, basicamente, 3 métodos para determinar a atenuação de ruído de protetores auditivos em laboratório:

1. ATF (*Acoustic Test Fixture*): medição objetiva realizada com um ou dois microfone(s) instalado(s) em uma cabeça ou torço artificial que simula o ser humano;
2. MIRE (*Microphone In Real Ear*): medição objetiva realizada com um ou dois microfone(s) em miniatura instalado(s) no ouvido de um ser humano;
3. REAT (*Real Ear Attenuation at Threshold*): medição subjetiva realizada com seres humanos.

Desde o ano 2000, o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) no Brasil, adota a Norma ANSI S12.6 como norma de ensaio de atenuação de ruído de protetores auditivos. Essa norma utiliza o método subjetivo REAT, que consiste na utilização de sujeitos de testes (ouvintes) para determinar a atenuação de ruído através da medição dos limiares de audição aberto (sem o protetor auditivo) e fechado (com o protetor auditivo), sendo a atenuação a diferença entre esses limiares. Esse método apresenta maior dispersão que os métodos ATF e MIRE, porém, é o método mais aceito e com resultados mais próximos das atenuações obtidas em campo pelos usuários de protetores auditivos. (BERGER et al., 2000).

Esse estudo foi desenvolvido no Laboratório de Equipamentos de Proteção Individual (LAEPI) localizado na cidade de Florianópolis/SC, credenciado pelo MTE e acreditado pela CGCRE/INMETRO para realizar os ensaios de atenuação de ruído de protetores auditivos conforme

a Norma ANSI S12.6. Foi avaliado todo o sistema de medição composto pelos diversos equipamentos utilizados, sala de ensaio e demais itens.

1.2 MOTIVAÇÃO E NECESSIDADES

Atualmente tanto a Norma ANSI S12.6 quanto as equivalentes ISO 4869-1 e ISO 4869-5 não trazem informações suficientes sobre a estimativa de incerteza de ensaio de atenuação de ruído de protetores auditivos. Além disso, existem poucos trabalhos publicados sobre o tema, sendo que grande parte deles utilizaram uma metodologia de simulação para estimar a incerteza de ensaio ou não estudaram mais a fundo as fontes de incerteza de ensaio.

Não existem sistemas de ensaios perfeitos, desta forma é impossível medir sem cometer erros de medição. Apesar disso, esses erros não impedem que informações confiáveis sejam obtidas sobre a atenuação de ruído. Por isso, é necessário estudar a fundo o comportamento metrológico do sistema de medição utilizado, parâmetros de ensaios selecionados, campo acústico onde é realizado o ensaio e a resposta do ouvinte. Também é importante avaliar a propagação do erro dos limiares de audição até a atenuação do ensaio.

Com a estimativa de incerteza do ensaio é possível realizar comparações entre os resultados de diferentes modelos de protetores auditivos e de um mesmo modelo ensaiado em diferentes laboratórios. Por fim, uma vez que o mercado de protetores auditivos, no Brasil, é regulado pelo MTE, é necessário conhecer a incerteza de ensaio para poder certificar o protetor auditivo e realizar um controle de qualidade do produto.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar metrologicamente um sistema de ensaio de atenuação passiva de ruído de protetores auditivos pelo método subjetivo (REAT), através da metodologia descrita no GUM (Guia para Expressão da Incerteza de Medição).

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar as fontes de incerteza presentes no ensaio de atenuação de ruído de protetores auditivos;
- Avaliar a incerteza devido à variação da resposta do ouvinte nos ensaios e dimensionar sua distribuição de probabilidade através de avaliação experimental dos dados de ensaios;
- Estimar a correlação existente entre o limiar de audição aberto (sem o protetor auditivo) e do limiar de audição fechado (com o protetor auditivo);
- Estimar a correlação existente entre as atenuações de um mesmo ouvinte;
- Determinar e descrever o modelo matemático da propagação do erro de toda a cadeia de medição do ensaio de atenuação de ruído de protetores auditivos;
- Identificar e determinar quais são as fontes de incerteza relevantes no ensaio de atenuação de ruído de protetores auditivos e propor ações para reduzi-las.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo foi dividido em 5 capítulos: introdução, fundamentação teórica, avaliação metrológica do ensaio de atenuação de ruído, resultados e conclusões.

O Capítulo 1 apresenta a contextualização do trabalho junto com a motivação e necessidade. Em seguida é apresentado o objetivo geral e os objetivos específicos e por fim a apresentação da forma de estruturação do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta toda a fundamentação teórica necessária para a contextualização desse estudo, começando pela definição do que é ruído e o princípio de funcionamento da orelha humana, seguido pelos tipos de protetores auditivos existentes, seus mecanismos de atenuação e métodos de ensaio. Posteriormente são apresentadas as métricas de medição, as normas existentes para realizar os ensaios e os números únicos de atenuação de ruído de protetores auditivos. Por fim, é apresentada a instrumentação utilizada no sistema de ensaio, o papel da metrologia nessas medições e as estimativas de incerteza de atenuação do ensaio apresentadas em normas internacionais.

No Capítulo 3 é desenvolvida toda a metodologia da avaliação metrológica do ensaio, apresentando como é determinado o limiar de audição, posteriormente a avaliação metrológica da determinação do

limiar de audição, contendo a avaliação da correção e da estimativa de incerteza padrão do sistema de medição, dos parâmetros de ensaio, campo acústico e resposta do ouvinte. Em seguida é descrita a metodologia para determinar a atenuação do ensaio e a avaliação metrológica para estimar a incerteza padrão e expandida da atenuação do ensaio. Finalmente, é apresentada a metodologia utilizada para calcular o número único de atenuação de ruído e sua avaliação metrológica para estimar a incerteza padrão e expandida do número único.

No Capítulo 4 é apresentado um estudo de caso utilizando toda a metodologia desenvolvida no Capítulo 3, ilustrando passo a passo todo o procedimento de cálculo da atenuação e estimativa da incerteza da atenuação por banda de frequência e do número único. Posteriormente é apresentada a avaliação da incerteza de atenuação do ensaio de 5 modelos de protetores auditivos do tipo concha, concha acoplável ao capacete de segurança e plugue. Por fim, uma análise de sensibilidade do valor do número único e da sua estimativa de incerteza da atenuação em função do número de ouvintes utilizados no ensaio.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes aos resultados obtidos e ao sistema de ensaio utilizado, além de sugestões de futuros trabalhos a serem realizados para reduzir a estimativa de incerteza de atenuação do ensaio.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos básicos de ruído e o funcionamento da orelha humana. Posteriormente serão abordados os protetores auditivos e seus tipos juntamente com seus princípios de funcionamento. Na sequência serão apresentados os métodos de ensaios existentes para determinar a atenuação de ruído de protetores auditivos, juntamente com as normas de ensaios atuais e os números únicos de atenuação de ruído. Por fim, a instrumentação utilizada, o papel da metrologia e a rastreabilidade nos ensaios de protetores auditivos serão abordados.

2.1 RUÍDO E A ORELHA HUMANA

O som pode ser entendido como a sensação produzida no sistema auditivo do ser humano, enquanto que, o ruído pode ser considerado como sendo um som indesejável. O som é gerado pelas sucessivas variações de pressão ou da velocidade das moléculas no meio em que se propagam. Não há deslocamento permanente de matéria, apenas transferência de energia. O som pode ser caracterizado pelas flutuações da pressão total em relação à pressão atmosférica¹ (GERGES, 2000). A Figura 2.1 ilustra as amplitudes de pressão sonora ($P(t)$) em relação à pressão atmosférica (P_{atm}) e da pressão total $P_t(t)$.

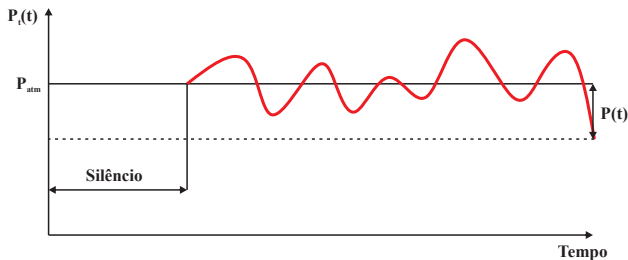


Figura 2.1: Pressão acústica.

Tem-se então que a pressão sonora é dada por

$$P(t) = P_t(t) - P_{atm}. \quad (2.1)$$

¹A pressão atmosférica possui um valor aproximado de 101,325 kPa.

Define-se período T , expresso em [s], como sendo o intervalo de tempo necessário para que um ciclo da onda acústica se complete. Usualmente em acústica se utiliza o inverso do período, a frequência (f), expressa em [Hz], definida segundo Bistafa (2011) por

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.2)$$

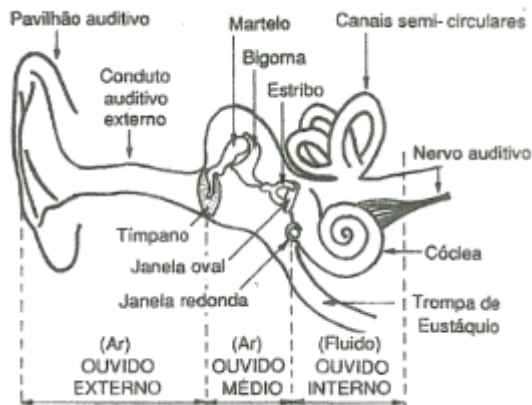
A pressão sonora pode ser percebida pelo sistema auditivo de um ser humano dentro de uma faixa de amplitude e de uma faixa de frequência. Um ser humano que não é considerado surdo percebe como som qualquer vibração do tímpano, em uma frequência audível, que resulta de uma variação incremental na pressão do ar na orelha (BERANEK; VER, 2006).

A orelha humana é, segundo Gerges (2000):

O ouvido humano é o mais sofisticado sensor de som. Devido à deterioração do sistema auditivo por exposição prolongada ao ruído, é necessário que se tenha conhecimento sobre o funcionamento e o comportamento do sistema de audição.

A orelha humana é capaz de perceber e interpretar som através da conversão de ondas de pressão em sinais elétricos que são então transmitidos ao cérebro. A orelha pode ser dividida em três partes: a orelha externa, média e a interna. A Figura 2.2 ilustra essas três partes, o processamento da percepção do som pelo ser humano acontece da seguinte forma, segundo Iida (1990):

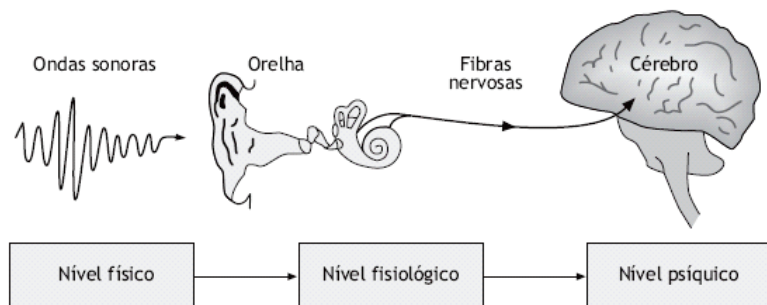
Os sons chegam por vibração do ar, captadas pelo ouvido externo, transformando-se em vibrações mecânicas, no ouvido médio, e finalmente em pressões hidráulicas, no ouvido interno. Finalmente, essas pressões são captadas por células sensíveis no ouvido interno e transformadas em sinais elétricos, que se transmitem ao cérebro.



Fonte: Iida (1990).

Figura 2.2: Orelha humana.

A Figura 2.3 apresenta o processamento do som nos seres humanos, ilustrando o nível de percepção físico, nível fisiológico e nível psíquico.



Fonte: Bistafa (2011).

Figura 2.3: Processamento do som nos seres humanos.

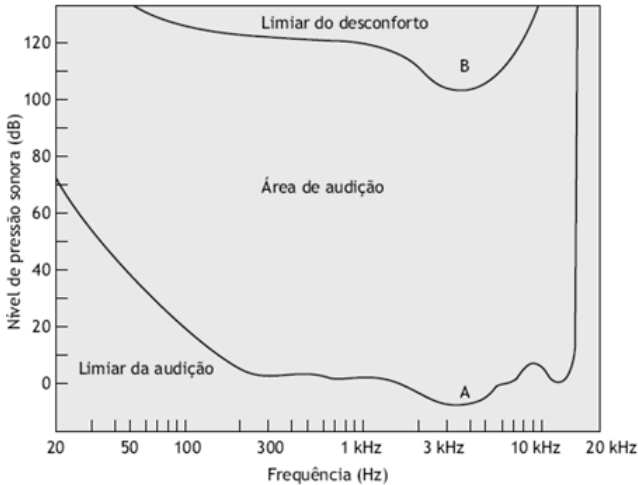
A orelha humana percebe uma grande faixa de intensidade acústica, desde o limiar de audição até o limiar da dor. Flutuações de pressão acústica com magnitudes inferiores a certos mínimos não

serão audíveis (limiar de audição) e flutuações de pressão acústica com magnitudes grandes produzirão uma sensação de dor (limiar da dor). Devido à ordem de grandeza, utiliza-se uma escala logarítmica ao invés de linear, chamada de Nível de Pressão Sonora (NPS) em dB que é dado por

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_o} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.3)$$

Sendo P a pressão acústica em Pascals [Pa] e P_o [Pa] a pressão de referência que corresponde ao limiar da audição em 1000 Hz, segundo Gerges (2000) e Bistafa (2011).

A orelha humana é capaz de distinguir também diferentes frequências sonoras e é capaz de escutar dentro da faixa de 20 a 20.000 Hz. Em geral, cada indivíduo tem uma sensibilidade única para cada frequência e essa sensibilidade varia com o passar dos anos, segundo Gerges (2000) e Iida (1990). A Figura 2.4 ilustra a área de audição dos seres humanos, delimitada pela curva A, que representa o limiar de audição, e pela curva B, que representa o limiar do desconforto.



Fonte: Bistafa (2011).

Figura 2.4: Área de audição dos seres humanos.

A exposição contínua de um ser humano a níveis elevados de pressão sonora pode acarretar uma perda de audição. Essa exposição

prolongada danifica as células ciliadas da cóclea gerando a deficiência auditiva chamada de Perda de Audição Induzida por Ruído (PAIR). Além da perda auditiva, existem outros efeitos causados pela exposição a altos níveis de ruído, como por exemplo, aceleração da pulsação, aumento da pressão sanguínea e estreitamento dos vasos sanguíneos. Essas alterações podem causar mudanças psicológicas, na comunicação e fisiológicas nos indivíduos afetados (GERGES, 2000; IIDA, 1990).

A fim de evitar que ocorra a perda de audição dos seres humanos é necessário realizar um controle de ruído no ambiente em que esses indivíduos se encontram. Todo problema de controle de ruído envolve uma fonte sonora (geradora do ruído), a trajetória de transmissão do ruído (meio em que se encontra) e o receptor (geralmente o ser humano), a Figura 2.5 ilustra esses elementos.

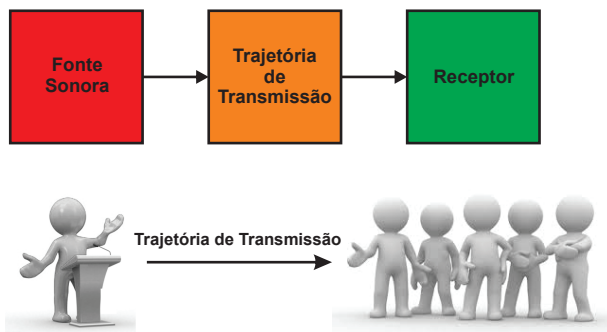


Figura 2.5: Elementos do problema de controle de ruído.

A eliminação do ruído ou a retirada de seres humanos das zonas de ruído é o caminho mais correto para preservar a audição humana, mas muitas vezes não é possível realizar tais medidas. Em alguns casos o controle de ruído de algumas máquinas ou processos existentes se torna difícil e impraticável, por motivos dos custos envolvidos ou questões técnicas, dentre outros fatores. Sendo assim, Gerges (2000) descreve que:

Quando técnicas de controle de ruído não podem ser aplicadas imediatamente ou durante períodos de implantação, sistemas de proteção da audição devem ser usados como solução paliativa. Na prática, a modificação de uma planta industrial pode levar anos, o que obriga a que se tomem cuidados na seleção dos protetores de ouvido a

serem usados como solução paliativa.

A legislação nacional através da NR-6 (2015) da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT) descreve que a empresa é obrigada a fornecer, aos seus colaboradores, equipamentos de proteção individual (EPI) sempre que as medidas de proteção coletiva (controle de ruído) forem inviáveis ou não ofereçam completa proteção contra os riscos de acidentes ou enquanto estiverem sendo implementadas ou em situações emergenciais, conforme recomenda a NR-06 (2015). Neste caso, a proteção individual, através do EPI, é a última linha de defesa do indivíduo. No caso de ruído, a proteção individual consiste na utilização de protetor auditivo.

2.2 PROTETORES AUDITIVOS

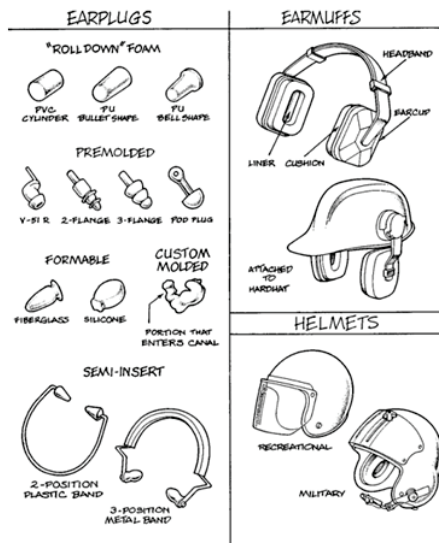
O principal objetivo do uso do protetor auditivo é reduzir o nível de ruído excessivo que chega ao ouvido do indivíduo até um nível que não cause danos ao seu sistema auditivo. O protetor auditivo então fornece uma barreira para o ruído, impedindo que uma parcela deste chegue ao ouvido do indivíduo através de mecanismos que atenuam o ruído. O funcionamento do protetor auditivo depende de suas características construtivas (materiais, geometrias entre outros) e das características fisiológicas e anatômicas do usuário que irá utilizá-lo, de acordo com Berger et al. (2000) e Gerges (2003).

Atualmente existe uma infinidade de marcas e modelos de protetores auditivos, por isso eles podem ser subdivididos para facilitar o entendimento. A escolha do protetor auditivo deve sempre considerar o tipo de ruído encontrado no ambiente, o conforto, a aceitação do EPI pelo usuário, o custo, a durabilidade, a higiene, a questão do problema de comunicação, a segurança, dentre outros, uma vez que esses parâmetros interferem diretamente no grau de eficiência.

2.2.1 Tipos de protetores auditivos

Os protetores auditivos podem ser subdivididos em quatro grupos. O primeiro referente aos protetores auditivos do tipo plugue (inserção ou semi inserção), onde parte do protetor auditivo é inserido na entrada do canal auditivo com o objetivo de selar e bloquear a passagem do ruído. O segundo tipo é comumente chamado de abafador de ruído ou do tipo concha (circum aural), que se encaixa sobre e ao

redor da orelha com o objetivo de gerar uma vedação acústica contra a cabeça do usuário. O terceiro é constituído por protetores auditivos que envolvem a cabeça do usuário totalmente. No quarto tipo se enquadram os protetores auditivos que possuem características especiais, como por exemplo, filtros passivos (orifícios) e/ou ativos ou circuitos eletrônicos para cancelamento de ruído. A Figura 2.6 apresenta três grupos de protetores auditivos descritos.



Fonte: Berger et al. (2000).

Figura 2.6: Tipos de protetores auditivos.

Para protetores auditivos do tipo plugue existem cinco categorias como:

- Automoldável (*"roll down" foam*);
- Pré-moldável (*premolded*);
- Moldável (*formable*);
- Personalizado (*custom molded*);
- Semi-inserção (*semi-insert*).

Para os protetores auditivos tipo concha existem duas categorias:

- Concha (*earmuff*);

- Concha acoplável ao capacete de segurança (*earmuff attached to hard hat*).

2.2.1.1 Automoldável

Os materiais empregados na fabricação deste tipo de protetor auditivo possuem um baixo custo, por isso são bastante utilizados. Os materiais para fabricação empregados são geralmente algodão parafinado, PVC, PU ou tipos especiais de fibra de vidro. Esse tipo de protetor auditivo é roletado (*roll-down*) e colocado no canal externo do ouvido, após a colocação ele é expandido naturalmente até a forma do canal auditivo. Devido a esse fato, esses materiais empregados na fabricação possuem uma velocidade de retorno da forma original do protetor auditivo lenta, para que haja tempo do usuário inserir o protetor auditivo no canal auditivo.

Os protetores auditivos fabricados em algodão parafinado são considerados de baixa qualidade e se contaminam rapidamente, além de não se adaptarem ao canal auditivo e possuírem pouca elasticidade. Os fabricados em PVC são bastante confortáveis e eficazes, além de serem menos susceptíveis à absorção de umidade e por isso são capazes de retornarem à forma original mais facilmente em uma ampla faixa de exposição à umidade. Os fabricados em PU geralmente são mais macios que os de PVC mas, apesar disso, não se tornam mais confortáveis no canal auditivo. Os protetores auditivos fabricados em fibra de vidro são bastante práticos e confortáveis, segundo Berger et al. (2000) e Gerges (2003). A Figura 2.7 apresenta alguns exemplos de protetores auditivos automoldáveis encontrados no mercado.



Figura 2.7: Protetor auditivo tipo automoldável.

2.2.1.2 Pré-moldável

Esse tipo de protetor auditivo é confeccionado com materiais elásticos para que seja possível se adaptar rapidamente as diferentes formas dos canais auditivos. Geralmente são fabricados com flanges ou anéis de vedação afixados em uma haste flexível para manipulação e inserção. O material utilizado na fabricação deve ser atóxico e de superfície lisa e, além disso, deve ser possível lavá-lo com água e sabão neutro. Esse material deve garantir que a forma do protetor auditivo não seja alterada com o uso durante prolongados períodos consecutivos e que não sejam afetados pela cera de ouvido, suor ou cosméticos. Podem ser fabricados em materiais de borracha, silicone, termoplásticos dentre outros, conforme Berger et al. (2000).

Quando é empurrado para dentro do canal auditivo gera uma vedação acústica (pneumática) contra a parede do canal auditivo. Geralmente para um mesmo modelo desse tipo de protetor auditivo, existem diversos tamanhos para que seja possível a colocação nos mais diversos tipos de orelhas. Alguns modelos possuem até cinco tamanhos diferentes com até cinco flanges, quanto maior o número de flanges de um modelo, menor é o número de tamanhos necessário para atender a população. Esse tipo de protetor auditivo, diferentemente do tipo automoldável, não requer que seja roletado. Isso é uma vantagem para o usuário que não possui coordenação motora e destreza suficiente para realizar esse procedimento. Como não é necessário roletar esse tipo de protetor auditivo ele confere uma vantagem na questão da higiene, uma vez que, o usuário pode estar com a mão suja no momento de roletar o protetor auditivo do tipo automoldável.

Este tipo de protetor auditivo apresenta vida útil limitada, pois vai perdendo a elasticidade à medida que vai sendo lavado e, além disso, não se adapta aos diferentes formatos de canais auditivos da população. Para gerar uma boa atenuação o protetor auditivo, deve ser inserido firmemente, o que pode gerar um desconforto para o usuário.

Os protetores auditivos desse tipo confeccionados em PVC estão propensos ao encolhimento, fratura e endurecimento quando expostos a transpiração e cera do ouvido. Os fabricados em silicone possuem uma vida útil maior, entretanto, devem ser examinados periodicamente e substituídos quando endurecerem, deformarem ou caso seu tamanho mude consideravelmente, (BERGER et al., 2000). A Figura 2.8 apresenta alguns exemplos de protetores auditivos pré-moldáveis encontrados no mercado.



Figura 2.8: Protetor auditivo tipo pré-moldável.

2.2.1.3 Moldável

Esse tipo de protetor auditivo é confeccionado com materiais maleáveis, como combinação de algodão e cera, silicone ou lã mineral. Dependendo do tipo de material empregado na fabricação, ele, pode ser considerável descartável, sendo utilizado apenas uma vez. Como em geral, os materiais empregados não são elásticos como os dos protetores auditivos automoldáveis e pré-moldáveis, ele não se expande sendo simplesmente colocado na entrada do canal auditivo. Conseqüentemente pode ocorrer uma falha de vedação caso o usuário realize certos tipos de movimentos com a cabeça e pescoço, (BERGER et al., 2000).

A atenuação obtida pela utilização desse tipo de protetor auditivo depende muito da experiência do usuário na colocação do EPI. Se bem colocado, pode-se obter atenuação comparada à do protetor auditivo tipo concha. Além disso, esse tipo de protetor auditivo é recomendado para ser utilizado em indústrias alimentícias, pois as condições de umidade e calor inviabilizam a utilização do protetor auditivo tipo concha, conforme Berger et al. (2000). A Figura 2.9 ilustra dois exemplos de protetores auditivos do tipo moldável.



Figura 2.9: Protetor auditivo tipo moldável.

2.2.1.4 Personalizado

Protetores auditivos personalizados são do tipo plugue, geralmente fabricados em silicone, vinil ou acrílico. A forma do protetor auditivo é obtida a partir de um molde do próprio canal auditivo do usuário. O molde preenche uma porção do canal auditivo, a orelha externa e o pavilhão. A parte que preenche o canal auditivo cria uma vedação acústica que atenua o ruído, enquanto que a parte que fica em contato com a orelha externa e o pavilhão serve para fixar o protetor auditivo à orelha do usuário. A colocação incorreta desse tipo de protetor auditivo é de fácil percepção uma vez que ele possui um encaixe perfeito no usuário. Alguns modelos possuem apenas o molde do canal auditivo, deixando assim a orelha externa livre, o que gera um maior conforto para o usuário. O fato desse tipo de protetor auditivo possuir o formato idêntico do canal auditivo e servir somente para aquele usuário específico não garante que ele fornecerá uma melhor proteção do que outro tipo de protetor auditivo bem colocado. Como os outros protetores auditivos do tipo plugue, ele deve ser checado regularmente se houve encolhimento, endurecimento e rachaduras no EPI. Além disso, se houver uma mudança considerável no peso do usuário, deve-se verificar se o protetor auditivo ainda possui um encaixe adequado, (BERGER et al., 2000). A Figura 2.10 apresenta alguns modelos de protetores auditivos do tipo personalizado.



Figura 2.10: Protetor auditivo tipo personalizado.

2.2.1.5 Semi-inserção

Esse tipo de protetor auditivo consiste de duas pontas feitas de materiais macios mantidos no lugar através de uma haste, que são posicionadas na entrada ou dentro do canal auditivo. Este tipo de protetor auditivo é indicado quando é necessário colocar e retirar o EPI diversas vezes durante a jornada de trabalho e em locais onde a utilização do protetor auditivo tipo concha se torna desconfortável, como, por exemplo, altas temperaturas e umidade (GERGES, 2003).

Para o protetor auditivo que apenas tampa o canal auditivo, é necessário que a haste exerça uma força suficiente para que as pontas permaneçam na mesma posição e realizem uma vedação acústica do canal auditivo. A haste pode ser utilizada em cima da cabeça, atrás do pescoço ou sob o queixo, dependendo do modelo. O protetor auditivo em que as pontas entram no canal auditivo possui o funcionamento idêntico aos demais plugues. Uma das vantagens desse tipo de protetor auditivo é que ele é compatível com a utilização de óculos de proteção e capacete de segurança, não interferindo assim em seu desempenho. Os tampões podem ser fabricados em vinil, silicone ou PU (BERGER et al., 2000). A Figura 2.11 apresenta alguns exemplos de protetores auditivos de semi-inserção encontrados no mercado.



Figura 2.11: Protetor auditivo tipo semi-inserção.

2.2.1.6 Concha

Esse tipo de protetor auditivo é fabricado com material rígido, revestido com uma almofada de espuma ou borracha e é projetado para cobrir completamente a orelha. Ele é mantido no lugar através de uma haste conectando as duas conchas, que são revestidas com material acústico que tem por objetivo absorver o ruído. Dependendo do modelo do protetor auditivo, a haste pode ser utilizada sobre a cabeça, atrás do pescoço ou sob o queixo. Esse tipo de protetor auditivo é, geralmente, mais fácil de utilizar que os plugues, sendo normalmente projetado em um único tamanho. Algumas vezes o tamanho da cabeça ou da orelha do usuário pode ser grande demais para a haste e a concha desse tipo de protetor auditivo.

A atenuação desse tipo de protetor auditivo é obtida através da pressão exercida pela concha contra a superfície da cabeça do usuário através da haste. O conforto depende da distribuição de pressão da almofada e da força que a haste exerce. Uma grande força da haste pode gerar um desconforto no usuário, além disso a força da haste tende a diminuir com o tempo, reduzindo assim a atenuação, segundo Berger et al. (2000) e Gerges (2003).

Uma das vantagens desse tipo de protetor auditivo em comparação com os plugues (inserção) é sua maior proteção, além disso, a sua adaptação a diversos tipos de orelha é mais fácil, são higiênicos e de fácil colocação. Alguns modelos possuem rádio de comunicação integrado, entrada de áudio e microfone. A Figura 2.12 ilustra três modelos de protetores auditivos tipo concha.



Figura 2.12: Protetor auditivo tipo concha.

2.2.1.7 Concha acoplável ao capacete de segurança

A utilização do capacete de segurança é incompatível com o protetor auditivo tipo concha em que a haste deva ser utilizada sobre a cabeça do usuário. Desta forma, se utilizam as mesmas conchas do protetor auditivo tipo concha convencional fixadas ao capacete de segurança através de um mecanismo mecânico de fixação. O princípio de funcionamento deste tipo de protetor auditivo é idêntico ao do tipo concha. Devido à inexistência da haste, geralmente, a pressão da concha exercida sobre a cabeça do usuário é menor, acarretando uma diminuição do desempenho se comparado com o modelo com haste. A Figura 2.13 ilustra exemplos desse tipo de protetor auditivo.



Figura 2.13: Protetor auditivo tipo concha acoplável ao capacete de segurança.

2.2.1.8 Capacete

Esse tipo de protetor auditivo é constituído de um capacete que envolve toda a cabeça do usuário ou apenas uma parte (geralmente deixando a face do usuário livre). O objetivo principal desse tipo de EPI é a proteção da cabeça do usuário à impactos e normalmente no interior do capacete existe um protetor auditivo tipo concha integrado no EPI. O mesmo princípio de funcionamento do protetor auditivo tipo concha é aplicado para este tipo. A Figura 2.14 apresenta um modelo desse tipo de protetor auditivo.



Figura 2.14: Protetor auditivo tipo capacete.

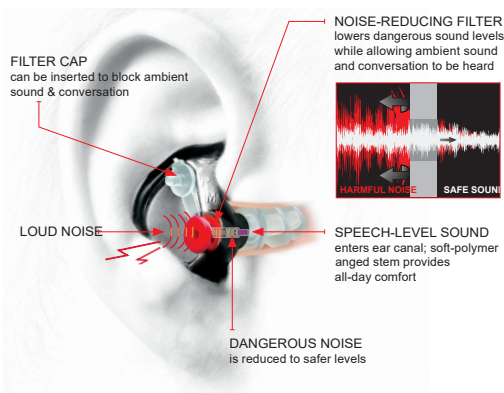
2.2.1.9 Especiais

Existem protetores auditivos com alguns dispositivos específicos que afetam de forma controlada sua atenuação, atingindo objetivos específicos. Esses dispositivos podem ser filtros passivos na forma de orifícios ou filtros ativos obtidos através de circuitos eletrônicos, sendo que ambos os filtros podem ser incorporados em protetores auditivos do tipo plugue, concha ou capacete. De forma geral, os protetores auditivos com esses dispositivos incorporados não possuem atenuação linear e para diferentes níveis de ruído, diferentes atenuações serão fornecidas pelo protetor auditivo (GERGES, 2003).

Os filtros passivos (orifícios) funcionam a partir apenas da sua geometria e material, podendo atuar por toda faixa de frequência ou em uma banda de frequência específica, dependendo do design do filtro.

A Figura 2.15 ilustra um esquema de um protetor auditivo com a utilização de filtro passivo. Este filtro permite que o usuário abra a tampa do filtro para poder conversar com outras pessoas sem necessariamente retirar o protetor auditivo. Ao abrir a tampa do filtro, o protetor auditivo ainda fornece uma atenuação menor do que se a tampa do filtro estivesse fechada.

A Figura 2.16 apresenta dois quadros de atenuação, uma referente à atenuação com o filtro e outra sem o filtro. A atenuação do protetor auditivo sem o filtro (tampa do filtro na posição fechada) é maior que a atenuação com o filtro (tampa do filtro na posição aberta).



Fonte: Surefire (acessado em www.surefire.com).

Figura 2.15: Exemplo de utilização de filtro passivo.

EP4 Sonic Defenders Plus - FILTER CAPS OUT

ATTENUATION DATA (ANSI STD S3.19-1974)

| Test Frequencies (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 3150 | 4000 | 6300 | 8000 | NRR |
|-------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Mean Attenuation (dB) | 9.7 | 10.5 | 15.6 | 20.4 | 29 | 32 | 28.2 | 30.2 | 36.9 | 12 |
| Standard Deviation (dB) | 3.7 | 3.4 | 2.4 | 3 | 3 | 5.8 | 5.6 | 5.5 | 5.7 | |

EP4 Sonic Defenders Plus - FILTER CAPS IN

ATTENUATION DATA (ANSI STD S3.19-1974)

| Test Frequencies (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 3150 | 4000 | 6300 | 8000 | NRR |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Mean Attenuation (dB) | 31.7 | 29.3 | 32.9 | 30.5 | 35.6 | 37.2 | 35 | 34.4 | 37.7 | 24 |
| Standard Deviation (dB) | 5.4 | 4.6 | 4.3 | 3.2 | 4.1 | 4.2 | 3.6 | 4.1 | 5.5 | |

Fonte: Surefire (acessado em www.surefire.com).

Figura 2.16: Exemplo de atenuação obtida com e sem o filtro passivo.

Os filtros ativos são constituídos de circuitos eletrônicos e funcionam a partir da técnica de cancelamento de onda. Basicamente, um microfone capta o ruído que chega ao protetor auditivo, realiza um processamento que inverte a fase do sinal e um alto-falante emite esse ruído invertido no ouvido do usuário e o resultado é o cancelamento de ruído, conforme apresentado na Figura 2.17.

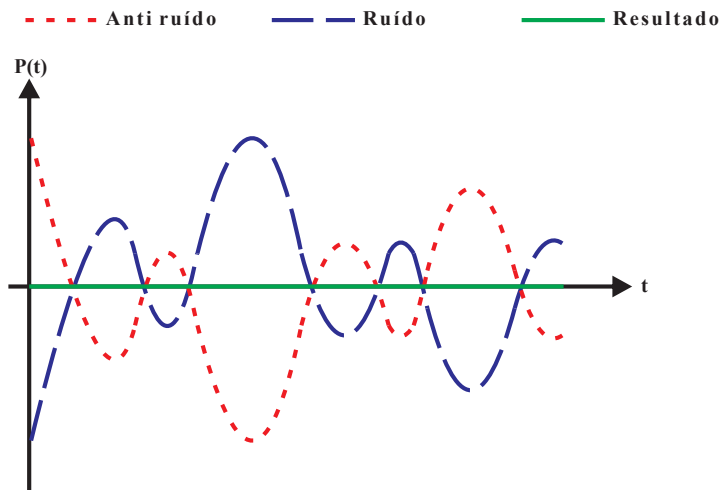
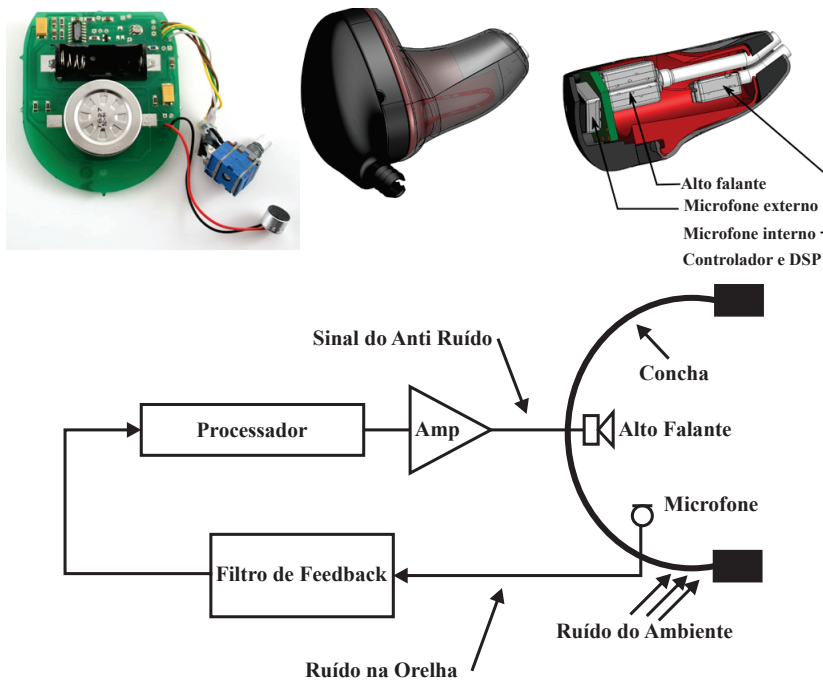


Figura 2.17: Técnica de cancelamento de ruído.

Os protetores auditivos com filtro ativo ou controle ativo podem ser do tipo plugue, concha ou capacete. A Figura 2.18 ilustra um filtro ativo (na esquerda) contendo um microfone, um circuito para o processamento do sinal, um alto falante e um protetor auditivo do tipo plugue (na direita), com todos esses componentes no interior do produto e um esquemático do circuito elétrico (na parte inferior).



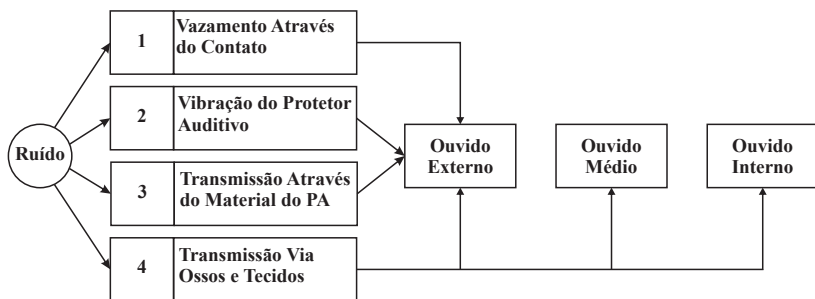
Fonte: adaptado de Berger et al. (2000).

Figura 2.18: Exemplo de protetores auditivos com filtro ativo.

Existem ainda protetores auditivos com atenuação quase constante, ou seja, fornecem um mesmo valor de atenuação para todas as bandas de frequência. Esse tipo de protetor auditivo é utilizado por músicos e pessoas que precisam de uma atenuação sem que o conteúdo espectral seja alterado.

2.2.2 Mecanismos de atenuação de protetores auditivos

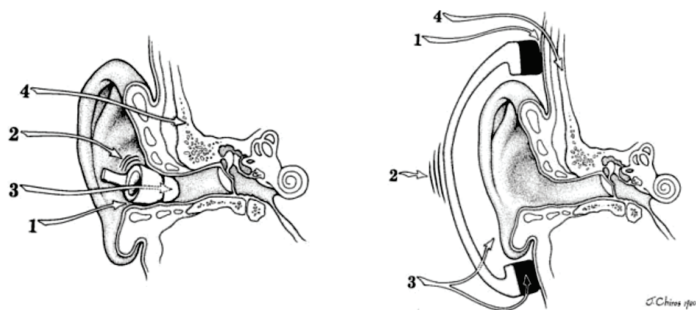
Em uma orelha, sem o protetor auditivo ou sem nenhuma obstrução, o ruído passa pelo canal auditivo até o tímpano. Quando um ouvido está protegido pelo protetor auditivo ou alguma obstrução, existem quatro caminhos distintos em que o ruído pode atingir o ouvido interno (BERGER et al., 2000), e a Figura 2.19 apresenta esses caminhos,



Fonte: adaptado de Berger et al. (2000).

Figura 2.19: Diagrama de bloco dos quatro caminhos que o ruído percorre em um ouvido protegido.

A Figura 2.20 apresenta os quatro caminhos para protetores auditivos do tipo plugue e concha.



Fonte: Berger et al. (2000).

Figura 2.20: Caminhos de transmissão do ruído.

1. Vazamento através do contato: esse é o caminho mais importante, ele pode reduzir drasticamente a atenuação do protetor auditivo. A existência de vazamentos de ar através do contato devido a má colocação ou condição do protetor auditivo são as principais causas. Para se obter um desempenho adequado, o protetor auditivo do tipo plugue deve selar hermeticamente o canal auditivo, enquanto que o protetor auditivo tipo concha deve selar toda a região circum aural ao redor do pavilhão auditivo. O efeito de vazamento de ar pode gerar uma redução de 5 a 15 dB, segundo Berger et al. (2000);
2. Vibração do protetor auditivo: o protetor auditivo tipo plugue pode vibrar na forma de um pistão devido a flexibilidade do canal auditivo, limitando a atenuação em baixa frequência. Para o protetor auditivo tipo concha, ele vibra formando um sistema massa-mola, limitando a atenuação em baixa frequência. Nessas baixas frequências a atenuação é limitada a valores de 6 à 20 dB, Gerges (2003);
3. Transmissão através do material: como dito anteriormente, o protetor auditivo funciona como uma barreira para o ruído. Desta forma, o coeficiente de transmissão acústica dos materiais empregados no protetor auditivo define o desempenho de atenuação por este caminho. A atenuação vai depender de fatores como a massa, rigidez e amortecimento desses materiais;
4. Transmissão via ossos e tecidos: segundo Gerges (2003), o protetor auditivo reduz somente a energia acústica que chega ao sistema de audição pela via aérea, deixando passar uma parcela que é transmitida através dos ossos e dos tecidos. Este caminho é importante apenas para protetores auditivos que fornecem atenuação superior a 40 dB. Sendo assim, esse caminho pode ser ignorado na maioria dos casos.

2.2.3 Métodos de ensaio de atenuação de ruído

Existem diversos métodos para se mensurar a atenuação de ruído de protetores auditivos, tanto em campo como em laboratório. Apenas alguns métodos são realmente eficazes, confiáveis e práticos de serem implementados. Esses métodos fornecem uma estimativa de atenuação de ruído provocado pelo uso do protetor auditivo. Para que se possa comparar o desempenho de diferentes modelos de protetores auditivos, os ensaios de atenuação de ruído devem ser realizados de acordo com normas técnicas nacionais ou internacionais.

Existem três métodos que são consagrados e foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos para medição de atenuação de ruído em protetores auditivos, ATF (*Acoustic Test Fixture*), MIRE (*Microphone In Real Ear*) e REAT (*Real Ear Attenuation at Threshold*), de acordo com Berger et al. (2000), Gerges (2003) e Lima (2003).

Ensaio em laboratório permitem que o experimentador tenha maior controle sobre parâmetros importantes e permitem uma maior confiabilidade na repetibilidade dos ensaios. Apesar disso, os dados obtidos em ensaios de laboratório fornecem apenas uma estimativa do valor de atenuação de ruído obtido na prática em campo pelo usuário. A Figura 2.21 apresenta esses três métodos e onde são possíveis aplicá-los.

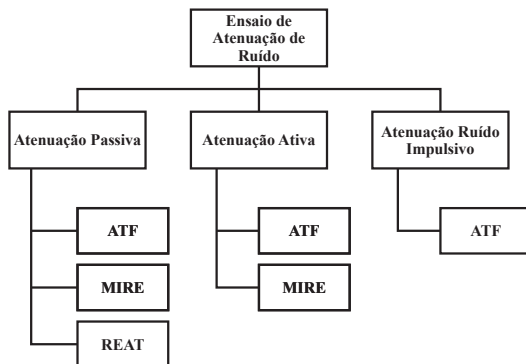


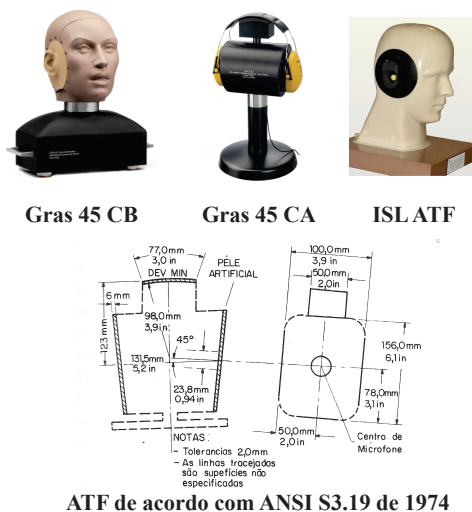
Figura 2.21: Organograma dos métodos de medição de atenuação de ruído.

2.2.3.1 ATF (*Acoustic Test Fixture*)

Esse método consiste na utilização de um dispositivo, comumente chamado de cabeça artificial, incorporando microfone(s) de medição. É classificado como um método objetivo, pois as medições são realizadas com equipamentos (microfones, analisadores de sinais e etc). O(s) microfone(s) fica(m) localizado(s) próximo(s) ao local onde seria o tímpano. Dependendo do nível de sofisticação do ATF, o valor da impedância acústica do canal auditivo do dispositivo pode ser próximo ao valor da impedância de uma orelha real, além disso o dispositivo pode possuir um simulador de pele no canal auditivo e na região circum aural.

Medições em cabeças artificiais podem ser utilizadas para desenvolvimento de produto, controle de qualidade em linhas de produção ou verificação da conformidade de produto em sistemas de avaliação de conformidade. Além disso, deve ser utilizada para medição de atenuação de ruído impulsivo, uma vez que, devido ao alto nível de pressão sonora (130 a 170 dB) desses ensaios, torna-se inviável a utilização de seres humanos. Desta forma, esse método torna-se importante quando o tipo de ensaio a ser realizado é perigoso para seres humanos do ponto de vista acústico (BERGER, 2005). Esse método é mais rápido, barato e possui uma menor variabilidade se comparado com o método REAT e MIRE e deve ser utilizado quando não são necessário que os valores de atenuação de ruído obtidos sejam próximos dos valores reais (LIMA, 2003).

Atualmente existem dispositivos bastante complexos encontrados no mercado, contendo sistema para aquecimento até a temperatura do corpo humano (37 °C), simulador de pele humana na região circum aural e no canal auditivo que possui perda de transmissão e elasticidade comparáveis à pele humana e geometria da cabeça e canal auditivo próxima da encontrada em um ser humano mediano. A Figura 2.22 ilustra três tipos de ATF's encontrados no mercado.



Fonte: Gras (www.gras.dk), ISL (www.isl.eu) e Gerges (2003).

Figura 2.22: Exemplos de ATF's.

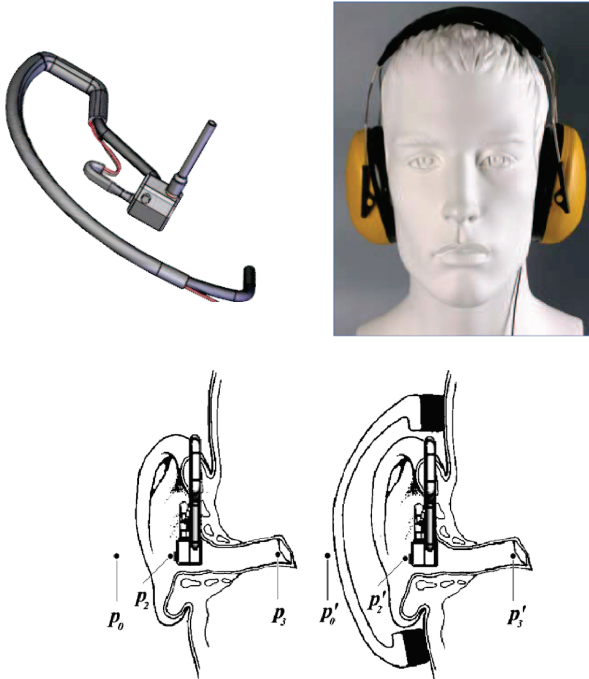
A Gras 45 CB e ISL ATF possuem um sistema para aquecer até uma temperatura de 37 °C, são construídas de acordo com a norma ANSI S3.36 - *Manikin for Simulated in-situ Airbone Acoustic Measurements*, possuem canal auditivo região circum aural com simulador de pele, além disso, possuem uma perda de inserção de 60 dB para simular o caminho de transmissão via ossos e tecidos e são constituídas de dois simuladores de orelha (microfones), conforme requisitos da Norma ANSI S.12.42 - *Methods for the Measurement of Insertion Loss of Hearing Protection Devices in Continuous or Impulsive Noise Using Microphone-in-Real-Ear or Acoustic Test Fixture Procedures*. Nesses dois ATF é possível realizar medições de atenuação de ruído de protetores auditivos do tipo plugue e concha, com ou sem filtros, passivos ou ativos. A Gras 45CA possui dois simuladores de ouvidos e perda de inserção de 60 dB, entretanto só é possível realizar medições de atenuação em protetores auditivos do tipo concha, esta ATF atende aos requisitos da norma ISO 4869-3 - *Measurement of insertion loss of ear-muff type protectors using an acoustic test fixture*.

O desenho técnico apresentado na Figura 2.22 é referente a norma ANSI S3.19 - *Methods for the Measurement for Real-Ear Protection of Hearing Protectors and Physical Attenuation of Earmuff*.

2.2.3.2 MIRE (*Microphone In Real Ear*)

O método do Mini Microfone em Ouvido Real (MIRE) consiste na utilização de um microfone em miniatura instalado na orelha de um ser humano. É classificado como um método objetivo, pois utiliza microfones e analisadores de sinais para realizar as medições de atenuação de ruído. O método consiste em mensurar o nível de pressão sonora no canal auditivo do ser humano com e sem o protetor auditivo e a diferença é a atenuação fornecida pelo protetor auditivo. É um método rápido e que não necessita da intervenção do sujeito no que tange a percepção do som e além disso, podem ser realizadas medições para qualquer tipo de sinal e em qualquer ambiente. As medições conforme este método tendem a fornecer resultados mais precisos em baixa frequência em relação ao método REAT, pois não apresentam os efeitos de mascaramento psicoacústico do ruído, conforme Berger et al. (2000). Apesar disso, a utilização de um mini microfone não captura os ruídos através da transmissão por ossos e tecidos, causando assim um aumento de atenuação acima de 1 kHz em comparação com o método REAT, segundo Berger (2005) e Lima (2003).

Este método é aplicável em todos os tipos de protetores auditivos, inclusive os que possuem filtros passivos ou ativos. Para os protetores auditivos do tipo plugue pode ser mais complicada a colocação e posicionamento correto do mini microfone dentro do canal auditivo do ser humano. A Figura 2.23 apresenta um exemplo de mini microfone e o mini microfone em um manequim com um protetor auditivo do tipo concha.



Fonte: Svantek (www.svantek.com) e Agurto et al. (2011).

Figura 2.23: Exemplos de mini microfone e aplicação.

2.2.3.3 REAT (*Real Ear Attenuation at Threshold*)

O método REAT é considerado o que melhor reproduz os valores de atenuação de ruído obtidos em campo pelos usuários. Apesar disso, ele apresenta a maior dispersão, necessita de mais tempo e possui um custo maior que os métodos ATF e MIRE. Esse método de medição

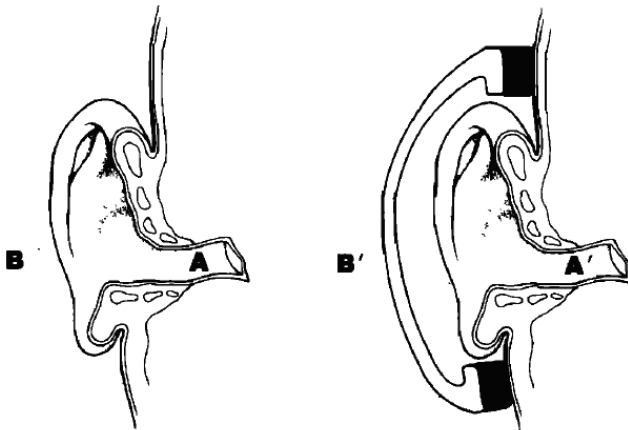
é considerado como *Gold Standard* quando comparado com os outros métodos (BERGER et al., 2000).

As medições conforme esse método se baseiam em determinar a atenuação de ruído através da determinação do limiar de audição (mínimo nível de pressão sonora detectável) de uma pessoa sem e com o protetor auditivo, por isso é considerado um método subjetivo. Para a determinação do limiar de audição é gerado ruído com baixos níveis de pressão sonora, por isso é necessário um ambiente em que o ruído de fundo seja muito baixo. Através de um dispositivo, o usuário indica o momento em que está ouvindo o ruído gerado, desta forma é possível determinar o limiar de audição deste usuário. Os ensaios são realizados com diversas pessoas e são feitas algumas repetições (ciclos) de medição com cada pessoa, com o número de pessoas e ciclos variando de acordo com cada norma de ensaio. Pelo fato do ensaio ser realizado com baixos níveis de pressão sonora, ele não fornece de forma precisa a atenuação de ruído para protetores auditivos em que sua atenuação aumenta quando o nível de ruído do ambiente aumenta, conhecidos como protetores auditivos com dependência de nível. Apesar disso, para protetores auditivos que possuem atenuação de ruído considerada linear, a atenuação obtida por este método torna-se representativa para os valores de atenuação obtidos em campo, independentemente do nível de ruído do ambiente. A aplicação dos dados de atenuação por este método é questionável para ruído do tipo impulsivo. Devido aos efeitos de mascaramento psicoacústico do ruído, esse método tende a fornecer valores mais elevados nas frequências abaixo de 500 Hz (BERGER et al., 2000).

O método REAT pode ser dividido em dois procedimentos de ensaio: ouvintes treinados ou supervisionados (*trained subjects*) e ouvintes não treinados ou inexperientes (*inexperienced subjects*). A principal diferença entre esses dois procedimentos está no conhecimento do ouvinte (sujeito de teste) na utilização do protetor auditivo, além da possibilidade dele ser auxiliado pelo operador do ensaio no momento da colocação do protetor auditivo. O procedimento de ensaio com ouvintes treinados ou supervisionados pode ser utilizado para o desenvolvimento de produto (protetor auditivo) e para ensaios de rotina para controle de qualidade do produto. O procedimento de ensaio com ouvintes não treinados ou inexperientes tem por objetivo obter dados de atenuação mais próximos aos obtidos em campo por um grupo de usuários.

2.2.4 Métricas de medição de atenuação de ruído

Existem basicamente três tipos de métricas (indicadores) para mensurar a atenuação de ruído. A Perda de Transmissão (*Transmission Loss*), ou TL, é definida como sendo a diferença entre a potência sonora incidente e a potência sonora transmitida para uma barreira ou partição. A Perda de Inserção (*Insertion Loss*), ou IL, é a diferença do Nível de Pressão Sonora (NPS) ou da potência sonora ou da intensidade sonora medida em um ponto de referência, antes e depois da colocação de algum dispositivo de tratamento acústico. A Redução de Ruído (*Noise Reduction*), ou NR, é a diferença entre os NPS incidente e refletido (BERGER, 1986; GERGES, 2003; BERANEK; VER, 2006). A Figura 2.24 exemplifica a perda de inserção e redução de ruído em protetores auditivos.



Perda de Inserção (IL) = A - A'

Redução de Ruído (NR) = B' - A'

Função de Transferência do Ouvido Aberto (TFOE) = A - B

Sendo A, A', B e B' Níveis de Pressão Sonora (NPS)

Fonte: adaptado Berger (1986).

Figura 2.24: Métricas para medição de atenuação de ruído.

No caso de protetores auditivos, quando o comprimento de onda do som é maior ou similar ao próprio dispositivo, a relação entre a TL

e a NR não são claramente definidas, segundo Berger (1986).

A medição da NR requer a medição do NPS em dois pontos, conforme mostra a Figura 2.24. A vantagem desse método é que os dois NPS (dentro e fora do protetor auditivo) podem ser medidos simultaneamente. Isso permite que sinais que variam no tempo ou sinais transientes sejam medidos, ou seja, sinais que sejam difíceis de se replicar inúmeras vezes.

A medição da IL requer duas medições, mas estas não podem ser realizadas simultaneamente, pois ambas as medições necessitam ser realizadas dentro do canal auditivo, uma vez com o protetor auditivo e outra sem. Desta forma, a medição da IL requer que o sinal medido seja replicado de forma idêntica para as duas medições.

A IL de um protetor auditivo é a métrica mais indicada para determinar a redução do NPS próximo ao tímpano do usuário quando o protetor auditivo é utilizado. A diferença entre a IL e a NR para um ouvido sem o protetor auditivo pode ser aproximado por

$$IL = NR + \text{TFOE}. \quad (2.4)$$

A Função de Transferência do Ouvido Aberto (TFOE), ou *Transfer Function of Open Ear*, neste caso, pode ser entendida como a diferença entre a IL e a NR, pontos A e B apresentados na Figura 2.24.

As medições subjetivas de atenuação de ruído de protetores auditivos pelo método REAT utilizam a IL como indicador, uma vez que as medições são realizadas a partir das respostas dos ouvintes a estímulos sonoros com e sem o protetor auditivo, não sendo possível assim utilizar o indicador de NR.

As medições objetivas de atenuação de ruído de protetores auditivos pelo método MIRE ou ATF podem tanto utilizar o indicador de IL ou de NR, uma vez que dependem exclusivamente das medições realizadas com transdutores acústicos.

Agurto (2013) explica os tipos de perda de inserção (IL):

- Perda de Inserção Passiva (*Passive Insertion Loss*) ou PIL: consiste na perda de inserção devido aos aspectos construtivos/físicos do protetor auditivo, como geometria e materiais utilizados. Esta perda de inserção é intrínseca do protetor auditivo, diferentemente da perda de inserção ativa (AIL) que, devido ao controle ativo de ruído pode ser ligada ou desligada. Pode ser medida pelo método REAT, ATF e MIRE;
- Perda de Inserção Ativa (*Active Insertion Loss*) ou AIL: consiste na perda de inserção devido ao controle ativo de ruído no protetor auditivo. Só é possível realizar a medição pelo método ATF ou MIRE.

Não é possível realizar a medição pelo método REAT, pois este utiliza o limiar de audição para determinar a perda de inserção e o controle ativo de ruído nos protetores auditivos não trabalha nesses níveis de ruído, que são baixos. Para se mensurar a perda de inserção ativa (AIL) mede-se a perda de inserção passiva (PIL) com o sistema de controle ativo desligado e mede-se a perda de inserção total (TIL) com o sistema de controle ativo ligado. A diferença entre a perda de inserção passiva (PIL) e perda de inserção total (TIL) será a perda de inserção ativa (AIL) do protetor auditivo;

- Perda de Inserção Total (Total Insertion Loss) ou TIL: consiste na perda de inserção total do protetor auditivo, a soma entre a perda de inserção passiva (PIL) e a perda de inserção ativa (AIL), conforme a equação,

$$TIL = PIL + AIL. \quad (2.5)$$

- Perda de Inserção Total de Protetores Auditivos com Dependência de Nível ou TIL_{NPS} : essa medição se aplica a protetores auditivos que tenham sua atenuação alterada dependendo do nível de ruído do ambiente. Desta forma, só é possível realizar essa medição pelo método ATF e MIRE. Não é possível realizar esta medição pelo método REAT, pois este utiliza o limiar de audição para determinar a perda de inserção. Deve-se medir a perda de inserção em diferentes níveis de ruído para se caracterizar a atenuação de ruído desse tipo de protetor auditivo. A apresentação da atenuação de ruído deste protetor auditivo deve ser indicada em função do nível do ruído;
- Perda de Inserção de Ruído Impulsivo (Impulsive Peak Insertion Loss) ou IPIL: pode ser entendido como a redução do pico do nível de pressão sonora de um ruído impulsivo fornecido pela utilização do protetor auditivo (ANSI S12.42 2010).

2.2.5 Normas de ensaio de atenuação de ruído

Assim como existem métodos para medição da atenuação de ruído de protetores auditivos, existem normas que definem como estas medições devem ser realizadas. Tendo em vista que este trabalho é sobre avaliação metrológica em sistema de medição de atenuação passiva de ruído de protetores auditivos pelo método subjetivo (REAT), apenas as normas referentes a este método serão apresentadas. Apesar disso serão indicadas as normas existentes para as medições pelo método ATF e MIRE mas as mesmas não serão abordadas. A Figura

2.25 apresenta os métodos de medição para atenuação de ruído de protetores auditivos, passivo, ativo e para ruído impulsivo.

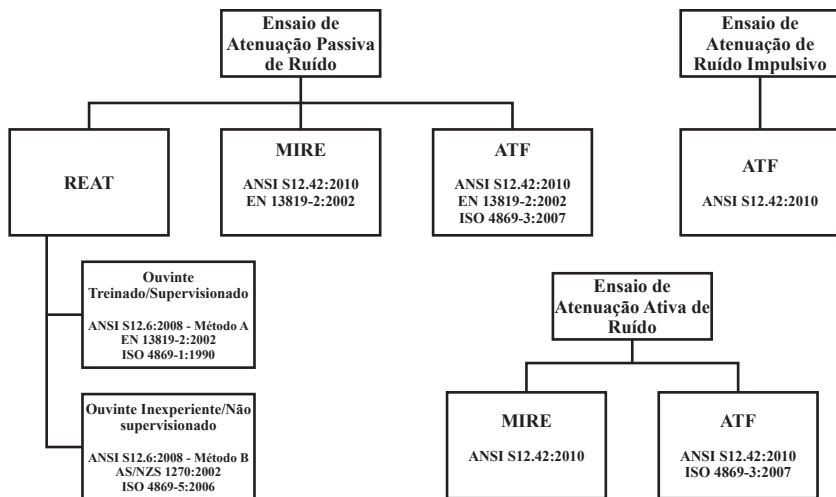


Figura 2.25: Organograma dos métodos e normas de medições de atenuação de ruído de protetores auditivos.

Atualmente as principais normas internacionais utilizadas nos ensaios de atenuação passiva pelo método REAT são a ANSI S12.6:2016 - *Method for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors*, que é dividida em Método A (*Trained Subject*) e Método B (*Inexperienced Subject*). ISO 4869-1:1990 - *Subjective method for the measurement of sound attenuation*, ISO 4869-5:2006 - *Method for estimation of noise reduction using fitting by inexperienced test subjects*, EN 13819-2:2002 - *Acoustic test methods* e AS/NZS 1270:2002 - *Hearing protectors*. A Norma EN 13819-2 é similar à ISO 4869-1 e a Norma AS/NZS 1270 é similar à ANSI S12.6, desta forma estas duas normas (EN 13819 e AS/NZS 1270) não serão abordadas. Existem outras Normas como ANSI Z24.22:1957, ANSI S3.19:1974, ANSI S12.6:1984, ANSI S12.6:1997, ANSI S12.6:2008, ISO 4869-1:1981 que não serão abordadas por se tratarem de versões antigas. O Quadro 2.1 apresenta as principais diferenças entre as Normas, ANSI S12.6, ISO 4869-1 e ISO 4869-5.

Quadro 2.1: Comparação entre normas de ensaio pelo método REAT.

| Especificação | ANSI S12.6 | | ISO 4869-1 | ISO 4869-5 |
|--|---|------------------------|---|--|
| | Método A | Método B | | |
| Tipo de sala | Reverberante | | | |
| Frequência de ensaio* | 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz | | | |
| Tempo de reverberação | < 1,6 s para todas as bandas de frequências de ensaio | | | |
| Ruído de fundo | 1/1 oitava em dB | | 1/3 de oitava em dBA | |
| Ruído de ajuste | 70 dBA** | | 60 a 70 dB** | 65 dBA** |
| Acuidade auditiva mínima do ouvinte | ≤ 25 dB | | ≤ 15 dB para frequência abaixo de 2 kHz ≤ 25 dB para frequência acima de 2 kHz | ≤ 25 dB |
| Método para determinar o limiar auditivo | Békésy | | ISO 8253-2 | Qualquer método audiométrico conhecido |
| Número de ouvintes | 10 para concha e 20 para plugue e concha acoplável ao capacete de segurança | | 16 para concha e plugue | 16 para concha 20 para plugue |
| Número de repetições por ouvinte | 2 | | 1 | 2 |
| Critério de colocação | Colocação superviso. | Colocação pelo ouvinte | Colocação superviso. | Colocação pelo ouvinte |
| Resultado final | Média e desvio padrão da atenuação em banda de 1/1 oitava | | | |

* Em bandas de 1/3 de oitava.

** Ruído de banda larga aleatório.

Nos últimos anos, os grupos de trabalho de normas de ensaios de atenuação de protetores auditivos da ANSI e da ISO vêm trabalhando em conjunto para desenvolverem as normas, dessa forma as mesmas estão convergindo nos requisitos e estão cada vez mais similares.

O campo acústico da sala onde são realizados os ensaios deve ser reverberante, com tempo de reverberação inferior a 1,6 segundo para as bandas de frequências, em 1/3 de oitava, centradas em 125 Hz, 250

Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz. Para a Norma ANSI S12.6, o ruído de fundo deve ser avaliado em banda de frequência de 1/1 oitava de 63 Hz a 8 kHz, enquanto que na Norma ISO 4869 o ruído de fundo deve ser avaliado em bandas de 1/3 de oitava com bandas centrais de 31,5 Hz a 10 kHz.

O sinal de excitação (teste) deve ser filtrado em bandas frequência de 1/3 de oitava de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz. Para a Norma ANSI S12.6 deve-se utilizar um ruído branco filtrado, enquanto que na Norma ISO 4869 deve-se utilizar um ruído rosa filtrado. O ruído de ajuste é utilizado momentos antes do ensaio dentro da câmara acústica, para o ouvinte verificar a colocação do protetor auditivo. Para a Norma ANSI S12.6 deve-se utilizar um ruído de banda larga aleatório de 70 dBA, para a ISO 4869-1 um ruído de banda larga aleatório entre 60 e 70 dB e para a ISO 4869-5 um ruído de banda larga aleatório de 65 dBA.

Para a realização desses ensaios os ouvintes devem passar por uma triagem e qualificação. É necessário que eles possuam uma acuidade auditiva mínima para que seja possível realizar os ensaios. A Norma ANSI S12.6 e ISO 4869-5 exige que os ouvintes possuam uma acuidade auditiva inferior a 25 dB nas bandas de frequências de ensaio. A Norma ISO 4869-1 exige que os ouvintes possuam limiar auditivo inferior a 15 dB para as bandas de frequências inferiores a 2 kHz e inferior a 25 dB para as bandas de frequências acima de 2 kHz. Essa verificação deve ser realizada através de audiometrias com tons puros. Os ouvintes devem estar livres de infecções e devem passar por uma inspeção do canal auditivo para verificar se não há nenhuma inflação ou excesso de cerúmen.

Durante o ensaio deve ser utilizado um método audiométrico para determinar o limiar de audição. A Norma ANSI S12.6 exige que seja utilizado o método Békésy, a Norma ISO 4869-1 exige que seja utilizado um dos métodos descritos na Norma ISO 8253-2 - *Sound field audiometry with pure-tone and narrow-band test signals*, enquanto que a Norma ISO 4869-5 exige qualquer método audiométrico reconhecido.

Para a Norma ANSI S12.6 deve-se utilizar no mínimo 10 ouvintes para protetores auditivos do tipo concha e 20 para protetores auditivos do tipo plugue ou concha acoplável ao capacete de segurança. Para a Norma ISO 4869-1 deve-se utilizar 16 ouvintes para todos os tipos de protetores auditivos. Para a Norma ISO 4869-5 deve-se utilizar 16 ouvintes para protetores auditivos do tipo concha ou concha acoplável ao capacete de segurança e 20 para protetores auditivos do tipo plugue. É exigido nessas Normas que a proporção de homens e mulheres seja

de 40/60 ou 60/40 nos ensaios.

As Normas ANSI S12.6 e ISO 4869-5 exigem que cada ouvinte realize dois limiares de audição fechados (com o protetor auditivo) e dois limiares de audição abertos (sem o protetor auditivo). A Norma ISO 4869-1 exige que cada ouvinte realize apenas um limiar de audição fechado e um aberto. É exigido nessas Normas, que metade dos ouvintes de um ensaio comecem com o limiar de audição aberto e a outra metade dos ouvintes comecem com o limiar de audição fechado.

O resultado final do ensaio na Norma ANSI S12.6 e na parte 1 e 5 da ISO 4869 é a atenuação média e desvio padrão em bandas de frequência de 1/1 oitava dos sinais de excitação.

2.2.6 Números de atenuação de ruído

Os valores de atenuação de ruído obtidos em laboratório podem ser utilizados para estimar o nível de ruído de um usuário protegido pelo protetor auditivo. A precisão desse nível de ruído protegido dependerá da situação em que o protetor auditivo foi ensaiado em laboratório e de sua utilização real em campo.

Antes de 1979, os fabricantes e/ou importadores forneciam apenas os valores de atenuação média e desvio padrão em bandas de frequência de 1/1 oitava. Esses valores eram utilizados para calcular o nível de ruído protegido pela utilização do protetor auditivo a um usuário. Essa metodologia de cálculo é chamada de método longo ou Método 1 pela NIOSH² (1998). Entretanto, essa metodologia de cálculo necessita que a avaliação ocupacional ao ruído seja realizada através de medições por banda de frequência, exigindo assim, uma instrumentação de maior custo e qualidade, além da complexidade dos cálculos. Desta forma, os usuários passavam a selecionar os protetores auditivos através de outros critérios ao invés da atenuação, de acordo com Lima (apud BERGER, 1996, 1999).

Devido aos fatos citados, foram elaborados os números únicos de atenuação de ruído como o Nível de Redução de Ruído (NRR), o Nível de Redução de Ruído com colocação do protetor auditivo pelo sujeito de teste (NRR_{SF}), o *Single Number Rating* (SNR), o *High Medium Low* (HML), o *Noise Level Reduction Statistic for use with A-weighting* (NRS_A) e o *Noise Level Reduction Statistic, Graphical* (NRS_G).

Os números únicos têm por objetivo facilitar o usuário de protetores auditivos, fornecendo uma ferramenta para uma análise sim-

²NIOSH é o Instituto Nacional de Segurança e Saúde dos EUA.

plificada, rápida e eficiente para comparação e seleção dos protetores auditivos (LIMA, 2003). Apesar disso, deve-se realizar algumas ressalvas quanto à utilização dos números únicos. Os cálculos do NRR, NRR_{SF} , SNR e HML utilizam um espectro de ruído rosa como ambiente padrão, o que nem sempre é o caso para todos os usuários. Os cálculos do NRS_A e NRS_G utilizam espectros de ruído industrial fornecidos pela NIOSH. Portanto, esses índices devem ser utilizados com alguma cautela, Gerges (2003).

2.2.6.1 Método Longo

É a metodologia mais precisa e confiável para determinar o nível de proteção ao ruído de um usuário utilizando o protetor auditivo. Para seu cálculo é necessário conhecer os valores de atenuação média e desvio padrão por banda de frequência de 1/1 oitava do protetor auditivo. É necessário conhecer também o nível de pressão sonora no ambiente do usuário do protetor auditivo por banda de frequência de 1/1 oitava. O resultado é o nível de ruído que o usuário está efetivamente exposto, de acordo com Berger et al. (2000), Gerges (2003) e Lima (2003).

2.2.6.2 NRR

O Nível de Redução de Ruído (NRR) é comumente chamado de método simplificado ou método 2 pela NIOSH (1998). Ele é calculado utilizando um ruído padrão, desconsiderando os níveis reais de ruído do ambiente ao que o usuário do protetor auditivo está exposto. O ruído padrão utilizado é um ruído rosa com 100 dB em cada banda de frequência. O NRR é calculado de maneira análoga ao método longo, exceto que o ruído padrão é utilizado ao invés dos níveis de ruído medido no ambiente do usuário do protetor auditivo. O nível de proteção em dBA é subtraído dos valores do ruído padrão em dBA ao invés dos níveis de pressão sonora em dBA do ambiente. O nível de proteção é ainda subtraído por uma parcela de 3 dB, cujo uso tem por objetivo levar em conta o erro pela utilização do ruído rosa ao invés do ruído do ambiente onde o usuário está realmente exposto, segundo Berger et al. (2000) e Gerges (2003). O NRR é obtido através dos dados de atenuação média e desvio padrão dos protetores auditivos ensaiados conforme a Norma ANSI S12.6 - Método A (ouvintes treinados ou supervisionados). Seus valores são em geral superestimados em relação aos valores de atenuação

reais obtidos em campo pelos usuários de protetores auditivos, conforme Lima (2003).

Deve-se levar em consideração que, ao utilizar o NRR ao invés do método longo muita informação é perdida, tornando este método mais impreciso. Dessa forma recomenda-se aplicar um fator de correção de -7 dB (NIOSH, 1998) ao se calcular o nível de exposição estimada do usuário do protetores auditivo, conforme a equação:

$$\text{Exposição Estimada (dBA)} = \text{Ruído Ambiente (dBC)} - \text{NRR} - 7. \quad (2.6)$$

O ruído do ambiente utilizado deve ser ponderado em C, isso é justificado teoricamente e de forma empírica por Berger et al. (apud BERGER, 1988).

2.2.6.3 NRR_{SF}

O NRR_{SF} foi desenvolvido em 1995. Ele funciona de maneira análoga ao NRR, sendo que a principal diferença é que os dados de atenuação média e desvio padrão utilizados nos cálculos são provenientes da Norma ANSI S12.6 pelo Método B (ouvintes não treinados ou inexperientes). O objetivo principal do NRR_{SF} é fornecer um número único que seja eficiente e represente de maneira mais precisa um nível de proteção dos usuários de protetores auditivos em campo. Desta forma, não é necessário aplicar os fatores de correção da NIOSH, como no caso do NRR.

A utilização do NRR_{SF} vem sendo recomendada por diversos órgãos governamentais, associações e fabricantes de protetores auditivos, Lima (2003).

O procedimento de cálculo do NRR e NRR_{SF} é similar, apesar disso, os dados de entradas são diferentes, o primeiro é fornecido pelo Método A e o segundo pelo Método B da ANSI S12.6, respectivamente. As principais diferenças para estes dois cálculos são:

- O NRR é computado utilizando 2 desvios padrão enquanto que o NRR_{SF} é computado com apenas 1 desvio padrão;
- O NRR_{SF} é baseado no cálculo do SNR descrito na Norma ISO 4869-2:1994 - *Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn*, enquanto que o NRR é baseado nos trabalhos da NIOSH;
- O NRR_{SF} deve ser subtraído de um ruído ambiente com ponderação

A, conforme equação:

$$\text{Exposição Estimada (dBA)} = \text{Ruído Ambiente (dBA)} - \text{NRR}_{SF}; \quad (2.7)$$

- O NRR deve ser subtraído de um ruído ambiente ponderado em C, o NRR_{SF} e o SNR devem ser subtraídos de um ruído ambiente com ponderação em A. Entretanto, o uso do ruído ambiente com ponderação em A reduz a precisão da estimativa de proteção. Desta forma, foi aplicado um fator de segurança de -5 dB ao valor final do NRR_{SF} , sendo calculado por

$$\text{NRR}_{SF} = \text{SNR}_{84\%} - 5, \quad (2.8)$$

conforme explicam Berger et al. (2000) e Lima (2003).

2.2.6.4 SNR

Este número único é obtido de acordo com a Norma ISO 4869-2. Seu procedimento de cálculo é similar ao NRR, com duas diferenças. O SNR pode ser calculado para diferentes níveis de proteção referente à diferentes percentagens da população de usuários que estará protegido. O SNR não necessita da subtração de 3 dB como no NRR. O Quadro 2.2 apresenta os diferentes níveis de proteção e seu respectivo α .

Quadro 2.2: Valores de α para vários níveis de proteção.

| Nível de proteção [%] | Valor de α |
|-----------------------|-------------------|
| 75 | 0,67 |
| 80 | 0,84 |
| 84 | 1,00 |
| 85 | 1,04 |
| 90 | 1,28 |
| 95 | 1,64 |
| 98 | 2,00 |

Fonte: ISO 4869-2:1994

O SNR utiliza um ruído padrão rosa com valor global de 100 dBC, isto significa que banda de frequência de 1/1 oitava de 125 Hz a 8 kHz possui valor de 91,5 dBC. Este valor então é transformado para

ponderação A. Esse número único vem acompanhado pelo subscrito do valor do nível de proteção. O coeficiente α é multiplicado pelo desvio padrão fornecido pelo ensaio de atenuação de ruído realizado no protetor auditivo.

De acordo com Gerges (2003) e Lima (2003), quando o α é igual ao valor unitário, o valor do SNR será

$$\text{SNR}_{84\%} = \text{NRR} - 3. \quad (2.9)$$

2.2.6.5 HML

O cálculo do HML é mais complexo que o NRR, NRRSF e SNR e necessita níveis de pressão sonora do ambiente em dB(A) e dB(C). Segundo Gerges (2003), “o cálculo dos valores de H, M e L é baseado em oito espectros de ruído de referência, com diferentes valores de (LC-LA)”. Os valores de HML independem dos valores do ruído do ambiente do usuário do protetor auditivo, o procedimento de cálculo está descrito na Norma ISO 4869-2:1994.

2.2.6.6 NRS_A

O cálculo desse indicador é apresentado na ANSI S12.68:2012 - *Methods of Estimating Effective A-Weighted Sound Pressure Levels When Hearing Protectors are Worn*. O NRS_A fornece dois números para um intervalo de proteção estimado, 80% para usuário com pouco treinamento e 20% para usuário com treinamento na utilização de protetores auditivos. O NRS_A utiliza uma série de ruídos fornecida pela NIOSH, com 100 espectros diferentes de ambientes industriais e os valores de atenuação média e desvio padrão por banda de frequência de 1/1 oitava do protetor auditivo, Agurto (2013) e ANSI S12.42 (2012).

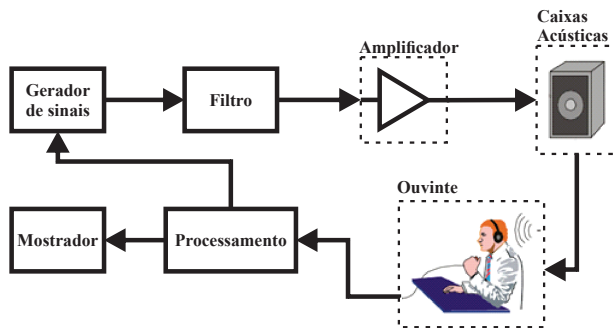
2.2.6.7 NRS_G

O cálculo desse indicador é apresentado na ANSI S12.68:2012 - *Methods of Estimating Effective A-Weighted Sound Pressure Levels When Hearing Protectors are Worn*. O NRS_G fornece dois números para um intervalo de proteção estimado, 80% para usuário com pouco treinamento e 20% para usuário com treinamento na utilização de protetores auditivos. Este indicador é estimado através da análise de um

gráfico (ou através da interpolação aritmética do gráfico) que informa a proteção obtida ponderada em A através da diferença entre os níveis de ruído do ambiente ponderado em A e C. Desta forma, a aplicação desse indicador requer duas medições, uma com ponderação em A e outra em C. O NRS_G utiliza uma série de ruído fornecida pela NIOSH, com 67 espectros que representam uma larga faixa de ruído, incluindo alguns ruídos utilizados no NRS_A , ruídos da Força Aérea Americana e ruído da aviação civil, além da atenuação média e desvio padrão por banda de frequência de 1/1 oitava do protetor auditivo, conforme Agurto (2013) e ANSI S12.42 (2012).

2.3 INSTRUMENTAÇÃO

O sistema para medição de atenuação de ruído de protetores auditivos pelo método subjetivo pelas normas ANSI S12.6, ISO 4869-1 e ISO 4869-5 consiste de um gerador de sinais, filtro de 1/3 de oitava, amplificador de potência, caixas acústicas, sistema de controle de amplitude do som, além do ouvinte. Segundo Lima (2003), “é interessante notar que o ouvinte também faz parte da cadeia de medição, sendo fator responsável pela geração de parcelas de incerteza de ensaio”. A Figura 2.26 apresenta o diagrama da cadeia de medição.

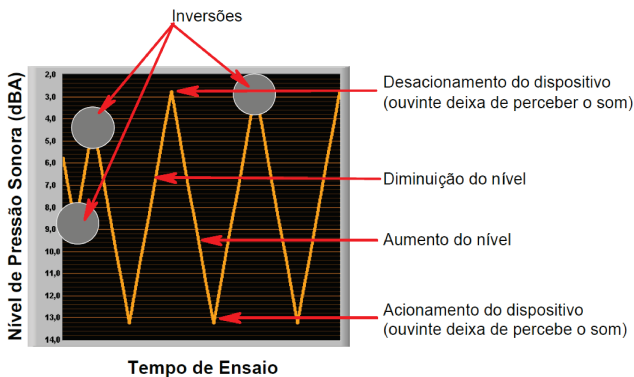


Fonte: Lima (2003).

Figura 2.26: Diagrama da cadeia de medição.

Como descrito anteriormente, o processo de medição de atenuação de ruído pelo método subjetivo consiste em determinar os limites de audição, abertos e fechados, dos ouvintes. Estes ouvintes

são acomodados dentro de uma câmara acústica onde é então gerado o ruído. É imprescindível que a geração do ruído seja idêntica entre os diferentes limiares de audição do ensaio, ou seja, tanto nos limiares de audição abertos como nos limiares de audição fechados é gerado um sinal filtrado em uma determinada banda de frequência, conforme especificado nas Normas. O sinal filtrado é então amplificado e emitido pelas caixas de sons dispostas dentro da câmara acústica. O som gerado pelas caixas de som é então percebido pelo ouvinte, que aciona um dispositivo (botão de resposta) ao começar a perceber o som gerado. O sistema de medição responde, reduzindo a amplitude do sinal até que o ouvinte não consiga mais perceber o som gerado e desacione o dispositivo, fazendo com que o sistema aumente novamente a amplitude do sinal, e assim repetidamente. A Figura 2.27 apresenta o traço do limiar de audição de um ouvinte, conforme a Norma ANSI S12.6.



Fonte: Lima (2003).

Figura 2.27: Determinação do limiar de audição.

Cada vez que o ouvinte realiza o acionamento ou desacionamento do botão de resposta é gerada uma inversão, momento em que o sinal inverte de direção. Os valores do nível de pressão sonora em que ocorrem as inversões são utilizados para calcular o limiar de audição do ouvinte. O número de inversões necessários para determinar o limiar de audição varia de acordo com a norma utilizada. O limiar de audição do ouvinte é obtido a partir do cálculo da média dos pontos de inversão, para uma dada banda de frequência de ensaio. O ouvinte determina seu limiar de audição em cada banda de frequência do ensaio, separadamente. A Figura 2.28 ilustra um exemplo de botão de resposta que

é utilizado pelos ouvintes durante os ensaios.



Figura 2.28: Exemplo do dispositivo de controle, botão de resposta.

Esse processo é realizado sem o protetor auditivo (limiar de audição aberto) e com o protetor auditivo (limiar de audição fechado) para cada ouvinte e pode ser repetido para um mesmo ouvinte em um mesmo ensaio dependendo da norma. A diferença entre o limiar de audição fechado e o limiar de audição aberto é a atenuação de ruído do protetor auditivo para aquele ouvinte. Utiliza-se a atenuação individual de todos os ouvintes para calcular a atenuação média e desvio padrão de cada banda de frequência para um protetor auditivo ensaiado. A Figura 2.29 apresenta o diagrama de cálculo do ensaio pelo método REAT.

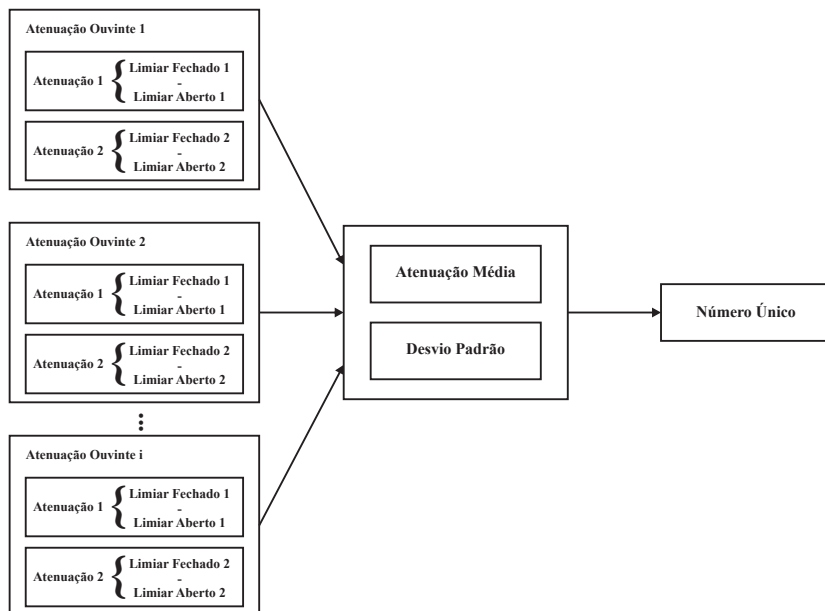


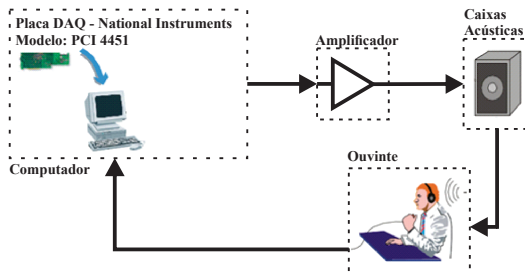
Figura 2.29: Cálculo de atenuação do ensaio pelo método REAT.

As normas de ensaios especificam diversos requisitos de instrumentação que devem ser atendidos para realizar os ensaios.

2.3.1 Sistema de medição desenvolvido

Lima, em 2003, publicou uma tese de doutorado onde foi desenvolvido um sistema de medição de atenuação passiva de ruído de protetores auditivos pelo método subjetivo. O objetivo desta tese foi desenvolver um sistema de medição digital para ensaios, satisfazendo a Norma ANSI S12.6:1997, avaliá-lo metrologicamente com base no Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM) e corroborar na confiabilidade do processo metrológico de medição.

O sistema de medição desenvolvido por Lima é um conjunto de hardware e software. O hardware é constituído por uma placa de geração e aquisição de sinais, comumente conhecida como placa *Dynamic Signal Acquisition and Generation* (DSAG), um computador onde a placa DSAG é conectada, amplificador de potência, caixas acústicas, botão de resposta do ouvinte (Figura 2.28) e cabos. O software foi desenvolvido em linguagem Labview, compostos por uma série de módulos com o objetivo de executar as rotinas de ensaios, qualificação, validação e verificação do sistema de medição (LIMA, 2003). A Figura 2.30 apresenta o diagrama do sistema desenvolvido por Lima em 2003, foi utilizada a placa DSAG modelo PCI 4451 da *National Instruments*.



Fonte: Lima (2003).

Figura 2.30: Diagrama do sistema desenvolvido por Lima em 2003.

Conforme o diagrama de blocos apresentado na Figura 2.30, o computador possui a função de gerar o sinal de teste através da placa DSAG, receber o *feedback* do ouvinte através do botão de resposta, ar-

mazenar e tratar os dados dos ensaios. O amplificador de potência e as caixas acústicas são utilizados para gerar o sinal acústico na câmara de ensaio. Como a placa DSAG não possui potência suficiente para fornecer a energia necessária para as caixas acústicas, é necessário utilizar o amplificador de potência. O botão de resposta do ouvinte é utilizado para realizar o *feedback* ao sistema com a informação da sensação auditiva sentida pelo ouvinte no momento do ensaio.

Em 2008, Lima atualizou o sistema desenvolvido em 2003 em virtude do lançamento de uma nova placa DSAG da National Instruments. A nova placa (PCI 4461) apresentou melhorias significativas de desempenho se comparada à utilizada por Lima (PCI 4451), o Quadro 2.3 apresenta as principais diferenças.

Quadro 2.3: Diferenças entre as placas DSAG utilizadas no sistema.

| Características | PCI 4451 (2003) | PCI 4461 (2008) |
|---|--------------------|--------------------|
| Entrada/Saída | 2/2 | 2/2 |
| Taxa de amostragem (<i>sampling rate</i>) (Samples/s) | 51.200 | 204.800 |
| Resolução (bits) | 16 | 24 |

As duas principais diferenças são a taxa de amostragem e a resolução, em que houve melhorias significativas. Desta forma, a placa DSAG foi atualizada, além do software, no qual foram implementadas atualizações nas rotinas de ensaio para atenderem aos requisitos da nova versão da Norma ANSI S12.6:2008. O diagrama do sistema de medição (Figura 2.30) continua o mesmo apesar das atualizações.

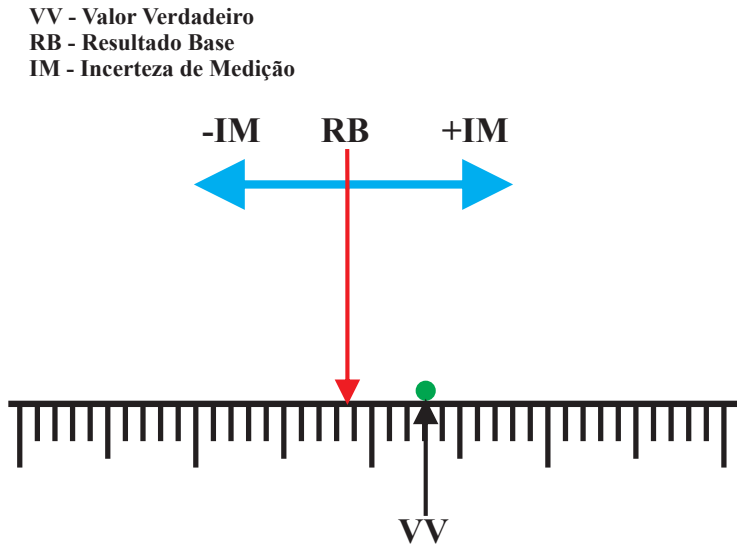
2.4 O PAPEL DA METROLOGIA EM MEDIÇÕES

Albertazzi e Sousa (2008) descrevem que “medir é o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (mensurando) é determinado como um múltiplo e/ou fração de uma unidade”. Em todas as medições realizadas não se conhece o valor exato do mensurado, mesmo após realizar correções dos erros, quando possível. Erros de medição sempre estão presentes e podem ser causados por diversos fatores. Segundo Lima (apud SOARES, 1999), “a metrologia exerce função de garantir a qualidade de sistemas de medição, fornecendo base para tomada de decisões nas atividades de avaliação de

produtos e processos”. Desta forma, para que o resultado da medição possa ser confiável, alguns procedimentos devem ser seguidos:

- Seleção e utilização adequada de instrumentos de medição;
- Calibrações periódicas dos instrumentos e sistemas de medição;
- Avaliação de incerteza de medição ou ensaio;
- Avaliação de conformidade com especificações.

O resultado de uma medição é sempre uma faixa de valor na qual espera-se que o valor real do que se está medindo (mensurando) esteja dentro. O resultado então é formado pelo resultado base acompanhado pela incerteza de medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). A Figura 2.31 apresenta o resultado de uma medição.



Fonte: adaptado de Albertazzi e Sousa (2008).

Figura 2.31: Resultado da medição.

O resultado base é o valor central da faixa encontrado na medição, é o valor que mais se aproxima do valor verdadeiro do que se está medindo. A incerteza de medição é a dúvida presente no resultado da medição. Ela é gerada a partir da combinação de diversos componentes de erros existentes que agem sobre o processo de medição ou ensaio.

“Incerteza de medição é a parcela de dúvida associada à medição” segundo Albertazzi e Sousa (2008).

Quando se realiza qualquer medição obtém-se um resultado final, a este resultado final é necessário que exista uma indicação quantitativa da qualidade deste resultado. Desta forma é possível avaliar a confiabilidade do resultado, sem isto os resultados de medição em diferentes momentos realizados por pessoas diferentes não poderiam ser comparados.

Na década de 1980, por falta de um consenso internacional sobre como expressar a incerteza de medição, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) requisitou que o Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), juntamente com laboratórios de metrologia, elaborassem uma proposta de solução para a questão. Um grupo de trabalho formado então pelo BIPM, juntamente com especialistas de 11 laboratórios de metrologia, produziram a recomendação INC-1 (1980) sobre expressão de incertezas experimentais. O CIPM ratificou essa recomendação em 1984 e posteriormente delegou esta função para a *Internacional Organization for Standardization* (ISO) para elaborar o GUM.

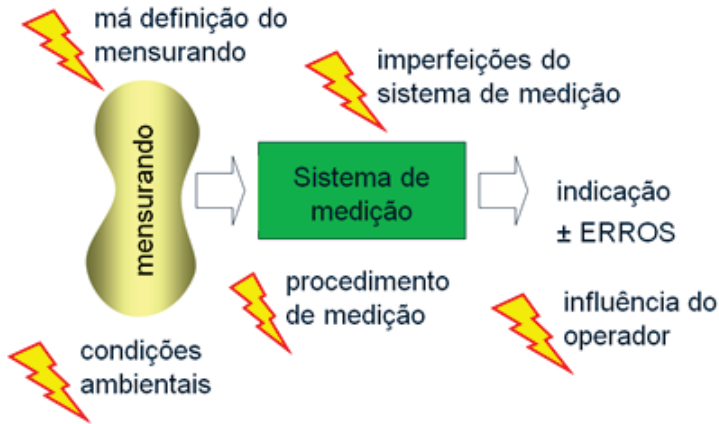
O GUM possui dois propósitos de orientação quanto a incerteza de medição:

- Promover informação completa quanto possível sobre como se chega a uma declaração de incerteza;
- Fornecer uma base para a comparação internacional de resultados de medição.

Além desses dois propósitos citados, a grandeza real utilizada deve ser internamente consistente, ou seja, diretamente derivável dos componentes que para ela contribua independente de como estas grandezas estejam agrupadas. Ela deve ser transferível para que seja possível utilizar diretamente a incerteza avaliada em outro processo como uma componente de incerteza. O método proposto no GUM é aplicável a todos os tipos de medições, todos os tipos de dados de entradas utilizados nas medições, desta forma é chamado de método universal, ISO GUM (2008).

Na área de acústica e vibração e, em particular, na área de protetores auditivos, existem poucas publicações a respeito das incertezas envolvidas. Apesar das normas de ensaios de atenuação passiva de ruído de protetores auditivos terem aparecido na década de 1950, pouco se sabe sobre as incertezas envolvidas nestas medições, Lima (apud BRINKMANN; RICHTER, 1986).

Em uma medição ou ensaio, diversas fontes de incerteza estão envolvidas. Essas fontes de incertezas podem ser devido a vários fatores em que seus efeitos atuam isoladamente ou combinadas com outras no processo de medição. A Figura 2.32 apresenta de forma genérica algumas fontes de incerteza que afetam o resultado de medição.



Fonte: adaptado de Albertazzi e Sousa (2008).

Figura 2.32: Fontes de erros de medição.

A avaliação metrológica de um processo de medição pode ser sintetizada em um algoritmo com oito passos, segundo Albertazzi e Sousa (2008). A Figura 2.33 apresenta o fluxograma do processo para determinação da incerteza e expressão do resultado de um sistema de medição.

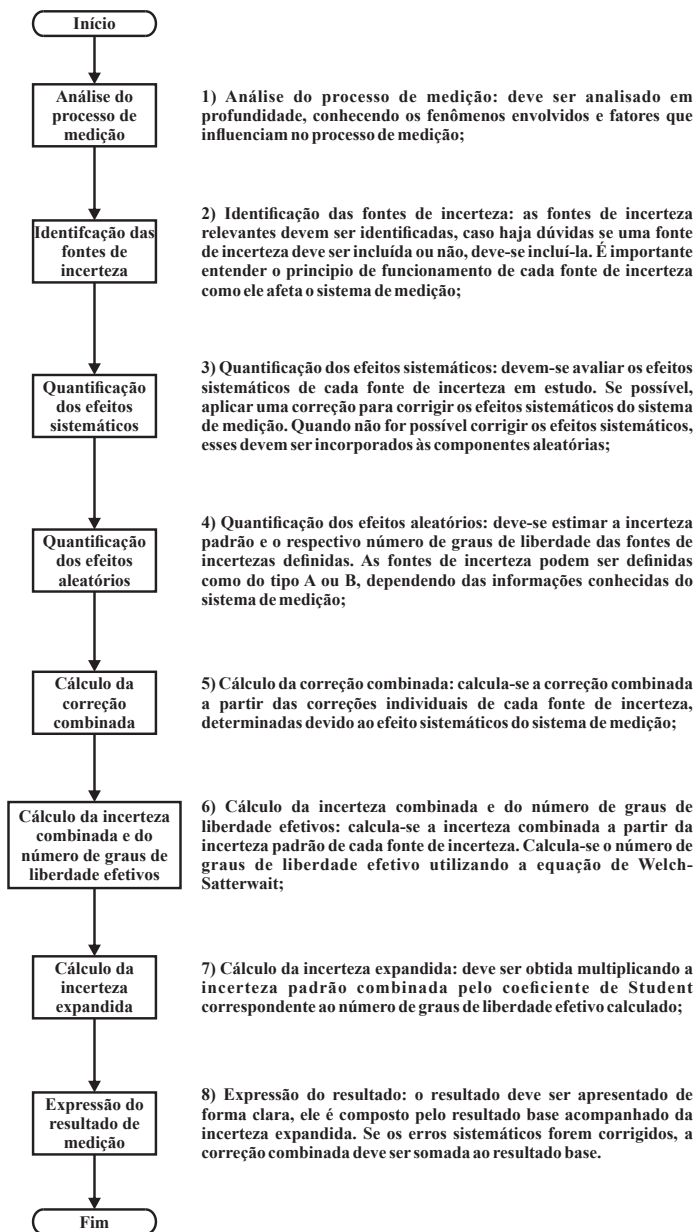


Figura 2.33: Fluxograma do processo de determinação da incerteza e expressão do resultado de medição.

2.4.1 Sensibilidade

A sensibilidade de um sistema de medição expressa o coeficiente de variação da resposta (sinal de saída) em relação ao estímulo (sinal de entrada). Quando a grandeza do estímulo é diferente da grandeza da resposta a sensibilidade envolve uma relação (coeficiente) entre as unidades dessas grandezas. A curva descrita pela sensibilidade é a curva característica de resposta (CCR) de um sistema de medição.

Em sistemas lineares, a sensibilidade é constante e corresponde à tangente do ângulo de inclinação da reta que representa a CCR de um sistema de medição. Em sistemas de medições não lineares, a sensibilidade é variável, sendo que a inclinação da CCR pode ser obtida pela derivada da curva. A Figura 2.34 ilustra uma sensibilidade linear e outra não linear.

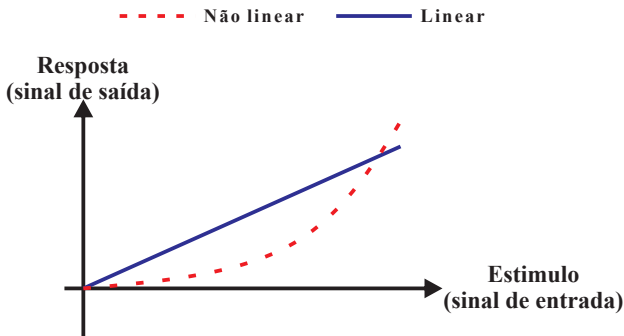


Figura 2.34: Sensibilidade de um sistema de medição linear e não linear.

2.4.2 Correção

Quando um erro sistemático é identificado e quantificado, é possível corrigi-lo. Na prática não é possível conhecer exatamente o erro sistemático de um sistema de medição e, desta forma, utiliza-se a tendência. A tendência é uma estimativa do erro sistemático de um sistema de medição. Ela pode ser obtida experimentalmente ou através dos dados fornecidos pelo fabricante.

A tendência, obtida experimentalmente, pode ser calculada a partir da média das medições repetidas efetuadas, subtraindo o valor

convencional³ do padrão medido. Dessa forma, o erro sistemático é aproximadamente compensado. Na prática, utiliza-se a correção, que é o valor oposto da tendência. Esta correção é somada ao resultado não corrigido da medição, compensando assim o erro sistemático e pode ser calculada através de,

$$C = VC - \bar{x}. \quad (2.10)$$

Sendo C a correção, VC o valor convencional e \bar{x} a média das indicações de uma medição. O erro sistemático pode variar ao longo da faixa de medição, não sendo um valor único. A Figura 2.35 ilustra a correção de um erro sistemático.

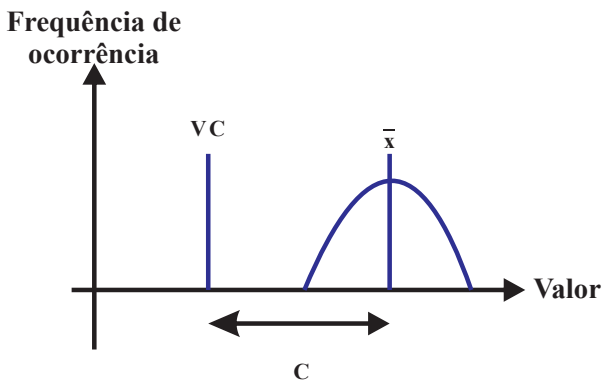


Figura 2.35: Correção de um erro sistemático.

2.4.3 Incerteza padrão

Mesmo após a correção dos erros sistemáticos de um sistema de medição existem ainda erros associados a medição. Indicações obtidas não se repetem exatamente devido ao erro aleatório existente. Esse comportamento aleatório do erro de medição pode ser representado por uma distribuição de probabilidade, podendo assumir a forma normal (gaussiana) ou outra qualquer, dependendo do tipo do sistema de medição, processo e etc.

De acordo com Albertazzi e Sousa (2008), a contribuição alea-

³Valor convencional é uma estimativa suficientemente próxima do valor verdadeiro do mensurando (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

tória de cada fonte de incerteza deve ser individualmente quantificada através da incerteza padrão. Pode-se utilizar dois caminhos para quantificar a incerteza padrão: procedimentos estatísticos, também conhecidos como do tipo A e procedimentos não estatísticos, conhecidos como do tipo B.

2.4.3.1 Incerteza padrão Tipo A

A incerteza padrão pode ser estimada através de medições repetidas do mesmo mensurando e calculando o desvio padrão da amostra de uma população, através de

$$u(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}. \quad (2.11)$$

Sendo $u(x)$ a incerteza padrão, x_i a i -ésima indicação, \bar{x} a média do número de indicações e N o número de indicações. Se o mensurando for invariável e seu valor for calculado a partir da média M de diversas medições repetidas, utiliza-se a incerteza padrão da média, calculada através de

$$u(\bar{x}) = \frac{u(x)}{\sqrt{M}} \quad (2.12)$$

Sendo $u(\bar{x})$ a incerteza padrão da média de M medições e M o número de medições repetidas utilizadas. Se o mensurando for variável, a incerteza padrão deve ser calculada conforme a Equação (2.11). Albertazzi e Sousa (2008) descrevem que a média de medições repetidas de um mensurando variável não reduz as variações do mensurando.

O número de graus de liberdade de uma incerteza padrão é calculado por

$$\nu = N - 1. \quad (2.13)$$

Sendo ν o número de graus de liberdade e N o número de medições utilizadas para estimar a incerteza padrão.

2.4.3.2 Incerteza padrão Tipo B

Quando não for possível ou prático estimar a incerteza padrão através de procedimentos estatísticos, deve-se utilizar outras informações de procedimento não estatísticos. Utiliza-se informações sobre o comportamento aleatório ou deduzidas através de observações como por exemplo, informações de certificados de calibração, especificações técnicas do sistema de medição, informações históricas obtidas de medições, para estimar a incerteza padrão. (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008) e (ISO GUM, 2008).

A amplitude e o tipo de distribuição de probabilidade podem ser utilizadas para estimar a incerteza padrão. De acordo com Shin e Hammond (2008), considerando-se o mensurando como uma variável aleatória, é possível estimar a incerteza padrão através do desvio padrão, que pode ser obtido calculando o segundo momento em torno da média da variável aleatória,

$$s_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx. \quad (2.14)$$

Sendo s_x o desvio padrão⁴ da variável aleatória x , \bar{x} a média da variável aleatória x e $p(x)$ a função da densidade de probabilidade da variável aleatória x . A Figura 2.36 apresenta três distribuições de probabilidade comuns e seu respectivo desvio padrão.

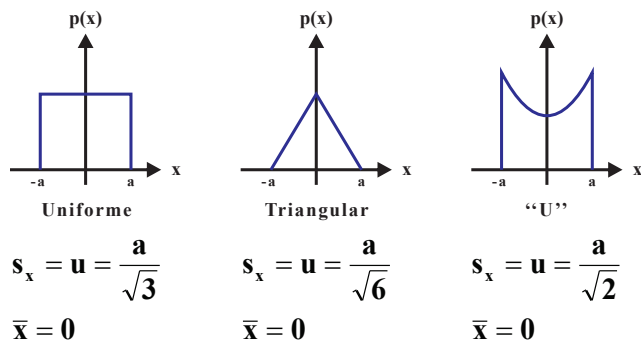


Figura 2.36: Três distribuições de probabilidade e seus desvios padrão.

⁴As normas de ensaio de atenuação de ruído de protetores auditivos, ANSI e ISO, utilizam a letra s para denotar o desvio padrão, desta forma é conveniente utilizar o mesmo símbolo.

Levantamentos experimentais devem ser utilizados para confirmar o tipo de distribuição de probabilidade de um fenômeno. Quando não é possível estimar o tipo de distribuição de probabilidade opta-se por utilizar a distribuição uniforme. (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008) e (ISO GUM, 2008).

Quando se utiliza o procedimento não estatístico e se conhece o tipo de distribuição de probabilidade da variável aleatória considera-se que o número de graus de liberdade (ν) é infinito.

2.4.4 Incerteza combinada

A ação combinada de vários erros aleatórios pode ser estimada através da incerteza padrão combinada, que é calculada a partir das incertezas padrão de cada fonte de incerteza. Deve-se avaliar a correlação existente entre as fontes de incerteza. A equação geral para calcular a incerteza padrão combinada é

$$u_c^2(G) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 u_i^2(x_i) + \dots \\ \dots + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\delta f}{\delta x_i} \frac{\delta f}{\delta x_j} u_i(x_i) u_j(x_j) r(x_i, x_j). \quad (2.15)$$

Sendo u_c a incerteza padrão combinada da grandeza G , f uma função matemática contínua e derivável que relaciona G com as grandezas de entradas x_i , u_i a incerteza padrão da i -ésima grandeza de entrada que está sendo combinada e $r(x_i, x_j)$ a estimativa do coeficiente de correlação da i -ésima e j -ésima grandeza de entrada. As derivadas parciais $\delta f / \delta x_i$ são os coeficiente de sensibilidade que descrevem como a grandeza G varia com alterações nos valores da estimativa de entrada x_i , ISO GUM (2008). A equação pode ser reescrita na forma de

$$u_c^2(G) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j). \quad (2.16)$$

Sendo c_i o coeficiente de sensibilidade da estimativa da entrada x_i . O coeficiente de correlação r de duas variáveis distintas quaisquer pode ser estimado por

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.17)$$

Sendo $r(x, y)$ a estimativa do coeficiente de correlação para as variáveis x e y , x_i e y_i o i -ésimo par de valores das variáveis x e y , \bar{x} e \bar{y} os valores médios das variáveis x e y e N o número total de pares das variáveis x e y .

O coeficiente de correlação é um número real que varia entre -1 e +1. Ele expressa a correlação existente entre duas variáveis aleatórias. Se o coeficiente de correlação for -1 ou +1, existe uma correlação direta entre as variáveis aleatórias, são estatisticamente dependentes. Quando o coeficiente de correlação for +1, o valor de uma variável aleatória aumenta ou diminui na mesma direção que a outra variável aleatória. Quando o coeficiente de correlação for -1, o valor de uma variável aleatória aumenta ou diminui na direção oposta da outra variável aleatória. Quando a correlação é -1 ou +1 a Equação (2.16) pode então ser reescrita na forma de

$$u_c(G) = \sum_{i=1}^N |c_i| u(x_i). \quad (2.18)$$

Caso o coeficiente de correlação seja zero, as duas variáveis aleatórias não possuem correlação, são estatisticamente independentes, a Equação (2.16) pode então ser reescrita na forma de

$$u_c^2(G) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2. \quad (2.19)$$

2.4.5 Número de graus de liberdade efetivos

Cada incerteza padrão tem um número de graus de liberdade (ν) associado. Ao se combinar as incertezas padrão de diversas fontes de incerteza, calcula-se o número de graus de liberdade equivalente dessa combinação. Esse número de graus de liberdade equivalente é denominado número de graus de liberdade efetivo (ν_{ef}) e é calculado a partir do número de graus de liberdade, da incerteza padrão de cada fonte de incerteza e da equação de Welch-Satterthwaite, conforme

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{(c_i u_i)^4}{\nu_i}}. \quad (2.20)$$

Sendo u_c a incerteza padrão combinada, ν_{ef} o número de graus de liberdade efetivos, u_i a incerteza padrão da i -ésima fonte de incerteza e ν_i o número de graus de liberdade da i -ésima fonte de incerteza. A Equação (2.20) é válida quando as fontes de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. De acordo com Willink (2007), caso exista correlação entre as fontes de incerteza utiliza-se a equação generalizada de Welch-Satterthwaite

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\sum_{j=1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)}{\nu_i} \right]^2}. \quad (2.21)$$

2.4.6 Incerteza expandida

A incerteza padrão combinada corresponde a um desvio padrão do conjunto de todas as incertezas padrão de todas as fontes de incertezas combinadas. Por vezes é necessário expressar a incerteza para uma probabilidade com o qual se espera encontrar o erro aleatório. O valor da incerteza padrão abrangendo uma probabilidade de ocorrer é denominada incerteza expandida (U) e pode ser calculada multiplicando a incerteza combinada (u_c) pelo respectivo coeficiente t de *Student*. O coeficiente t de *Student* corresponde ao número de graus de liberdade efetivos para uma probabilidade de ocorrência. O Quadro 2.4 apresenta os valores mais comuns de desvio padrão e sua probabilidade de ocorrência para uma distribuição normal.

Quadro 2.4: Faixa de abrangência e probabilidade.

| Valor de s | Probabilidade |
|------------|---------------|
| 1,00 | 68,27% |
| 1,96 | 95,00% |
| 2,00 | 95,45% |
| 2,58 | 99,00% |
| 3,00 | 99,73% |

A Figura 2.37 apresenta a distribuição de probabilidade normal com 3 desvios padrão diferentes e suas probabilidades de ocorrência, respectivamente.

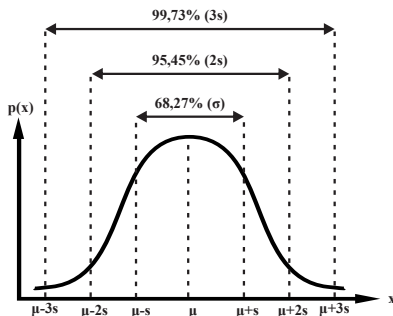


Figura 2.37: Distribuição de probabilidade normal.

O coeficiente t de *Student* para diferentes graus de liberdade e probabilidade de ocorrência pode ser encontrado no Anexo A. A incerteza expandida é calculada por

$$U = tu_c. \quad (2.22)$$

2.4.7 Expressão do resultado

A apresentação do resultado de uma medição ou ensaio deve conter o valor do resultado base acompanhado da incerteza expandida. Albertazzi e Sousa (2008) descrevem que “é importante apresentar de forma clara tanto o resultado base quanto a incerteza de medição”. O resultado base é a indicação ou média das indicações, se houver erros sistemáticos e estes forem corrigidos, devem ser somados a indicação ou média das indicações. O resultado de medição (RM) é expresso por

$$RM = \bar{x} + C \pm U. \quad (2.23)$$

2.4.8 Medição Direta e Indireta

As medições de um mensurando podem ser realizadas de forma direta ou indireta. Na medição direta as grandezas de entrada fornecem resultados do valor do mensurando, sendo que apenas um sistema de

medição está envolvido. A medição de um mensurando de forma indireta necessita da obtenção do valor do mensurando a partir de operações matemáticas envolvendo duas ou mais medições associadas a diferentes grandezas de entrada do mensurando. Pode-se citar como exemplo o cálculo da área de um terreno retangular, onde é necessário multiplicar o valor do comprimento (grandezas de entrada) pelo valor da largura (grandezas de entrada) do terreno. Um único sistema de medição ou diversos sistemas de medições distintos podem ser utilizados para medir as grandezas de entrada.

Quando se realiza uma medição indireta deve-se avaliar a correlação existente entre as grandezas de entrada e deve-se conhecer a relação matemática entre o mensurando e as grandezas de entrada. Os mesmos fundamentos de correlação apresentados no item 2.4.4 podem ser utilizados. A equação da estimativa de incerteza de medições indiretas é

$$u_c^2(G) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 u_i^2(x_i) + \dots \\ \dots + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\delta f}{\delta x_i} \frac{\delta f}{\delta x_j} u_i(x_i) u_j(x_j) r(x_i, x_j). \quad (2.24)$$

Sendo u_c a incerteza padrão combinada do mensurando G , f uma função matemática contínua e derivável que relaciona G com as grandezas de entradas x_i , u_i a incerteza padrão da i -ésima grandeza de entrada que está sendo combinada e $r(x_i, x_j)$ a estimativa do coeficiente de correlação i -ésima e j -ésima grandezas. O coeficiente de correlação r entre duas grandezas de entrada quaisquer pode ser estimado por

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.25)$$

2.4.9 Rastreabilidade e calibração

O processo de medição de alguma grandeza física, o mensurando, é um processo experimental, onde este é comparado com uma

referência, grandeza padrão reconhecida internacionalmente. Existe uma cadeia de relacionamento hierárquico estabelecida, onde o sistema de medição é referenciado a padrões e estes são referenciados a outros padrões e assim por diante. No topo desta cadeia encontra-se a definição da unidade de medida de base do sistema internacional de unidades. Desta forma, quando o sistema de medição possui uma calibração rastreável, significa que está referenciada aos padrões internacionais. Existem diversos níveis hierárquicos, desde padrões de trabalho até padrões internacionais, que são aqueles reconhecidos como tendo as mais altas qualidades metrológicas. A Figura 2.38 apresenta os níveis hierárquicos (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).



Fonte: adaptado de Albertazzi e Sousa (2008).

Figura 2.38: Hierarquia de padrões e sua rastreabilidade às unidades do sistema internacional.

O sistema de medição deve ser rastreado até os padrões internacionais, visando garantir a qualidade e confiabilidade das medições. A rastreabilidade dos sistemas de medição é muito importante. Segundo Albertazzi e Sousa (2008), a rastreabilidade pode ser entendida como,

propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado às referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais por meio de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.

Além do sistema de medição ser rastreável até os padrões internacionais, ele deve correlacionar os valores indicados à grandeza que

está sendo medida. Esse procedimento que correlaciona esses valores é a calibração. Albertazzi e Sousa (2008) definem calibração como,

conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões.

2.4.10 Metrologia nos ensaios de atenuação passiva de ruído de protetores auditivos pelo método REAT

Quando se apresenta um resultado, este deve estar acompanhado de uma indicação quantitativa da qualidade do resultado (incerteza de medição), ISO GUM (2008). Desta forma, os resultados dos ensaios de atenuação passiva de ruído de protetores auditivos pelo método REAT devem apresentar sua incerteza de medição para que seja possível a:

- Comparação de diferentes modelos de protetores auditivos;
- Comparação de ensaio de diferentes laboratórios para um mesmo modelo de protetor auditivo;
- Aplicação correta dos valores de atenuação para os cálculos de exposição ao ruído dos usuários de protetores auditivos.

Lima (apud BRINKMANN, 1988) explica que, apesar da popularização do método REAT para medição de atenuação passiva de protetores auditivos, a incerteza de medição desse método é pouco conhecida e foi pouco estudada. Além disso, atualmente, os fabricantes/importadores e/ou MTE fornecem apenas a atenuação média e o desvio padrão para cada banda de frequência de ensaio, além do número único. Não é apresentada qualquer informação referente a incerteza associada ao ensaio realizado.

Nas primeiras versões das normas de ensaio de atenuação de ruído pelo método REAT, ANSI S3.19 (1974), ANSI S12.6 (1984) e ISO 4869-1 (1981) e ISO 4869-1 (1990), nada foi apresentado quanto à incerteza ou variabilidade do ensaio.

Na ANSI S12.6 (1997) é apresentado um anexo sobre a precisão do método REAT, e cita que as fontes que geram a variabilidade no resultado são:

- Incerteza dos limiares de audição aberto e fechado;
- Variação na colocação do protetor auditivo, de tempos em tempos e entre laboratórios;
- Diferença na anatomia da cabeça e dos canais auditivos dos ouvintes utilizados;
- Diferença entre as salas de ensaio e equipamentos utilizados.

Nesse anexo é apresentado o resultado de um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade realizado por Murphy et al. (1996). Neste estudo são utilizados dados de ensaios interlaboratoriais realizado por Royster et al. (1996) e um método estatístico baseado no teste de hipótese utilizando uma distribuição F. O resultado apresentado indica que utilizando no mínimo 10 ouvintes nos ensaios de protetores auditivos do tipo concha e 20 ouvintes nos ensaios de protetores auditivos do tipo plugue, obtém-se uma reprodutibilidade de 6 dB, ± 3 dB, com um nível de confiança de 84 %. Apesar disso, não é apresentado nenhuma informação sobre a contribuição de cada fonte ou uma análise de acordo com a metodologia proposta pelo ISO GUM.

Lima (2003) avaliou metrologicamente o sistema de medição desenvolvido por ele, de acordo com a metodologia proposta pelo ISO GUM. As fontes de incerteza consideradas foram o incremento de amplitude do sistema de medição, calibração do sistema de medição, variação da resposta do ouvinte e geração do sinal, para cada banda de frequência de ensaio. Lima concluiu que a instrumentação possui pequena influência quando comparada com a variabilidade da resposta do ouvinte. Além disso, as incertezas devido a geração de sinal não afetam o resultado da medição e podem ser desprezadas. Por fim, é inferido que, os resultados do modelo adotado estão em concordância com os valores citados na ANSI S12.6 (1997) e Royster et al. (1996).

A ISO 4869-5 (2006) apresenta um balanço de incerteza do ensaio conforme a metodologia do ISO GUM. Ela considera 5 fontes de incerteza para cada banda de frequência de ensaio:

- Variabilidade do limiar aberto: 2 dB;
- Variabilidade do limiar fechado: 3 dB para o concha e 5 dB para o plugue;
- Variabilidade do grupo de ouvintes utilizados: 4 dB;
- Variabilidade do campo acústico: 0,5 dB;
- Incerteza dos equipamentos: 0,2 dB;

Todas as fontes de incerteza foram consideradas tendo uma distribuição de probabilidade normal para todas as bandas de frequência de ensaio. A variabilidade do limiar aberto e fechado foram estimadas através de medições do *National Acoustic Laboratories* da Austrália e da NIOSH dos EUA. No momento da publicação desta norma, a variabilidade do grupo de ouvintes estava ainda sendo estimada e a variabilidade do campo acústico e incerteza dos equipamentos foram estimadas através da experiência dos diversos laboratórios de ensaio da Europa. A incerteza combinada e expandida com um nível de confiança de 95% é apresentado no Quadro 2.5, estes valores são válidos para cada banda de frequência de ensaio.

Quadro 2.5: Incerteza do ensaio de acordo com ISO 4869-5.

| Incerteza | Concha | Plugue |
|----------------|--------|--------|
| Combinada [dB] | 5,4 | 6,7 |
| Expandida [dB] | 10,8 | 13,4 |

A ANSI S12.6 (2008), revisão da versão de 1997, apresenta uma análise da variabilidade utilizando a ANOVA⁵ em seu anexo, de três estudos interlaboratoriais (ROYSTER et al., 1996; MURPHY et al., 2004, 2006). Essa análise foi realizada para determinar a variabilidade da repetibilidade e reprodutibilidade de dois protocolos de ensaios, ouvintes treinados/supervisionados (método A) e ouvintes não treinados/inexperientes (método B), em dois tipos de protetores auditivos, concha e plugue. Murphy et al. (2004) calculam a repetibilidade e reprodutibilidade através das seguintes equações,

$$u_{\text{Repetibilidade}} = \sqrt{\frac{s_{\text{ouvintes}}^2}{n_s} + \frac{s_{\text{série}}^2}{(n_s n_t)}}, \quad (2.26a)$$

$$u_{\text{Reprodutibilidade}} = \sqrt{s_{\text{laboratório}}^2 + \frac{s_{\text{ouvintes}}^2}{n_s} + \frac{s_{\text{série}}^2}{(n_s n_t)}}. \quad (2.26b)$$

Sendo $s_{\text{laboratório}}$ o desvio padrão da atenuação do laboratório, s_{ouvintes} o desvio padrão da atenuação entre os ouvintes, $s_{\text{série}}$ o desvio padrão da atenuação de um mesmo ouvinte, n_s o número de ouvintes e n_t o número de séries por ouvinte, para cada banda de frequência de ensaio.

⁵Análise de variância, em que se testa a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais.

Concluíram que a repetibilidade estimada para os protetores auditivos do tipo concha são menores que do tipo plugue. A repetibilidade para protetores auditivos do tipo concha é similar para os dois protocolos de ensaio. A repetibilidade para protetores auditivos do tipo plugue pelo protocolo de ensaio de ouvintes treinados/supervisionados (Método A) é um pouco menor que para o protocolo de ensaio de ouvintes não treinados/inexperientes (Método B). A estimativa da maior repetibilidade de todas as bandas de frequência de ensaio é apresentada no Quadro 2.6.

Quadro 2.6: Estimativa da repetibilidade.

| Repetibilidade | Método A | Método B |
|----------------|----------|----------|
| Concha [dB] | 1,3 | 1,3 |
| Plugue [dB] | 2,0 | 2,5 |

A reprodutibilidade possui uma variação maior que a repetibilidade. A variabilidade entre laboratórios é alta para os protetores auditivos tipo plugue. A estimativa da reprodutibilidade dos dois protocolos de ensaio para os protetores auditivos tipo concha são próximas. A estimativa da maior reprodutibilidade de todas as bandas de frequência de ensaio é apresentada no Quadro 2.7.

Quadro 2.7: Estimativa da reprodutibilidade.

| Reprodutibilidade | Método A | Método B |
|-------------------|----------|----------|
| Concha [dB] | 3,5 | 3,0 |
| Plugue [dB] | 6,5 | 4,0 |

Os resultados apresentados nos Quadros 2.6 e 2.7 são equivalentes aos da incerteza padrão combinada dos resultados apresentados no anexo da ISO 4869-5, de acordo com ANSI S12.6 (2008).

Murphy et al. (2009) realizaram um novo estudo interlaboratorial para comparar os dois protocolos de ensaio especificados na ANSI S12.6 para protetores auditivos tipo concha e plugue. Esse estudo utilizou ensaios realizados em 6 diferentes laboratórios espalhados pelo mundo. Foi utilizada a mesma metodologia desenvolvida por Royster et al. (1996) e Murphy et al. (2006). A estimativa da maior repetibilidade de todas as bandas de frequência de ensaio é apresentada no Quadro 2.8.

Quadro 2.8: Estimativa da repetibilidade.

| Repetibilidade | Método A | Método B |
|----------------|----------|----------|
| Concha [dB] | 1,2 | 1,2 |
| Plugue [dB] | 1,5 | 2,0 |

A estimativa da maior reprodutibilidade de todas as bandas de frequência de ensaio é apresentada no Quadro 2.9.

Quadro 2.9: Estimativa da reprodutibilidade.

| Reprodutibilidade | Método A | Método B |
|-------------------|----------|----------|
| Concha [dB] | 2,5 | 1,5 |
| Plugue [dB] | 5,0 | 2,6 |

Na ANSI S12.6 (2016), revisão da versão de 2008, em seu anexo é apresentado um balanço de incerteza do ensaio conforme a metodologia apresentada no ISO GUM. Ela considera 3 fontes de incerteza para cada banda de frequência de ensaio:

- Incerteza da média dos ouvintes do ensaio;
- Incerteza dos equipamentos;
- Incerteza do campo acústico.

A estimativa da incerteza da média dos ouvintes é obtida através da Equação (2.12), com distribuição de probabilidade normal para todas as bandas de frequência do ensaio. A estimativa da incerteza dos equipamentos considerada é 0,2 dB e do campo acústico é 0,5 dB, com distribuição de probabilidade normal para todas as bandas de frequência do ensaio.

A estimativa da incerteza do ensaio pode ser obtida para um laboratório específico, neste caso, utiliza-se o desvio padrão da atenuação dos ouvintes para cada banda de frequência. Além disso, a estimativa da incerteza do ensaio pode ser obtida para diversos laboratórios, neste caso, utiliza-se o desvio padrão da atenuação de todos os ouvintes utilizados dos diferentes laboratórios que participarem do ensaio.

No exemplo apresentado no anexo, a maior estimativa de incerteza do ensaio de protetor auditivo tipo concha é 1,5 dB e a incerteza expandida é 3 dB. A maior estimativa da incerteza entre laboratórios para protetor auditivo tipo concha é 3,1 dB e a incerteza expandida é 4 dB. Para protetor auditivo tipo plugue a maior estimativa de incerteza entre laboratórios é 4 dB e a incerteza expandida é 8 dB.

3 AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO ENSAIO

Este capítulo apresenta o método utilizado para determinar o limiar de audição dos ouvintes durante o ensaio e, em seguida, a avaliação metrológica desse método juntamente com o sistema de medição para estimar a incerteza padrão do limiar de audição. Posteriormente, é apresentada a metodologia para determinar a atenuação do ensaio através dos limiares de audição mensurados e a avaliação metrológica para estimar a incerteza padrão e expandida da atenuação do ensaio. Por fim, é apresentada a metodologia utilizada para determinar o número único de atenuação de ruído através da atenuação do ensaio e sua avaliação metrológica para estimar a incerteza padrão e expandida.

3.1 DETERMINAÇÃO DO LIMIAR DE AUDIÇÃO

Como apresentando anteriormente, a Norma ANSI S12.6 (2016) determina a atenuação de ruído de protetores auditivos através do limiar de audição com e sem o protetor auditivo. Nessa Norma o limiar de audição é obtido através do método Békésy. Nesse método são utilizadas 6 inversões para calcular o limiar de audição. A Figura 3.1 apresenta um traço do limiar de audição.

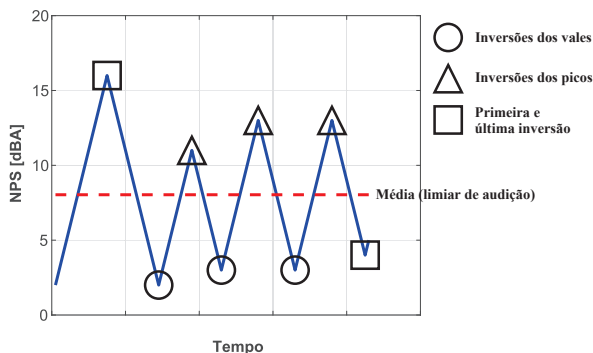


Figura 3.1: Traço do limiar de audição.

No método Békésy, o estímulo sonoro fica concentrado em torno do limiar de audição. O traço do limiar de audição em uma dada banda de frequência de ensaio, desconsiderando a primeira e a última inversão,

deve respeitar os seguintes critérios de acordo com a Norma ANSI S12.6 (2016):

- Diferença entre inversões subsequentes maior que 3 dB;
- Existência de 6 inversões desconsiderando a primeira e última inversão;
- Qualquer um dos picos das inversões não pode ser menor que qualquer um dos vales das inversões e vice-versa;
- Distância da excursão (diferença entre o maior pico e menor vale) não deve exceder a 20 dB.

Caso um desses critérios não seja atendido, o limiar de audição na banda de frequência que está sendo ensaiado deve ser repetido até que todos os critérios sejam atendidos. O limiar de audição é calculado através da média aritmética do valor das inversões dos vales e dos picos,

$$L = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N I_i. \quad (3.1)$$

Sendo N o número de inversões e I o valor das inversões, podendo ser picos e vales para cada banda de frequência de ensaio. A percepção do momento em que o ouvinte escuta e deixa de escutar o estímulo sonoro depende de diversos fatores. Esses fatores estão relacionados ao ouvinte, protetor auditivo, câmara acústica, parâmetros do ensaio e equipamentos utilizados e serão discutidos em detalhes mais à frente. O sistema de medição utilizado é idêntico ao que Lima desenvolveu em 2003 e que foi atualizado em 2008, com a cadeia de medição apresentada na Figura 2.30.

3.2 AVALIAÇÃO METROLÓGICA DA DETERMINAÇÃO DO LIMIAR DE AUDIÇÃO

As normas ISO 4869-1 (1990), ANSI S12.6 (2016) e ISO 4869-5 (2006), além de Lima (2003), Lima et al. (2010), Gerges e Gerges (2015) e Gerges et al. (2016), citam que os principais erros estão associados ao sistema de medição, parâmetros de ensaio, campo acústico da sala de ensaio e ouvintes e amostras dos protetores auditivos utilizados nos ensaios. A avaliação metrológica da determinação do limiar de audição é dividida nestes quatro componentes citados e serão apresentados nos próximos itens. A Figura 3.2 apresenta as fontes de erros desses quatro componentes distribuídas em sete categorias.

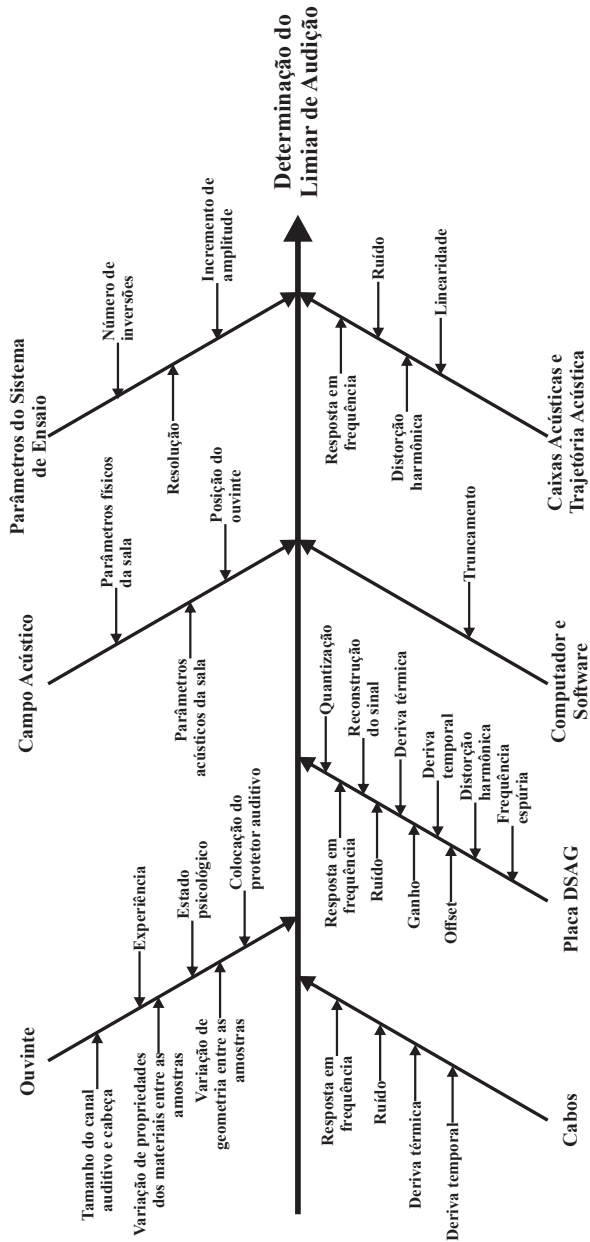


Figura 3.2: Diagrama das fontes de incerteza.

3.2.1 Sistema de medição

O sistema de medição, apresentado na seção 2.3, é constituído de um computador com software, placa de geração e aquisição de sinais, cabos, caixas acústicas e botão de resposta do ouvinte.

O sistema de medição é esquematizado na Figura 3.3. O computador, através do software, gera um código binário para a placa DSAG, que por sua vez transforma esse código binário em uma tensão na saída da placa, através do conversor digital analógico¹ (DAC). Essa tensão é transmitida através de cabos que são conectados às caixas acústicas com amplificadores que transformam a tensão do sinal elétrico em sinal acústico (pressão sonora). Esse sinal acústico é transmitido pela câmara acústica até o ponto de referência, onde encontra-se a cabeça do ouvinte. Por tratar-se de um ambiente com campo sonoro difuso², o ponto de referência está exposto às ondas sonoras de incidência direta e refletida. O ouvinte ao escutar o sinal acústico aciona o botão de resposta, gerando uma tensão na entrada da placa DSAG. A placa por sua vez transforma essa tensão na entrada em um código binário, através do conversor analógico digital³ (ADC), que avisa ao software que o ouvinte escutou o sinal acústico. O software ao receber este aviso decrementa o código binário em relação ao anterior e envia novamente para a saída da placa DSAG e o processo se repete. Caso o ouvinte não escute o sinal acústico e não acione o botão de resposta, a tensão na entrada da placa DSAG é nula e o software incrementa o valor do último código binário da saída.

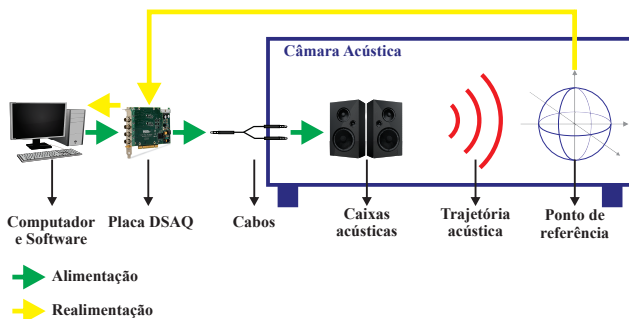


Figura 3.3: Cadeia do sistema de medição.

¹ *Digital to Analog Converter*

² Energia sonora é uniformemente distribuída no volume da câmara (GERGES, 2000)

³ *Analog to Digital Converter*

Para cada componente apresentado são avaliados os erros sistemáticos e aleatórios em função da banda de frequência de ensaio e determinadas as correções e estimativas das incertezas padrão de cada componente e do sistema de medição. A sensibilidade será determinada para o sistema de medição como um todo, experimentalmente, para cada banda de frequência de ensaio.

3.2.1.1 Computador e software

Esse componente trabalha apenas com as informações digitais do sistema de medição, ou seja, bits. O único erro presente neste componente é o truncamento da informação.

3.2.1.1.1 *Truncamento*

Em cada operação matemática que é realizada no computador uma certa quantidade de informação é perdida, uma vez que nenhum sistema possui resolução infinita. A quantidade de informação perdida dependerá da resolução definida no sistema para armazenar as informações/valores. No caso de sistemas digitais, a resolução é definida pelo número de bits que o sistema utiliza, dependendo do tipo da arquitetura utilizada.

O computador e software utilizados trabalham com números de pontos flutuantes de 64 bits. Esse tipo de representação baseia-se no deslocamento da vírgula, otimizando assim o processamento e armazenamento do número, através da utilização de notação científica. Com essa representação é possível representar números decimais com aproximadamente 15 dígitos decimais, segundo Ruggiero e Lopes (1996). Nas rotinas do software os números são representados em sistema numérico decimal, mas o computador converte, armazena e realiza operações com esses números no sistema numérico binário. A Figura 3.4 ilustra a forma como o computador armazena o número binário, o bit menos significativo (LSB⁴) é o que possui menor peso, ou seja, de menor valor e o bit mais significativo (MSB⁵) é o que possui maior peso, maior valor.

⁴ *Least Significant Bit*

⁵ *Most Significant Bit*

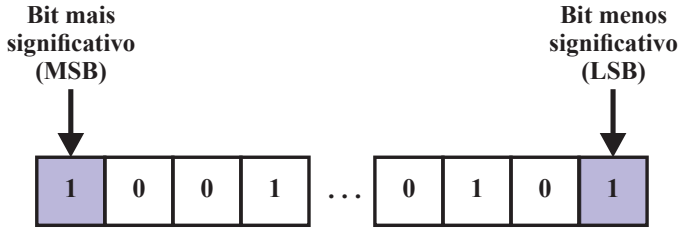


Figura 3.4: Representação binária.

O truncamento desse número binário possui um erro aleatório associado ao LSB. O erro dessa fonte de incerteza, pode ser modelado como sendo $\pm\text{LSB}/2$ e a estimativa da incerteza padrão pode ser modelada com uma distribuição de probabilidade uniforme, uma vez que o truncamento é discreto, tendo a mesma probabilidade de ocorrer entre $-\text{LSB}/2$ e $+\text{LSB}/2$.

$$Erro_{\text{Truncamento}} = \pm \frac{\text{LSB}}{2}, \quad (3.2a)$$

$$u_{\text{Truncamento}} = \frac{\text{LSB}}{2\sqrt{3}}. \quad (3.2b)$$

No caso do sistema de medição, o erro e a estimativa da incerteza padrão associado ao erro de truncamento do computador são

$$Erro_{\text{Truncamento}} = \pm \frac{1}{2} = 0,50 \text{ bit}, \quad (3.3a)$$

$$u_{\text{Truncamento}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,29 \text{ bit}. \quad (3.3b)$$

3.2.1.1.2 Correção e incerteza padrão combinada

Conforme apresentado no item 3.2.1.1.1, não há erro sistemático, desta forma, não há correção a ser realizada.

A estimativa da incerteza padrão do computador é composta pela fonte de incerteza apresentada no item 3.2.1.1.1. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada do computador e software,

$$u_{\text{PC}}^2 = u_{\text{Truncamento}}^2. \quad (3.4)$$

O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza do truncamento é considerado infinito, pois esta fonte de incerteza é considerada do tipo B. O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza do computador e software é obtido através da Equação (2.20). O Quadro 3.1 apresenta a estimativa da incerteza padrão e o número de graus de liberdade do computador e software.

Quadro 3.1: Incerteza padrão do computador e software.

| N. | Fonte de Erro | Erro Aleatório (bit) | Distribuição | u (bit) | ν |
|----|---------------|----------------------|--------------|---------|----------|
| 1 | Truncamento | 0,50 | Uniforme | 0,29 | ∞ |

A correção, a estimativa de incerteza padrão combinada do computador e software e o número de graus de liberdade são

$$C_{PC} = 0 \text{ bit}, \quad (3.5a)$$

$$u_{PC} = 0,29 \text{ bit}, \quad (3.5b)$$

$$\nu_{PC} = \infty. \quad (3.5c)$$

3.2.1.2 Placa DSAG

A placa DSAG é responsável por transformar as informações digitais de bits em valores de tensão na saída, realizando uma conversão de bits para volts. A placa utilizada no sistema de medição é a NI 4461 com barramento PCI. Conforme apresentado na Figura 3.2 existem diversas fontes de erros sistemáticos e aleatórios presentes devido a não idealidade do dispositivo.

3.2.1.2.1 Erro de quantização

O processo de conversão de informações digital-analógico pode ser separado em duas etapas, amostragem e quantização, apesar de que na prática ambas não ocorrem separadas. Nesse processo o valor que é representado por um código binário é convertido em uma tensão proporcional ao valor digital. A resolução do conversor DAC, que realiza essa operação, corresponde à variação dos valores binários na entrada que produz valores de tensão na saída. Essa resolução depende exclusivamente do número de bits efetivos do conversor DAC e da tensão de

referência (Figura 3.5). Essa tensão de referência determina qual será a faixa da tensão de saída (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008), (LATHI, 2007), (SHIN; HAMMOND, 2008) e (TOCCI et al., 2007).

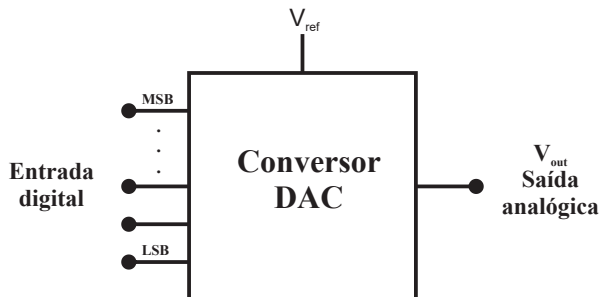


Figura 3.5: Conversor DAC.

Para cada possível número binário na entrada, um nível de tensão de saída é gerado. Desta forma, a tensão de saída não é um sinal analógico pois não pode assumir qualquer valor, ela assumirá valores discretos. A Figura 3.6 ilustra a conversão digital-analógico realizada pelo DAC.

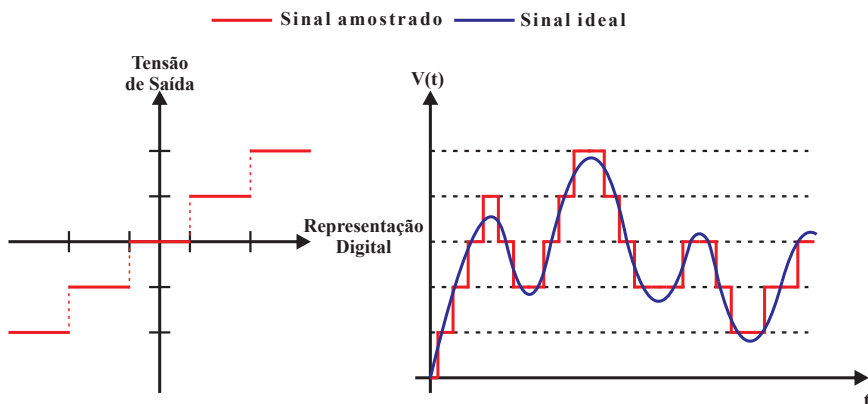


Figura 3.6: Representação do DAC.

Tocci et al. (2007) definem que a resolução do DAC é calculada por

$$R_{\text{DSAG}} = \frac{V_{\text{ref}}}{2^{\text{Bits}} - 1}. \quad (3.6)$$

Sendo R a resolução do DAC em V/bit e V_{ref} a tensão de referência em volts de pico a pico. O DAC da placa NI 4461 possui 24 bits efetivos (sem considerar o bit para definir o sinal positivo e negativo) e trabalha com uma faixa de ± 10 V (20 V), neste caso,

$$R_{\text{DSAG}} = \frac{20}{2^{24} - 1} = 0,00119 \text{ mV/bit}. \quad (3.7)$$

A resolução da placa DSAG PCI 4461 é de 0,00119 mV/bit, ou seja, para cada incremento ou decremento do valor binário pela unidade do LSB. Esse valor é válido para qualquer tipo de sinal independente da frequência.

Como apresentado em 3.2.1.1.1, nenhum sistema possui resolução infinita, devido a isso a cada operação é realizado um truncamento do valor e uma parte da informação é perdida. Ao se realizar a operação de conversão digital-analógico (quantização) do sinal existe um erro associado que dependerá da resolução do DAC. Esse erro ocorre em torno de um dos valores de tensão discreto, na quantização do sinal não há parcela de erro sistemático, não sendo necessário realizar uma correção. O erro gerado pelo truncamento da quantização pode ser tratado como um erro aleatório, geralmente definido com uma distribuição de probabilidade uniforme, Shin e Hammond (2008). Sendo modelado por $\pm R_{\text{DSAG}}/2$,

$$\text{Erro}_{\text{Quantização}} = \pm \frac{R_{\text{DSAG}}}{2}, \quad (3.8a)$$

$$u_{\text{Quantização}} = \frac{R_{\text{DSAG}}}{2\sqrt{3}}. \quad (3.8b)$$

Para a placa DSAG NI 4461 que possui uma resolução de 0,00119 mV/bit, o erro aleatório e a estimativa da incerteza padrão da quantização são

$$\text{Erro}_{\text{Quantização}} = \pm \frac{0,00119 \cdot 10^{-3}}{2} = \pm 0,00060 \text{ mV}, \quad (3.9a)$$

$$u_{\text{Quantização}} = \frac{0,00119 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00034 \text{ mV}. \quad (3.9b)$$

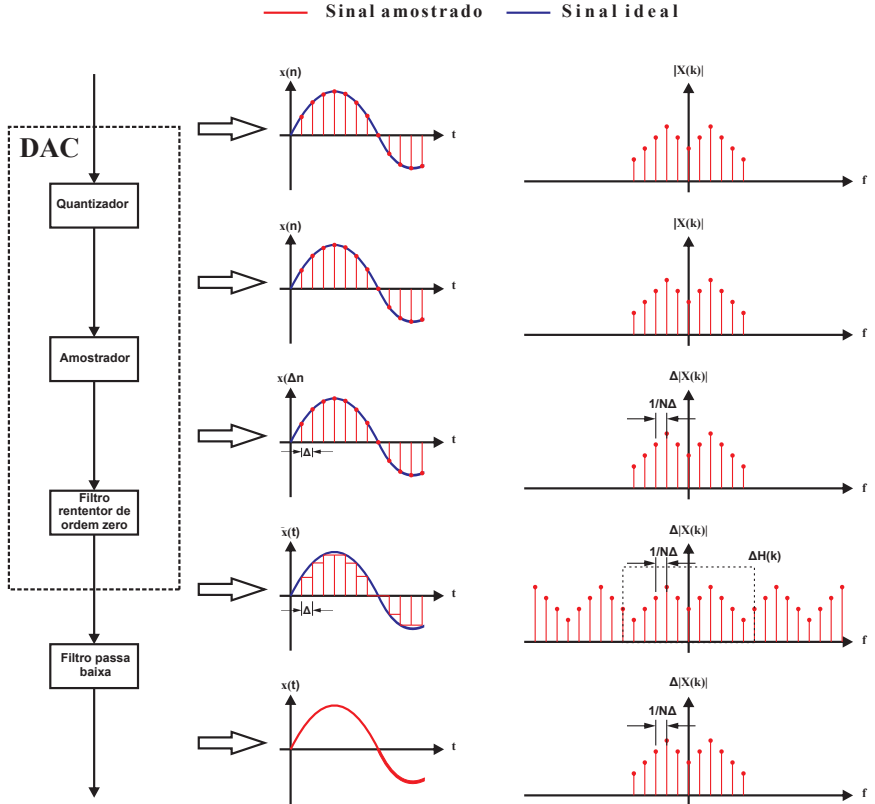
É importante analisar o truncamento realizado pelo computador e software (64 bits) e o erro de quantização do DAC (24 bits). A resolução de um número binário de 64 bits é 2^{40} vezes maior que o de um número binário de 24 bits. A parcela de incerteza do truncamento do número binário de 64 bits torna-se insignificante em relação à incerteza associada ao erro de quantização (24 bits) e pode ser desconsiderada.

3.2.1.2.2 Erro de reconstrução do sinal

O teorema de amostragem de Shannons define que para a reconstrução adequada do sinal é necessário que não se tenha *aliasing*, desta forma o teorema de Nyquist deve ser observado. A taxa de amostragem do sinal deve ser o dobro da frequência mais alta do sinal a ser reconstruído. A reconstrução de um sinal analógico ideal (contínuo no tempo), a partir de um sinal digital requer que o sinal possua uma amplitude finita com uma largura temporal igual a zero ($\Delta t \rightarrow 0$), sendo esta largura temporal impossível de ser realizada na prática. O sinal reconstruído é amostrado a cada intervalo de tempo (Δt), definido pela taxa de amostragem e o tamanho de amostras (N), mantendo a tensão de saída constante até que a próxima amostra altere seu valor. Esse sinal de saída pode ser modelado por uma série de pulsos e é realizado através de um filtro retentor de ordem zero. A utilização desse filtro gera componentes em alta frequência, sendo necessário implementar um filtro passa baixa para filtrar esse sinal com frequência de corte igual à metade da taxa de amostragem (LATHI, 2007) e (SHIN; HAMMOND, 2008). A Figura 3.7 ilustra o processo de reconstrução do sinal.

O sinal passa pelo filtro retentor de ordem zero, retendo o valor de tensão de saída constante durante cada intervalo de tempo Δt . Esse filtro gera componentes espectrais em alta frequência e possui uma resposta em frequência no formato da função sinc, na forma de,

$$Err_{\text{Reconstrução do sinal}} = \frac{\text{sinc}\left(\frac{\pi f}{f_s}\right)}{\frac{\pi f}{f_s}} V. \quad (3.10)$$



Fonte: adaptado de Shin e Hammond (2008).

Figura 3.7: Processo de reconstrução do sinal.

A Figura 3.8 apresenta o erro devido à reconstrução do sinal para três diferentes taxas de amostragem f_s ⁶. Quanto maior for a frequência de amostragem menor será o erro devido a reconstrução do sinal. Para uma frequência de amostragem de 51,2 kS/s, o erro devido à reconstrução do sinal torna-se significativo para a banda de frequência de 8 kHz em 1/3 de oitava. Para as frequências de amostragem de 102,4 kS/s e 204,8 kS/s, o erro devido a reconstrução do sinal não é significativo para a banda de frequência de 8 kHz em 1/3 de oitava.

⁶A unidade da frequência de amostragem f_s é Samples/s.

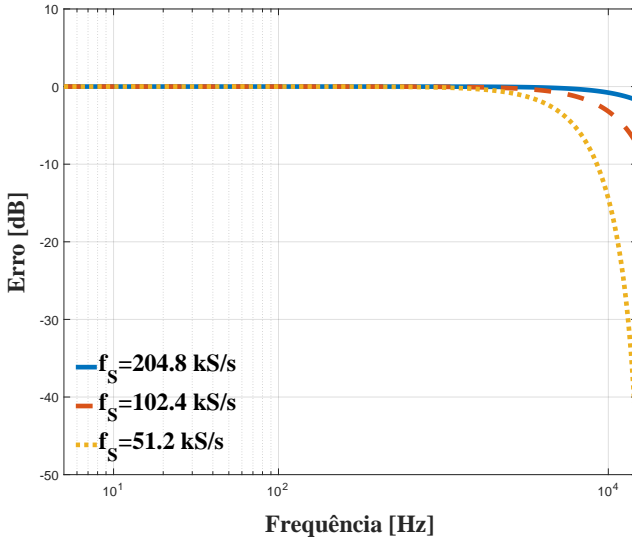


Figura 3.8: Erro devido à reconstrução do sinal.

Com isso, a amplitude do sinal reconstruído $x(t)$ possui uma amplitude menor que do sinal original. Esse erro pode ser minimizado aumentando a taxa de atualização do DAC. O sinal então passa pelo filtro passa baixa com o objetivo de remover essas componentes de alta frequência geradas pelo filtro retentor de ordem zero.

O erro gerado na reconstrução do sinal pode ser considerado como um erro sistemático e pode ser corrigido digitalmente, antes do sinal passar pelo DAC, analogicamente, através de um filtro pós-equalizador ou ainda através do processo de calibração do sistema.

A placa PCI 4461 possui em seus circuitos um módulo interpolador que reamostra os sinais digitais com taxa 8 vezes superior a taxa de amostragem do DAC. Com isso, o erro de reconstrução do sinal é reduzido. Neste caso, até para uma frequência de amostragem de 51,2 kS/s o erro de reconstrução se torna insignificante.

Mesmo após o sinal ser reamostrado digitalmente pode haver uma parcela do erro da reconstrução do sinal. Este erro pode ser considerado sistemático e é corrigido no momento da determinação da CCR do sistema de medição

3.2.1.2.3 Erro de offset

Os erros de *offset* são gerados pela placa DSAG. Esse equipamento gera tensões que não fazem parte do sinal original devido a suas não idealidades. Essas tensões de *offsets* são conhecidas também como tensão residual DC, possuem valores de tensão constantes e podem gerar erros no sinal gerado pelo sistema de medição.

A Figura 3.9 ilustra o erro de *offset*. No gráfico da esquerda, no eixo da abscissa têm-se os valores digital do DAC, onde ele expressa os valores da entrada binária, em que seu tamanho dependerá do número de bits do DAC. No eixo da ordenada têm-se os valores analógicos da tensão de saída do DAC. No valor binário 0 do DAC a tensão de saída deveria ser 0 V, mas devido as não idealidades isto não ocorre, e a mesma situação ocorre em um valor qualquer do valor binário DAC, no qual a tensão de saída deveria ser V. O desvio deste valor é o erro de *offset*, ele pode possuir um desvio tanto positivo quanto negativo. O erro de *offset* pode ser considerado um erro sistemático e dessa forma pode ser corrigido. Quando não corrigido, esse erro deve ser tratado como aleatório com uma distribuição de probabilidade uniforme.

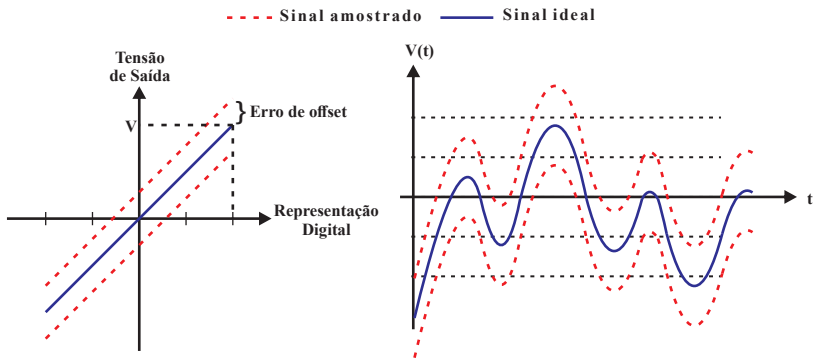


Figura 3.9: Representação do erro de offset do DAC.

A placa NI 4461 possui uma tensão residual máxima de 10 mV, desta forma o erro sistemático de offset é,

$$Erro_{Offset} = \pm 10 \text{ mV}. \quad (3.11)$$

O erro de offset ocorre independente da frequência do sinal. Esse erro é transmitido pelos cabos até as caixas acústicas. O sinal acústico

das caixas acústicas é gerado a partir dos transdutores eletrodinâmicos (alto falantes). Para gerar esse sinal acústico é necessário aplicar uma corrente à bobina móvel do transdutor que gera um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente e ao campo magnético do ímã permanente (Figura 3.10). Essa interação cria uma força mecânica resultante que movimenta o diafragma (cone) do transdutor, gerando o sinal acústico, Dickason (2006).

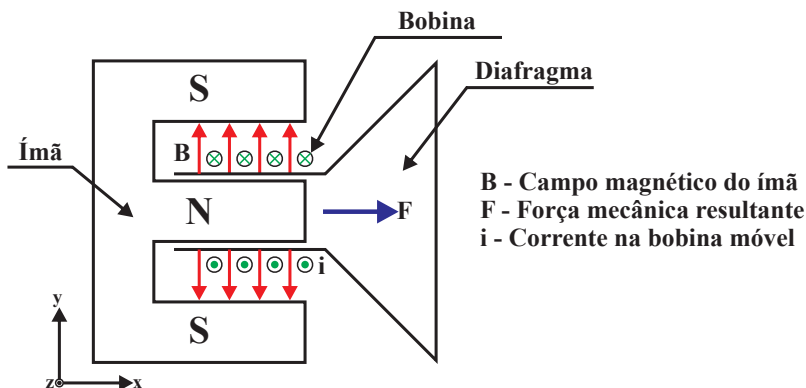


Figura 3.10: Interação da bobina móvel, ímã permanente e diafragma.

Essa força aplicada ao diafragma do alto falante é conhecida por Força de Lorentz, que descreve que, se uma corrente i percorrer um caminho fechado L ou um circuito gerará uma força que pode ser calculada por:

$$\vec{F} = \oint_L i d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (3.12)$$

No caso de um alto falante, L é o comprimento total do fio condutor que compõe a bobina móvel, i a corrente que atravessa a bobina móvel e B o campo magnético do ímã. Devido a forma da bobina móvel convém utilizar a equação com coordenadas cilíndricas. O produto vetorial de $d\vec{l}$ e \vec{B} será uma força na direção perpendicular a esses dois vetores, de acordo com a Figura 3.10, uma força na direção x . Desta forma, o módulo da Força de Lorentz é calculado por,

$$F = i \cdot B \cdot \int_0^{2\pi} N r d\theta = 2\pi r N i B \text{ [N]}. \quad (3.13)$$

Sendo r o raio da bobina móvel e N o número de espiras (voltas do fio condutor) da bobina móvel. Analisando a equação, a força mecânica resultante depende da corrente de excitação i , sendo que os demais parâmetros são invariáveis no tempo e dependem da forma construtiva do alto falante. Se a bobina móvel for excitada por uma corrente constante a força mecânica será constante. Se a bobina móvel for excitada por uma corrente senoidal, a força mecânica e o deslocamento do diafragma será na forma senoidal, Sadiku (2004) e Bastos (2008).

O movimento do cone do alto falante, através da Força de Lorentz, pode gerar pressão acústica dependendo do tipo de excitação da corrente i que atravessa a bobina móvel. De acordo com Temkin (2001) e Fahy e Gardonio (2007), a radiação sonora de um alto falante em uma caixa acústica pode ser aproximadamente modelada como um pistão rígido. A pressão acústica em um ponto distante do cone do alto falante, pode ser calculada, se desconsiderar o termo da diretividade através de

$$P(r, t) = \frac{j\rho f Q}{r} e^{j(\omega t - kr)}. \quad (3.14)$$

Segundo Gerges (2000), Temkin (2001) e Fahy e Gardonio (2007). Sendo ρ a densidade do meio, f a frequência, Q a velocidade volumétrica do diafragma (cone) e r a distância do diafragma a um ponto qualquer no espaço (desde que a distância r seja muito maior que o raio do cone).

Analisando a equação da Força de Lorentz (3.13) e a equação da pressão acústica (3.14) gerada pelo movimento do cone do alto falante, é possível verificar que apenas quando o cone se deslocar haverá pressão acústica. Isso implica que se a corrente i da bobina móvel for constante, a força no diafragma será constante e haverá um deslocamento inicial do cone e depois entrará em repouso na nova posição, sendo que na posição de repouso não haverá geração de pressão acústica. Com isso é possível concluir que a excitação de um alto falante por um sinal constante no tempo não gera pressão acústica, no regime permanente. Dessa forma, o erro devido a tensão de offset pode ser desconsiderado pois não há geração de pressão acústica ao excitar as caixas acústicas.

3.2.1.2.4 Erro de ganho

O erro de ganho é o desvio do ganho real do amplificador contido na placa DSAG do ganho ideal. Essa diferença entre os ganhos deve ser

avaliada e quando possível corrigida. O ganho de um DAC é definido pela inclinação da característica da saída do DAC. O ganho de um DAC é especificado em termos de um percentual da faixa de indicação ou em dB, a Figura 3.11 ilustra o erro de ganho, que pode ser tanto positivo quanto negativo.

Por se tratar de um erro sistemático, essa diferença pode teoricamente ser corrigida através de uma calibração da placa DSAG, através do hardware ou software. Caso não seja possível realizar a calibração, esse erro do ganho deve ser considerado aleatório.

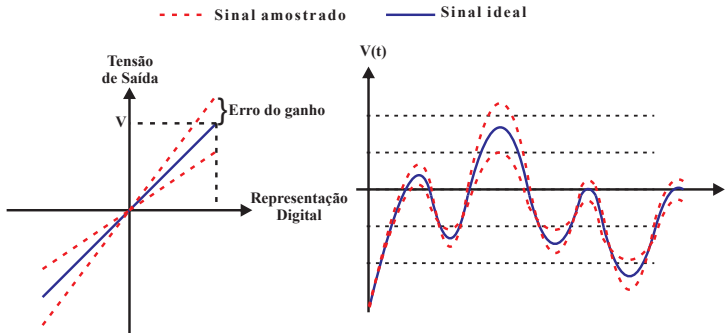


Figura 3.11: Representação do erro de ganho do DAC.

A placa NI 4461 possui o erro do ganho máximo de 0,1 dB em relação a tensão de saída do sinal, mesmo após a correção, de acordo com o fabricante. Neste caso, a tensão de saída do erro aleatório e a estimativa da incerteza padrão, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme, associado ao ganho são calculados por

$$Erro_{\text{Ganho}} = \pm 0,100 \text{ dB}, \quad (3.15a)$$

$$u_{\text{Ganho}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,057 \text{ dB}. \quad (3.15b)$$

A estimativa da incerteza padrão do erro do ganho em dB pode ser somada diretamente na estimativa da incerteza do NPS em dB ou dBA, conforme demonstrado no Apêndice A.

Nenhuma informação do fabricante da placa PCI 4461 em relação ao erro de ganho em função da frequência foi apresentada. Desta forma, foi adotado que o erro do ganho ocorre independente da frequência do sinal.

3.2.1.2.5 Erro devido aos ruídos

A placa DSAG pode sofrer influências eletromagnéticas de diversos equipamentos que estão próximos a ela, como amplificadores de potência, placas de vídeo, placas de som, estabilizadores, nobreaks entre outros e dela mesma. Essas influências interferem no sinal gerado pela placa DSAG e, portanto, causam um erro no sistema de medição. A determinação deste erro dependerá dos componentes que compõem a placa DSAG e suas não idealidades. O ruído do sistema geralmente é especificado em dB em relação a faixa da tensão, dBFS⁷, conhecido como *Signal to Noise Ratio* (SNR).

Além do erro devido ao ruído, a placa DSAG gera distorção harmônica nesses sinais que é o surgimento de frequências múltiplas da frequência original (fundamental) do sinal. A distorção harmônica total (THD⁸) é definida como a razão entre o somatório da potência de todas as componentes harmônicas (distorções harmônicas individuais) e a potência da componente da frequência fundamental do sinal.

De acordo com Lima (2003), “ao se analisar o espectro do sinal resultante, observa-se que a distorção provoca o surgimento de frequências espúrias de menor amplitude no sinal”. Apenas as frequências harmônicas menores que metade da frequência de Nyquist são incluídas na análise.

A soma das componentes harmônicas no sinal original gera um sinal diferente do original, com erros. A THD pode ser avaliada com um sinal padrão com amplitude em 1 dBc, que é definida como sendo a tensão em relação -1 dBFS.

E, além do erro devido ao ruído e a distorção harmônica, a placa DSAG gera componentes de frequências espúrias. Essas frequências podem ser harmônicas ou não em relação à(s) frequência(s) do sinal gerado. Esse erro é especificado através do parâmetro *Spurious Free Dynamic Range*⁹ (SFDR), que fornece a relação entre a amplitude da frequência original e a amplitude da frequência harmônica ou não harmônica mais proeminente (com mais energia).

Esses três componentes de erro (ruído, THD e SFDR) podem ser analisados conjuntamente através da SFDR, conforme apresenta a Figura 3.12.

⁷dBFS - dB Full Scale

⁸*Total Harmonic Distortion*

⁹Faixa dinâmica livre de frequências espúrias

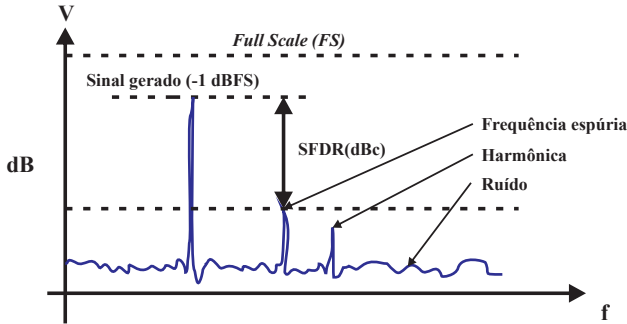


Figura 3.12: Representação do sinal amostrado com erros.

A SFDR é calculada através de

$$SFDR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_F}{V_E} \right) \quad (3.16)$$

sendo V_F a tensão da frequência original do sinal e V_E a tensão da maior frequência espúria. Apenas as frequências menores que metade da frequência de Nyquist são incluídas na análise. A SFDR pode ser avaliada com um sinal padrão com amplitude em 1 dBc, que é definida como sendo a tensão em relação -1 dBFS. Neste caso, a tensão do erro aleatório e a estimativa da incerteza padrão, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme, associado a SFDR são calculados por

$$Erros_{SFDR} = \pm V_{FS} 10^{(-SFDR_{dBc} - 1)/20}, \quad (3.17a)$$

$$u_{SFDR} = \frac{V_{FS} 10^{(-SFDR_{dBc} - 1)/20}}{\sqrt{3}}. \quad (3.17b)$$

A placa NI 4461 possui SFDR de 98 dBc em relação a faixa de tensão (± 10 V), para um sinal de teste na frequência de 1 kHz e taxa de amostragem de 204,8 kS/s. O erro e a estimativa da incerteza padrão devido ao SFDR são

$$Erros_{SFDR} = \pm 10 \cdot 10^{(-98 - 1)/20} = \pm 0,11220 \text{ mV}, \quad (3.18a)$$

$$u_{SFDR} = \frac{10 \cdot 10^{(-98 - 1)/20}}{\sqrt{3}} = 0,06478 \text{ mV}. \quad (3.18b)$$

Foi adotado que o erro devido a SFDR é o mesmo para todas as frequências de teste.

3.2.1.2.6 Erro da resposta em frequência

Devido as não idealidades da placa DSAG a resposta em frequência não é perfeitamente plana. Desta forma, uma variação da amplitude do sinal em relação à frequência pode variar. A resposta em frequência é importante quando se gera sinais com largura de banda de frequência. A Figura 3.13 ilustra uma resposta em frequência plana e outra nem tanto.

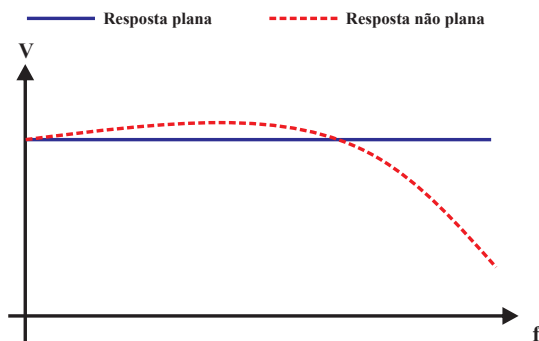


Figura 3.13: Resposta em frequência.

O erro da resposta em frequência pode ser considerado sistemático e pode ser corrigido caso a variação da curva seja conhecida. Caso contrário deve ser considerado um erro aleatório. De acordo com o fabricante, a placa NI 4461 possui um erro da resposta em frequência que pode variar entre $\pm 0,1$ dB entre 20 Hz e 91,2 kHz. O erro da resposta em frequência pode ser corrigido no momento da determinação da CCR, apresentado no item 3.2.1.5.

3.2.1.2.7 Erro devido à deriva térmica

A deriva térmica expressa a estabilidade da placa DSAG em relação a taxa de variação da temperatura que ocorre de maneira lenta e uniforme, Albertazzi e Sousa (2008). De acordo com o fabricante da placa NI 4461, a faixa de operação da placa é de 0 a 40 °C, dentro

dessa faixa o ruído térmico gerado é embutido dentro do erro devido aos ruídos (item 3.2.1.2.5) e não deve ser considerado. Caso a placa opere fora dessa faixa de temperatura ambiente, deve-se adicionar uma parcela ao erro devido aos ruídos de $\pm 5 \text{ ppm}^{10}$ do valor de tensão de saída para cada grau que ultrapassar a faixa de operação. A Figura 3.14 ilustra o erro gerado devido à deriva térmica na placa.

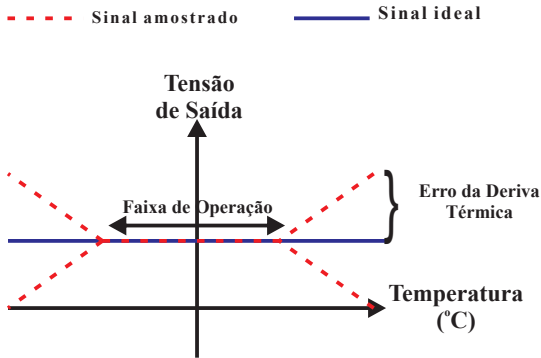


Figura 3.14: Erro devido à deriva térmica.

Neste caso, a tensão do erro aleatório e a estimativa da incerteza padrão, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme associado à deriva térmica, são calculados por

$$Erro_{\text{Deriva Térmica}} = \pm 5 \cdot 10^{-6} \Delta T \cdot V, \quad (3.19a)$$

$$u_{\text{Deriva Térmica}} = \frac{\pm 5 \cdot 10^{-6} \Delta T \cdot V}{\sqrt{3}}. \quad (3.19b)$$

Sendo ΔT a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura limite (0 ou 40 °C). O erro devido à deriva térmica foi desconsiderado, uma vez que a placa DSAG não é utilizada em temperaturas fora da faixa de 0 a 40 °C.

3.2.1.2.8 Erro devido à deriva temporal

A deriva temporal expressa a estabilidade da placa DSAG ao longo do tempo. De acordo com Lima (2003), podem ocorrer pequenas

¹⁰parte(s) por milhão.

variações no sinal devido ao envelhecimento dos componentes da placa. Esta deriva temporal descreve a taxa de variação da tensão de saída da placa, que ocorre de maneira lenta e uniforme, ao longo do tempo. Com o passar do tempo esse erro torna-se menor, pois o comportamento dos componentes da placa tornam-se mais estáveis, Lima et al. (2010). De acordo com o fabricante da placa NI 4461 o erro devido à deriva temporal é de ± 15 ppm do valor de tensão de saída para medições realizadas entre 24 horas e 1 ano data de calibração elétrica da placa.

Neste caso, a tensão do erro aleatório e a estimativa da incerteza padrão, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme associado à deriva temporal, são calculados por

$$Erro_{\text{Deriva Temporal}} = \pm 15 \cdot 10^{-6} V, \quad (3.20a)$$

$$u_{\text{Deriva Temporal}} = \frac{15 \cdot 10^{-6} V}{\sqrt{3}} = 8,6603 \cdot 10^{-6} V. \quad (3.20b)$$

O erro e a estimativa da incerteza padrão devido à deriva temporal varia linearmente com o nível de tensão de saída da placa NI 4461, quanto maior a tensão de saída maior o erro e a estimativa da incerteza padrão. É conveniente expressar esse erro e a estimativa da incerteza padrão em dB, em relação a tensão de saída da placa,

$$Erro_{\text{Deriva Temporal}} = \pm 20 \log \left(\frac{V + V_e}{V} \right), \quad (3.21a)$$

$$u_{\text{Deriva Temporal}} = 20 \log \left(\frac{V + V_u}{V} \right). \quad (3.21b)$$

A estimativa da incerteza padrão da deriva temporal em dB pode ser somada diretamente na estimativa da incerteza padrão do NPS em dB ou dBA, conforme demonstrado no Apêndice A.

$$Erro_{D. \text{ Temporal}} = \pm 20 \log \left(\frac{V + 15 \cdot 10^{-6} V}{V} \right) = \pm 0,00013 \text{ dB}, \quad (3.22a)$$

$$u_{D. \text{ Temporal}} = 20 \log \left(\frac{V + 8,6603 \cdot 10^{-6} V}{V} \right) = 0,00008 \text{ dB}. \quad (3.22b)$$

3.2.1.2.9 Correção e incerteza padrão combinada

Conforme apresentado nos itens 3.2.1.2.1 ao 3.2.1.2.8, apenas o erro devido a reconstrução do sinal e da resposta em frequência são definidos como sistemáticos e requerem correção. Conforme apresentado nesses erros, a correção é realizada no momento da determinação da CCR, apresentado no item 3.2.1.5.

A estimativa da incerteza padrão combinada da placa DSAG é composta pelas fontes de incerteza apresentadas do item 3.2.1.2.1 ao 3.2.1.2.8. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada da placa DSAG em V e dB. Não serão consideradas as fontes de incerteza devido ao erro de reconstrução do sinal, de offset, da resposta em frequência e deriva térmica, pois estas não possuem componentes de erro aleatório.

$$u_{\text{Placa[V]}}^2 = u_{\text{Quantização}}^2 + u_{\text{Ruído}}^2 + u_{\text{THD}}^2 + u_{\text{SFDR}}^2, \quad (3.23a)$$

$$u_{\text{Placa[dB]}}^2 = u_{\text{Ganho}}^2 + u_{\text{Deriva Temporal}}^2. \quad (3.23b)$$

O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza da quantização, ruídos, ganho e deriva temporal é considerado infinito, pois estas fontes de incerteza são consideradas do tipo B. O número de graus de liberdade da estimativa da incerteza combinada da placa DSAG é obtido através da Equação (2.20). Os Quadros 3.2 e 3.3 apresentam as estimativas da incerteza padrão e o número de graus de liberdade da placa DSAG em V e dB, respectivamente.

Quadro 3.2: Incerteza padrão da placa DSAG em volts.

| N. | Fonte de Erro | Erro Aleatório (mV) | Distribuição | u (mV) | ν |
|----|---------------|---------------------|--------------|----------|----------|
| 1 | Quantização | 0,00060 | Uniforme | 0,00034 | ∞ |
| 2 | SFDR | 0,11220 | Uniforme | 0,06478 | ∞ |

Quadro 3.3: Incerteza padrão da placa DSAG em dB.

| N. | Fonte de Erro | Erro Aleatório (dB) | Distribuição | u (dB) | ν |
|----|-----------------|---------------------|--------------|----------|----------|
| 1 | Ganho | 0,10000 | Uniforme | 0,05774 | ∞ |
| 2 | Deriva Temporal | 0,00013 | Uniforme | 0,00008 | ∞ |

A correção, a estimativa da incerteza padrão combinada e o número de graus de liberdade da placa DSAG são

$$C_{Placa} = 0 \text{ mV}, \quad (3.24a)$$

$$u_{Placa} = 0,06478 \text{ mV e } 0,05774 \text{ dB}, \quad (3.24b)$$

$$\nu_{Placa} = \infty \text{ e } \infty. \quad (3.24c)$$

3.2.1.3 Cabos

Os cabos são responsáveis por transmitir o sinal elétrico da saída da placa DSAG para a entrada das caixas acústicas, atuando como linhas de transmissão. Existem vários tipos de linhas de transmissão, tais como coaxial, par trançado, bifilar e etc. Uma linha de transmissão consiste de dois ou mais condutores usados para conectar um gerador (placa DSAG) a uma carga (caixa acústica). A Figura 3.15 ilustra o cabo (linha de transmissão) conectando a placa DSAG (gerador) a caixa acústica (carga). Os cabos utilizados para conectar a placa DSAG à caixa acústica são do tipo coaxial, desta forma, o modelo apresentado aplica-se a este tipo de cabo.

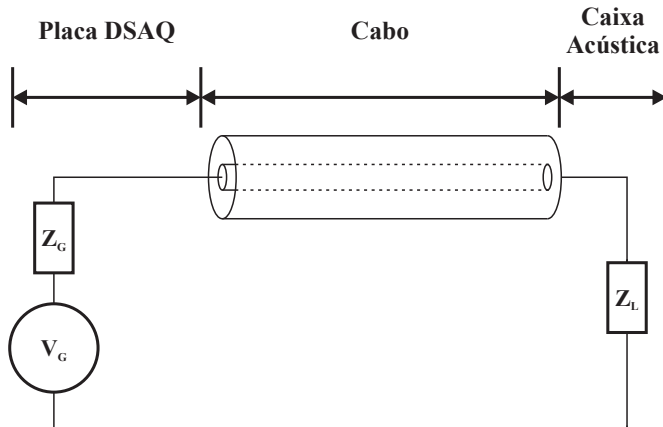


Figura 3.15: Cabo conectando a placa DSAG à caixa acústica.

Os cabos utilizados não são ideais, eles apresentam perdas e distorções influenciando o sistema de medição. A Figura 3.2 apresenta os

erros associados aos cabos. Utiliza-se um modelo elétrico para avaliar esses erros associados, o Apêndice B apresenta o desenvolvimento do modelo e suas considerações.

3.2.1.3.1 Erro da resposta em frequência

Devido as perdas e distorções do cabo, a resposta em frequência não é perfeitamente plana, podendo variar em amplitude e fase em função da frequência. No Apêndice B é apresentado o modelo elétrico e o desenvolvimento matemático para se obter a função de resposta em frequência. O módulo da resposta em frequência apresenta as perdas no cabo devido ao efeito Joule e a fase apresenta os atrasos do sinal em função dos efeitos indutivo e capacitivo do cabo.

O sistema de medição é composto de dois cabos coaxiais ligados em paralelo a duas caixas acústica. Os cabos são da marca Triflex com 15 metros de comprimento e com as características dimensionais e elétricas apresentadas no Quadro 3.4, calculados a partir das Equações (B.3), repetidas aqui,

$$R = \frac{1}{2\pi\delta\sigma_C} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) l, \quad (3.25a)$$

$$L = \frac{\mu_I}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right) l, \quad (3.25b)$$

$$G = \frac{2\pi\sigma_I}{\ln(b/a)} l, \quad (3.25c)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_I}{\ln(b/a)} l. \quad (3.25d)$$

Quadro 3.4: Parâmetros do cabo coaxial.

| Parâmetro | Valor | Parâmetro | Valor |
|-----------|-------|------------------|------------------|
| a [mm] | 1,0 | R [Ω] | $7,300.10^{-3}$ |
| b [mm] | 3,5 | L [H] | $3,768.10^{-6}$ |
| c [mm] | 4,0 | G [S] | $7,523.10^{-15}$ |
| d [mm] | 6,0 | C [F] | $1,532.10^{-9}$ |

Com os dados do Quadro 3.4 é possível calcular as impedâncias características do cabo Z_A e Z_B , dadas pela Equação (B.4a) e Equação (B.4b) apresentadas no Apêndice B, respectivamente, repetidas aqui,

$$Z_A = R + j\omega L, \quad (3.26a)$$

$$Z_B = \frac{1}{G + j\omega C}. \quad (3.26b)$$

Sendo $\omega = 2\pi f$. O circuito elétrico equivalente para a conexão existente do sistema de medição é fornecido pela Figura 3.16, sendo Z_G a impedância da fonte geradora e Z_C a impedância da carga. De acordo com o fabricante da placa NI 4461 a impedância do gerador é 22Ω e de acordo com o fabricante das caixas acústicas Truth B2031A a impedância da carga é $10 \text{ k}\Omega$.

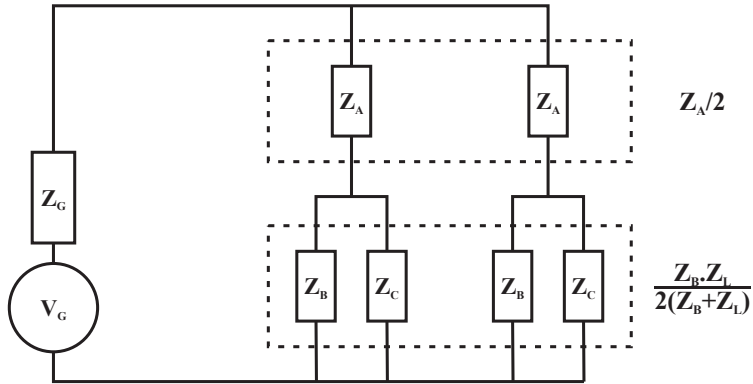


Figura 3.16: Circuito simplificado com gerador, 2 cabos e 2 cargas.

O módulo e a fase da resposta em frequência são obtidas através da Equação (B.8a) e Equação (B.8b) apresentadas no Apêndice B, respectivamente, repetidas aqui,

$$\frac{V_O}{V_G} = \frac{Z_B Z_C}{(2Z_G + Z_A)(Z_B + Z_C) + Z_B Z_C}, \quad (3.27a)$$

$$\left| \frac{V_O}{V_G} \right| = \sqrt{\Re(V_O/V_G)^2 + \Im(V_O/V_G)^2}, \quad (3.27b)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\Im(V_O/V_G)}{\Re(V_O/V_G)} \right]. \quad (3.27c)$$

A Figura 3.17 apresenta o resultado de magnitude e fase da resposta em frequência do cabo. Tanto a magnitude quanto a fase possuem

resposta praticamente plana até 20 kHz, os erros presentes são insignificantes e podem ser desconsiderados. Os erros de resposta em frequência no cabo são significativos em altas frequências, como por exemplo, na faixa de operação de sinal de TV e rádio que funcionam na ordem dos MHz.

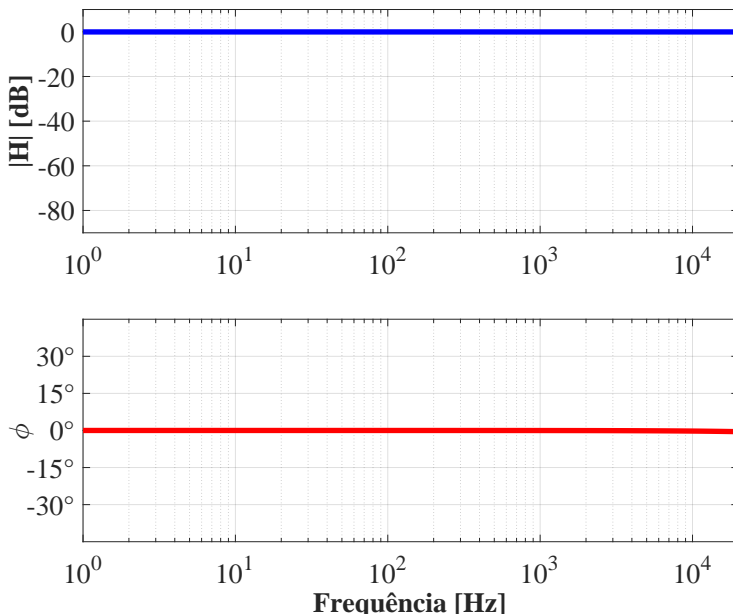


Figura 3.17: Resposta em frequência do cabo.

Além disso, o erro da magnitude pode ser considerado como sistemático e pode ser corrigido no momento da determinação da Curva Característica de Reposta (CCR) do sistema de medição (item 3.2.1.5). O erro de fase é muito pequeno e pode ser desconsiderado.

3.2.1.3.2 Erro devido ao ruído

Os cabos podem sofrer interferência de campos eletromagnéticos próximos gerados por equipamentos, introduzindo ruído ao sinal transmitido. Existem dois tipos de interferências, as internas e externas, podendo ser contínuas ou intermitentes. As causas mais comuns são:

- Fonte de alimentação, 50/60 Hz;
- Sinais de rádio de alta energia;
- Fontes chaveadas;
- Microondas.

Uma das formas mais comuns de minimizar essas interferências é através da blindagem (*shield*) do cabo. Essa blindagem deve ser conectada ao potencial de referência do sinal que se deseja proteger. A Figura 3.18 apresenta o circuito com cabo blindado, sendo que o potencial negativo do gerador de sinais é conectado a trança de fio de cobre (blindagem) do cabo.

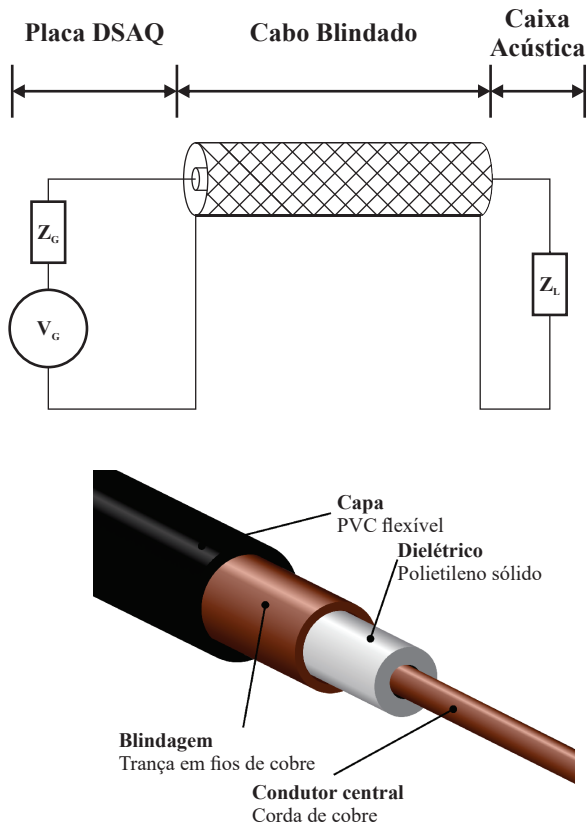


Figura 3.18: Circuito com cabo blindado e estrutura do cabo.

Os cabos são conectados da placa DSAG até as duas caixas acústicas, estando próximas apenas da fonte de energia do computador utilizado para o ensaio, um nobreak, um monitor e as próprias caixas acústicas. Esses quatro equipamentos funcionam na frequência de 60 Hz, sendo que a frequência mais baixa do sinal de ensaio é 125 Hz, próxima a primeira harmônica da rede elétrica (120 Hz). Devido à utilização do cabo blindado as interferências eletromagnéticas são minimizadas, minimizando o ruído no sinal de tensão utilizado durante o ensaio. Desta forma não será considerado o erro devido ao ruído pois ele é desprezável.

3.2.1.3.3 Erro devido à deriva térmica

A deriva térmica expressa a estabilidade dos parâmetros dos cabos (R , L , G e C) em relação a taxa de variação da temperatura que ocorre de maneira lenta e uniforme. De acordo com Czuba e Sikora (2011), a deriva térmica no cabo influencia a fase do sinal. A deriva térmica torna-se importante para cabos que possuem teflon, podendo atingir valores de até 90 *ppm* do valor da tensão gerada por °C. Para cabos que não possuem teflon a mudança de fase devido a deriva térmica é desprezível, (CZUBA; SIKORA, 2011). O erro devido a deriva térmica no cabo foi desconsiderado.

3.2.1.3.4 Erro devido à deriva temporal

A deriva temporal expressa a estabilidade do cabo ao longo do tempo. Com o passar do tempo as propriedades do material condutor (fio de cobre) e isolante (polietileno) podem sofrer alterações. A condutividade elétrica (σ), a permeabilidade magnética (μ) e a permissividade elétrica (ϵ) podem sofrer alterações de valores ao longo do tempo por exposição a temperatura, umidade e outros agentes físicos. O erro devido a deriva temporal pode ser corrigido no momento da determinação da CCR, apresentado no item 3.2.1.5.

3.2.1.3.5 Correção e incerteza padrão combinada

Conforme apresentado nos itens 3.2.1.3.1 ao 3.2.1.3.4, apenas os erros devido a resposta em frequência e deriva temporal são definidos como sistemáticos e requerem correção. Conforme apresentado nesses

erros, a correção é realizada no momento da determinação da CCR, apresentado no item 3.2.1.5.

A estimativa da incerteza padrão combinada dos cabos é desprezível, conforme apresentado. Desta forma, a correção, a estimativa da incerteza padrão e o número de graus de liberdade dos cabos são

$$C_{Cabos} = 0 \text{ V}, \quad (3.28a)$$

$$u_{Cabos} = 0 \text{ V}, \quad (3.28b)$$

$$\nu_{Cabos} = 0. \quad (3.28c)$$

3.2.1.4 Caixas acústicas e trajetória acústica

As caixas acústicas são responsáveis por transformar o sinal de tensão em ondas acústicas dentro da sala de ensaio, realizando uma conversão de volts para Pascal. São utilizadas duas caixas acústicas da marca Behringer, modelo Truth B2031A, posicionadas dentro da sala de ensaio. Essas caixas acústicas são do tipo ativa, ou seja, possuem amplificador de potência embutido não sendo necessária a utilização de um amplificador de potência externo. Esse modelo de caixa acústica possui uma resposta ultra plana de 50 Hz a 21 kHz, biamplificada com crossover ativo na frequência de 2 kHz para separar os graves e agudos para o *woofer* e *tweeter*, respectivamente. A Figura 3.19 apresenta o esquemático interno de como funcionam as caixas acústicas.

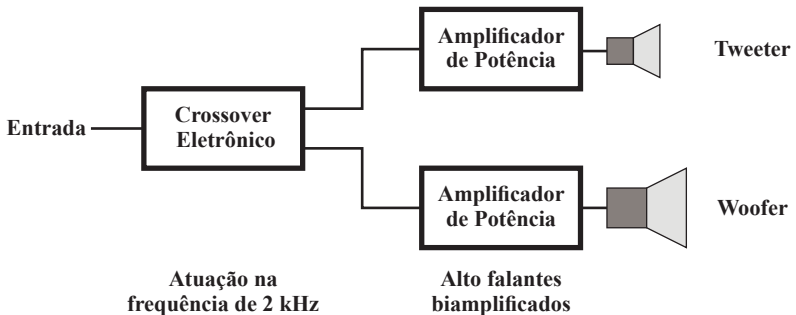


Figura 3.19: Esquemático das caixas acústicas.

3.2.1.4.1 Erro devido ao ruído

Os amplificadores de potência e circuitos elétricos empregados nas caixas acústicas podem interferir no sinal de tensão de excitação e, portanto, causam um erro ao sistema de medição. A determinação deste erro dependerá dos componentes que compõem as caixas acústicas e suas não idealidades.

O ruído das caixas acústicas geralmente é especificado em dB em relação a uma faixa de tensão (SNR) ou em volts. A tensão do erro aleatório e a estimativa da incerteza padrão, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme, associado ao ruído são calculadas por,

$$Erro_{\text{Ruído}} = \pm V_{\text{Ruído}}, \quad (3.29a)$$

$$u_{\text{Ruído}} = \frac{V_{\text{Ruído}}}{\sqrt{3}}. \quad (3.29b)$$

O erro devido ao ruído máximo dos componentes que compõem as caixas acústicas, segundo dados do fabricante é de $\pm 10 \mu V$. O erro e a estimativa da incerteza padrão devido ao ruído são então

$$Erro_{\text{Ruído}} = \pm 10 \cdot 10^{-6} = \pm 0,01000 \text{ mV}, \quad (3.30a)$$

$$u_{\text{Ruído}} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 0,00578 \text{ mV}. \quad (3.30b)$$

Foi adotado que o erro devido ao ruído é o mesmo para todas as bandas de frequência.

3.2.1.4.2 Erro devido à distorção harmônica

Devido às não idealidades dos circuitos elétricos e amplificador de potência utilizados, as caixas acústicas geram distorções harmônicas nos sinais. A THD pode ser expressa em percentual em relação ao sinal de entrada.

De acordo com dados do fabricante, os amplificadores de potência da caixa acústica Truth B2031A possuem uma THD de 0,1 % em relação o sinal de tensão. Neste caso, a tensão do erro aleatório e a estimativa da incerteza padrão, considerando uma distribuição de pro-

babilidade uniforme, associado a distorção harmônica são calculadas por

$$Erro_{\text{THD}} = \pm 0,001V, \quad (3.31a)$$

$$u_{\text{THD}} = \frac{0,001 \cdot V}{\sqrt{3}} = 0,00058V. \quad (3.31b)$$

O erro e a estimativa da incerteza padrão devido a distorção harmônica, varia linearmente com o nível de tensão das caixas acústicas. Quanto maior a tensão maior o erro e a estimativa da incerteza padrão. É conveniente expressar esse erro e a estimativa da incerteza padrão em dB, em relação a tensão,

$$Erro_{\text{THD}} = \pm 20 \log \left(\frac{V + V_e}{V} \right), \quad (3.32a)$$

$$u_{\text{THD}} = 20 \log \left(\frac{V + V_u}{V} \right). \quad (3.32b)$$

A estimativa da incerteza padrão da distorção harmônica em dB pode ser somada diretamente na estimativa da incerteza padrão do NPS em dB ou dBA, conforme demonstrado no Apêndice A.

$$Erro_{\text{THD}} = \pm 20 \log \left(\frac{V + 0,001 \cdot V}{V} \right) = \pm 0,00869 \text{ dB}, \quad (3.33a)$$

$$u_{\text{THD}} = 20 \log \left(\frac{V + 0,00058 \cdot V}{V} \right) = 0,00504 \text{ dB}. \quad (3.33b)$$

3.2.1.4.3 Erro de linearidade

As caixas acústicas deveriam responder linearmente aos estímulos elétricos, mas na prática isso não acontece devido as não idealidades do dispositivo. O erro de linearidade representa o desvio da resposta ideal em relação à resposta real da caixa acústica, para cada banda de frequência de ensaio. Caso essa variação seja conhecida, esta pode ser considerada um erro sistemático e corrigida. Caso contrário, deve ser considerado um erro aleatório. O erro de linearidade pode ser expresso em percentual em relação ao sinal de entrada.

De acordo com os dados do fabricante, os amplificadores de

potência da caixa acústica Truth B2031A possuem um erro de linearidade de máximo de 0,009 % em relação ao sinal de tensão. Neste caso, a tensão do erro aleatório e a estimativa da incerteza padrão, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme, associado ao erro de linearidade são calculadas por

$$Erro_{\text{Linearidade}} = \pm 9.10^{-5}V, \quad (3.34a)$$

$$u_{\text{Linearidade}} = \frac{9.10^{-5}V}{\sqrt{3}} = 5,19616.10^{-5}V. \quad (3.34b)$$

O erro e a estimativa da incerteza padrão devido ao erro de linearidade varia linearmente com o nível de tensão das caixas acústicas, quanto maior a tensão maior o erro e a estimativa da incerteza padrão. É conveniente expressar esse erro e a estimativa da incerteza padrão em dB, em relação a tensão,

$$Erro_{\text{Linearidade}} = \pm 20 \log \left(\frac{V + V_e}{V} \right), \quad (3.35a)$$

$$u_{\text{Linearidade}} = 20 \log \left(\frac{V + V_u}{V} \right). \quad (3.35b)$$

A estimativa da incerteza padrão da linearidade em dB pode ser somada diretamente na estimativa da incerteza padrão do NPS em dB ou dBA, conforme demonstrado no Apêndice A.

$$Erro_{\text{Linearidade}} = \pm 20 \log \left(\frac{V + 9.10^{-5}V}{V} \right) = \pm 0,00079 \text{ dB}, \quad (3.36a)$$

$$u_{\text{Linearidade}} = 20 \log \left(\frac{V + 5,19616.10^{-5}V}{V} \right) = 0,00046 \text{ dB}. \quad (3.36b)$$

3.2.1.4.4 Erro da resposta em frequência

Devido as não idealidades dos circuitos elétricos e alto falantes empregados nas caixas acústicas, a resposta em frequência não é perfeitamente plana. O manual de instrução das caixas acústicas Behringer Truth B2031A informa que a resposta em frequência é ultra plana e fornece a resposta em frequência para cada uma das caixas acústicas. A Figura 3.20 apresenta a resposta em frequência, fornecidas pelo fa-

bricante, de cada uma das caixas acústicas. De 50 Hz a 200 Hz as caixas acústicas possuem uma variação de até 5 dB e entre 200 Hz e 10 kHz e uma variação de até 2 dB.

Nesse caso, a variação da resposta em frequência das caixas acústicas pode ser considerada um erro sistemático e pode ser corrigida no momento da determinação da CCR, apresentado no item 3.2.1.5.

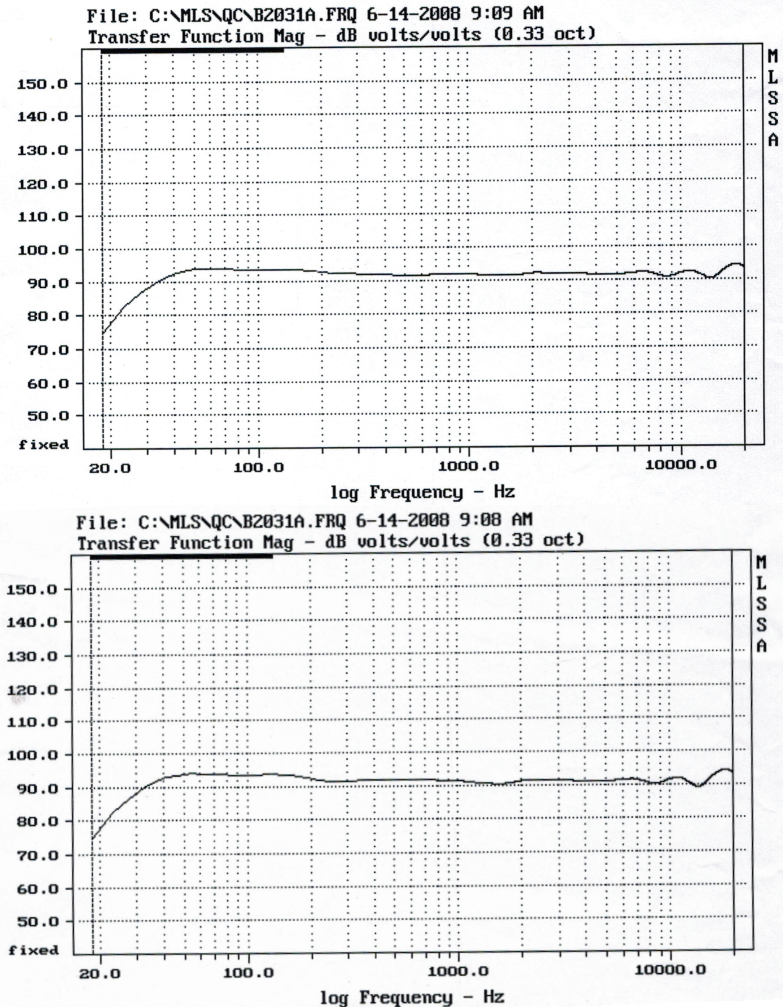


Figura 3.20: Resposta em frequência das 2 caixas acústicas.

3.2.1.4.5 Correção e incerteza padrão combinada

Conforme apresentado nos itens 3.2.1.4.1 ao 3.2.1.4.4, apenas o erro devido a resposta em frequência é definido como sistemático e requer correção. Conforme apresentado nesses erros, a correção é realizada no momento da determinação da CCR, apresentado no item 3.2.1.5.

A estimativa da incerteza padrão combinada das caixas acústicas é composta pelas fontes de incerteza apresentadas do item 3.2.1.4.1 ao 3.2.1.4.4. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada das caixas acústicas em V e dB. Não será considerada a fonte de incerteza devido a resposta em frequência, pois esta não possui componente de erro aleatório.

$$u_{\text{Caixas[V]}}^2 = u_{\text{Ruído}}^2, \quad (3.37a)$$

$$u_{\text{Caixas[dB]}}^2 = u_{\text{THD}}^2 + u_{\text{Linearidade}}^2. \quad (3.37b)$$

O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza do ruído, THD e linearidade é considerado infinito, pois estas fontes de incerteza são consideradas do tipo B. O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza das caixas acústicas é obtido através da Equação (2.20). Os Quadros 3.5 e 3.6 apresentam as estimativas da incerteza padrão e número de graus de liberdade das caixas acústicas em V e dB, respectivamente.

Quadro 3.5: Incerteza padrão das caixas acústicas em volts.

| N. | Fonte de Erro | Erro Aleatório (mV) | Distribuição | u (mV) | ν |
|----|---------------|---------------------|--------------|----------|----------|
| 1 | Ruído | 0,01000 | Uniforme | 0,005578 | ∞ |

Quadro 3.6: Incerteza padrão das caixas acústicas em dB.

| N. | Fonte de Erro | Erro Aleatório (dB) | Distribuição | u (dB) | ν |
|----|---------------|---------------------|--------------|---------|----------|
| 1 | THD | 0,00869 | Uniforme | 0,00504 | ∞ |
| 2 | Linearidade | 0,00079 | Uniforme | 0,00046 | ∞ |

A correção, a estimativa da incerteza padrão combinada e o número de graus de liberdade das caixas acústicas são

$$C_{Caixas} = 0 \text{ V}, \quad (3.38a)$$

$$u_{Caixas} = 0,00578 \text{ mV e } 0,00506 \text{ dB}, \quad (3.38b)$$

$$\nu_{Caixas} = \infty \text{ e } \infty. \quad (3.38c)$$

3.2.1.5 Sensibilidade do sistema de medição

A sensibilidade do sistema de medição deve ser determinada, para isso é necessário realizar medições para determinar a curva característica de resposta (CCR) do sistema de medição, para cada banda de frequência de ensaio. A CCR é obtida através da geração de tensões (variável independente) pela placa DSAG e medições do NPS no ponto de referência (variável dependente) na sala de ensaio. Com esse par de variáveis estima-se a curva de regressão da variável independente na dependente através do método dos mínimos quadrados, Albertazzi e Sousa (2008) e Piacentini et al. (2005). Essas CCR são utilizadas pelo software durante o ensaio para controlar o estímulo sonoro realizando a operação inversa, ou seja, define-se o NPS desejado no ponto de referência e a partir desse valor gera-se a tensão necessária para ter-se o NPS desejado.

Para medição dos NPS é utilizado um sistema de referência que apresenta erros sistemáticos e aleatórios. Esses erros serão considerados nos itens 3.2.1.6 e 3.2.1.7, respectivamente.

3.2.1.5.1 Procedimento de avaliação

A Figura 3.21 apresenta o resultado de uma das CCRs, para uma banda de frequência qualquer, da tensão de saída da placa DSAG em relação a pressão acústica e o NPS no ponto de referência. A relação entre a tensão de saída da placa DSAG e a pressão acústica é linear enquanto que a relação entre tensão de saída da placa DSAG e o NPS é logarítmica.

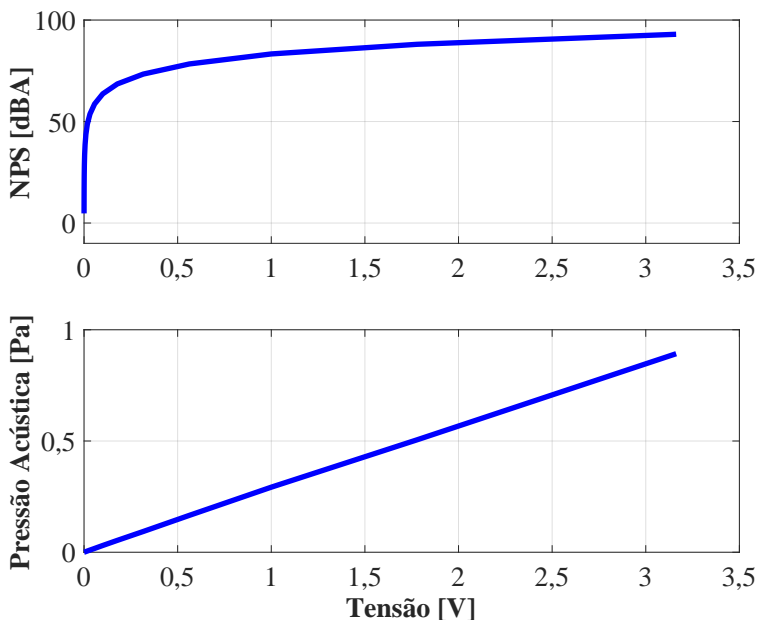


Figura 3.21: Exemplo de Curva Característica de Resposta.

A CCR da tensão em relação à pressão acústica da Figura 3.21 pode ser modelada matematicamente pela equação da reta,

$$P = AV + B. \quad (3.39)$$

Sendo A o coeficiente angular e B o coeficiente linear¹¹ da Equação (3.39), quando não há tensão de excitação não haverá pressão acústica gerada nas caixas acústicas, desta forma, $B \rightarrow 0$. A Equação (3.39) pode ser aproximada por,

$$P = AV. \quad (3.40)$$

A relação entre a pressão acústica, P , e o NPS é dada por

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_o} \right), \quad (3.41)$$

colocando o termo P em evidência, têm-se

¹¹ponto onde a reta corta o eixo horizontal.

$$P = P_o \cdot 10^{\text{NPS}/20}, \quad (3.42)$$

substituindo P na Equação (3.40)

$$P_o \cdot 10^{\text{NPS}/20} = AV, \quad (3.43)$$

rearranjando a equação e colocando o NPS em função da tensão,

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \left(\frac{A}{P_o} \right) + 20 \cdot \log_{10}(V), \quad (3.44)$$

considera-se que

$$C = 20, \quad (3.45a)$$

$$D = 20 \log_{10} \left(\frac{A}{P_o} \right), \quad (3.45b)$$

então a equação que descreve o NPS em função da tensão é

$$\text{NPS} = C \log_{10}(V) + D. \quad (3.46)$$

Teoricamente o coeficiente C é 20 mas, experimentalmente, esse valor é próximo a 20 como será confirmado *a posteriori*. A Equação (3.46) descreve o comportamento do NPS em função da tensão de saída da placa DSAG, sendo esta relação não linear. Para obtenção da CCR, primeiramente lineariza-se a Equação (3.46) e posteriormente aplica-se a equação dos mínimos quadrados, Piacentini et al. (2005). Para linearizar a Equação (3.46) aplica-se o logaritmo na variável independente (tensão). A equação dos mínimos quadrados para obter os coeficientes C e D da Equação (3.46) linearizada é

$$C = \frac{N \sum_{i=1}^N [X(i)Y(i)] - \sum_{i=1}^N X(i) \sum_{i=1}^N Y(i)}{N \sum_{i=1}^N X(i)^2 - [\sum_{i=1}^N X(i)]^2}, \quad (3.47a)$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N Y(i) \sum_{i=1}^N X(i)^2 - \sum_{i=1}^N X(i) \sum_{i=1}^N [X(i)Y(i)]}{N \sum_{i=1}^N X(i)^2 - [\sum_{i=1}^N X(i)]^2}. \quad (3.47b)$$

Sendo

$$X(i) = \log_{10}[V(i)], \quad (3.48a)$$

$$Y(i) = \text{NPS}(i). \quad (3.48b)$$

Com os coeficientes C e D e o valor de tensão V , é possível determinar o valor do NPS no ponto de referência da sala de ensaio, apesar disso, a CCR é uma aproximação da resposta real do sistema de medição e contém erros. É possível avaliar o quão bem a CCR representa a resposta real do sistema através do coeficiente de correlação, que representa o quanto a variável independente (tensão) e variável dependente (NPS) estão relacionadas, através da seguinte equação, de acordo com Piacentini et al. (2005),

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N [X(i)Y(i)] - \sum_{i=1}^N X(i) \sum_{i=1}^N Y(i)}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N X(i)^2 - [\sum_{i=1}^N X(i)]^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N Y(i)^2 - [\sum_{i=1}^N Y(i)]^2}} \quad (3.49)$$

O coeficiente de correlação, r , é um número real que varia de -1 a $+1$. Piacentini et al. (2005) explicam que, “supondo que a proposição teórica que relaciona as variáveis seja a correta, o valor de r será mais próximo de 1 quanto melhores forem as medidas”.

3.2.1.5.2 Procedimento de medição

Este ensaio é realizado através de uma rotina no software de ensaio que gera diferentes níveis de tensão na placa DSAG, que transmite o sinal através de cabos até as duas caixas acústicas dentro da sala de ensaio. Essas caixas acústicas geram ondas acústicas que são medidas pelo sistema de referência posicionados no ponto de referência. O ponto de referência é a posição onde fica localizado o ponto médio no plano paralelo ao chão da sala de ensaio e o ponto médio de uma linha entre os centros das entradas dos canais auditivos direito e esquerdo dos ouvintes e é onde todas as medições objetivas são realizadas. A Figura 3.22 ilustra a posição do ponto de referência dentro da sala de ensaio.

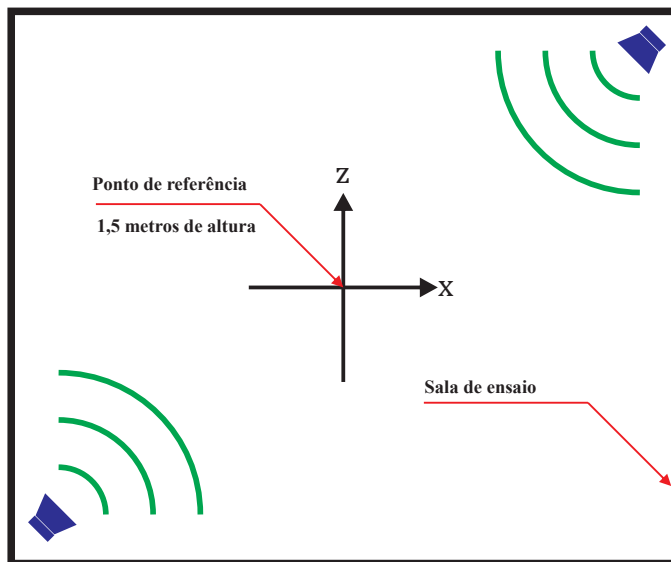


Figura 3.22: Ponto de referência na sala de ensaio.

Os equipamentos utilizados para as medições das CCRs foram:

- Analisador portátil da Brüel & Kjaer, tipo 1, modelo 2250, com filtro de 1/3 de oitava e ponderação A, classe 1;
- Microfone da marca Brüel & Kjaer, modelo 4955 (*low-noise*) com cabo de 15 metros;
- Calibrador acústico da marca Brüel & Kjaer, modelo 4231;
- Placa de geração de sinais da *National Instruments* PCI 4461 e rotina de geração de sinais do software desenvolvido por Lima.

O microfone 4955 foi acoplado a um tripé e colocado no ponto de referência a 1,5 metros de altura e conectado ao analisador portátil 2250 posicionado fora da sala de ensaio. Antes de cada série de medições o sistema foi calibrado com o calibrador acústico 4231. Para gerar os sinais de tensão foi utilizado o próprio sistema de medição, com uma rotina própria para esse ensaio.

Os parâmetros de medição utilizados para as medições das CCRs foram:

- Bandas de frequências (1/3 oitava): 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz;

- Faixa de medição: -80 a 10 dBV¹²;
- Incremento: 5 dBV;
- Número de pontos para medição: 19 ;
- Número de medições por ponto: 5 ;
- Tempo de média por medição: 30 segundos;

Para cada banda de frequência foram utilizados 19 níveis de tensões (pontos para medição) de -80 dBV até 10 dBV com um incremento de 5 dBV. Para cada nível de tensão foram realizadas 5 medições em diferentes dias, cada medição com duração de 30 segundos.

3.2.1.5.3 Resultados

Utilizando o procedimento de avaliação descrito no item 3.2.1.5.1 e o procedimento de medição descrito no item 3.2.1.5.2, é determinada a CCR das bandas de frequência de ensaio. As Figuras 3.23 a 3.29 apresentam a CCRs obtidas, o eixo horizontal está na escala logarítmica para apresentar a curva de forma linear.

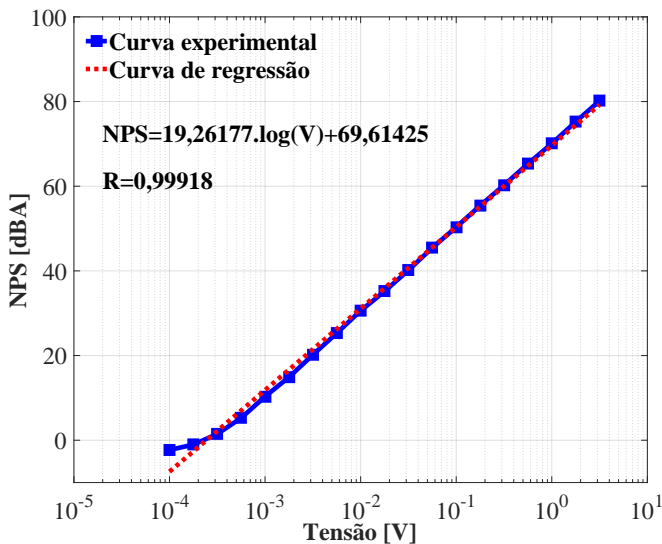


Figura 3.23: Curva Característica de Resposta em 125 Hz.

¹²dB em relação a $1 V_{RMS}$.

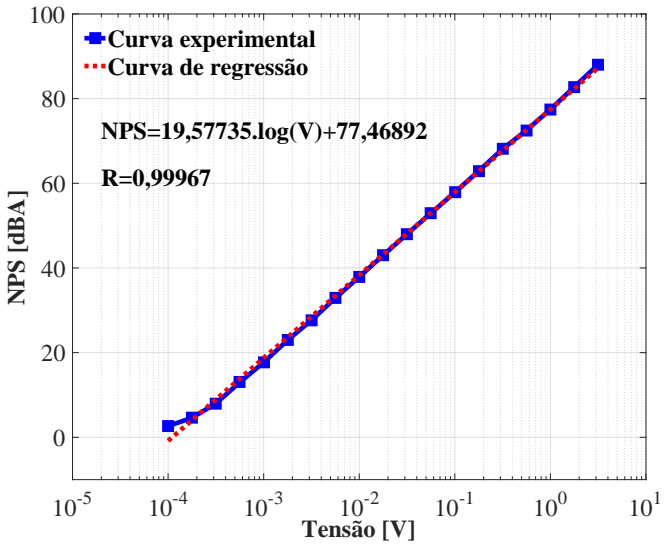


Figura 3.24: Curva Característica de Resposta em 250 Hz.

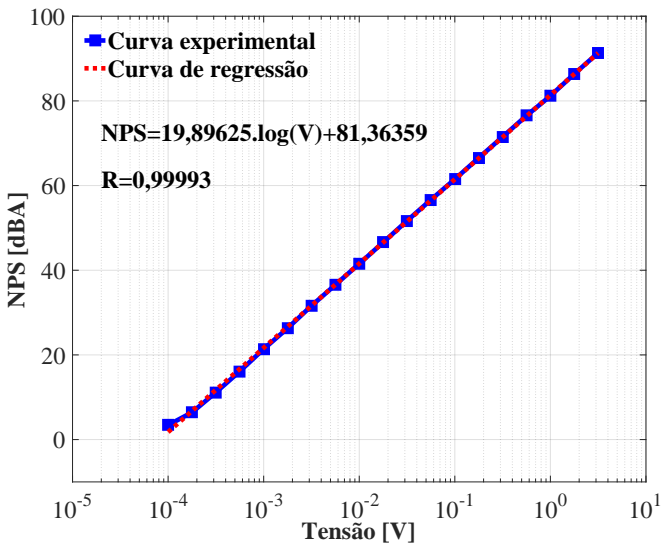


Figura 3.25: Curva Característica de Resposta em 500 Hz.

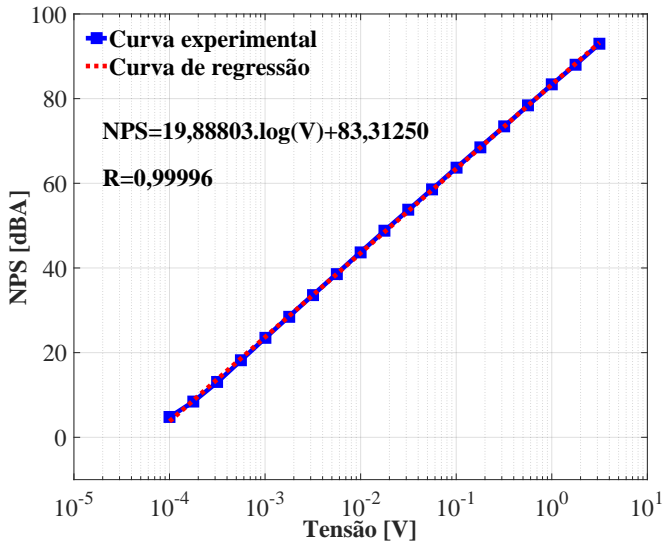


Figura 3.26: Curva Característica de Resposta em 1000 Hz.

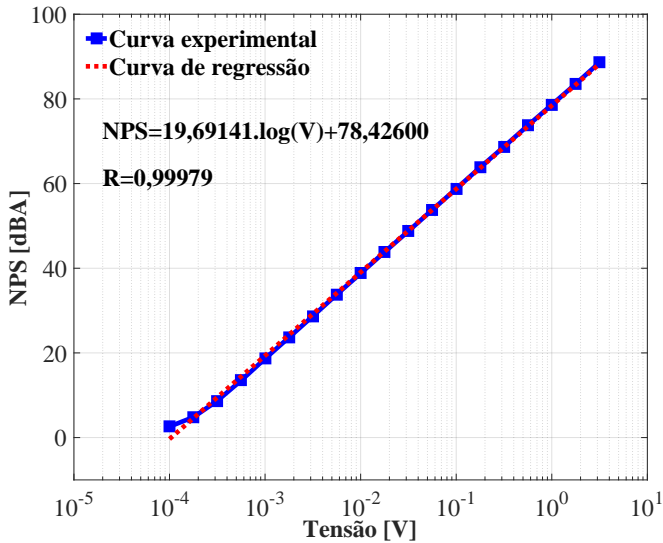


Figura 3.27: Curva Característica de Resposta em 2000 Hz.

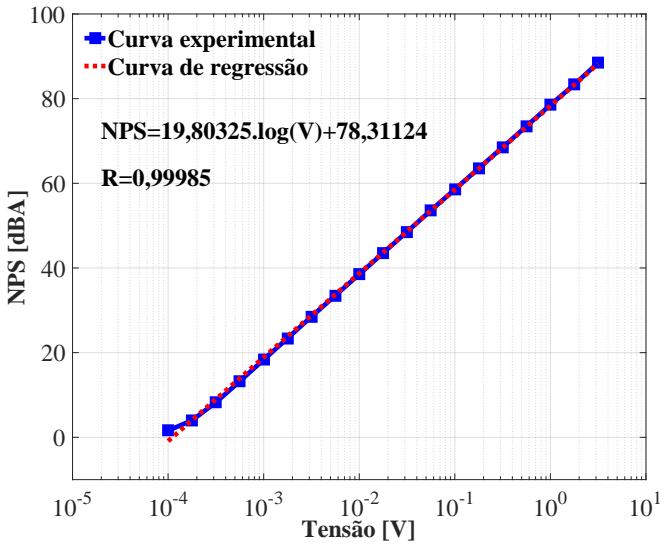


Figura 3.28: Curva Característica de Resposta em 4000 Hz.

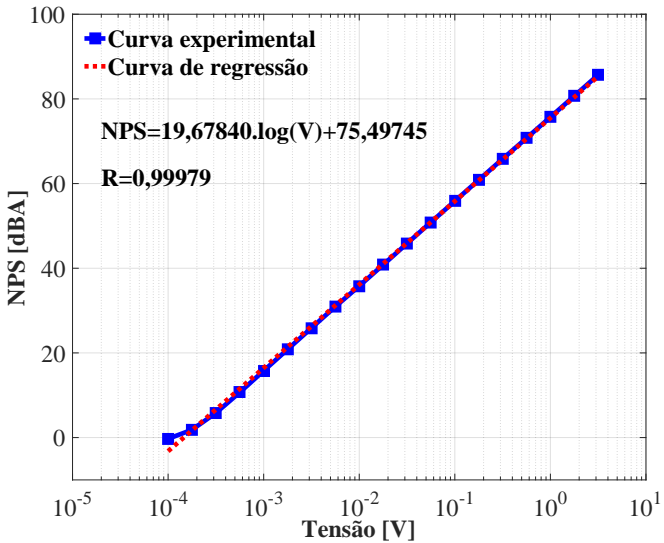


Figura 3.29: Curva Característica de Resposta em 8000 Hz.

Para todas as bandas de frequência de ensaio o coeficiente de correlação, r , foi próximo a 1 e o valor do coeficiente C próximo a 20. Isto demonstra que é possível prever o comportamento do sistema de medição. No Apêndice C, encontram-se as CCRs obtidas para a pressão acústica e valores do NPS medidos para cada banda de frequência de ensaio.

3.2.1.6 Correção

A correção do sistema de medição é composta pelas parcelas de correção do computador e software, placa DSAG, cabos e caixas acústicas. O Quadro 3.7 apresenta as correções do computador e software, placa DSAG, cabos e caixas acústicas.

Quadro 3.7: Correção do sistema de medição.

| Equipamento | C [V] | C [dB] |
|------------------|-------|--------|
| PC | 0 | 0 |
| Placa DSAG | 0 | 0 |
| Cabos | 0 | 0 |
| Caixas Acústicas | 0 | 0 |

Como os erros sistemáticos foram corrigidos na determinação das CCRs do sistema de medição, não há necessidade de realizar correções posteriormente, desta forma,

$$C(SM) = 0. \quad (3.50)$$

3.2.1.7 Incerteza padrão

A estimativa da incerteza padrão do sistema de medição é composta pelas parcelas de incerteza dos equipamentos que compõem o sistema de medição, sistema de referência e das CCRs:

- Equipamentos: incerteza padrão dos equipamentos que compõem o sistema de medição, computador e software, placa DSAG, cabos e caixas acústicas;
- Sistema de referência: incerteza padrão dos equipamentos que compõem o sistema de referência utilizado para determinar as CCRs, calibrador acústico, microfone e medidor de NPS;

- CCR: incerteza padrão devido ao desvio da CCR em relação a resposta real do sistema de medição e desvio padrão experimental.

Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada do sistema de medição,

$$u_{SM}^2 = u_{Equips}^2 + u_{SR}^2 + u_{CCR}^2. \quad (3.51)$$

Sendo u_{SM} a estimativa da incerteza do sistema de medição, u_{Equips} a estimativa de incerteza dos equipamentos que compõem o sistema de medição, u_{SR} a estimativa de incerteza dos equipamentos que compõem o sistema de referência e u_{CCR} a estimativa de incerteza das CCR.

A estimativa da incerteza padrão do sistema de medição depende da banda de frequência de ensaio e do NPS, desta forma, serão apresentadas as curvas da estimativa de incerteza do sistema de medição em função do NPS para cada banda de frequência de ensaio.

3.2.1.7.1 Incerteza padrão dos equipamentos

A estimativa da incerteza padrão dos equipamentos é composta pelas parcelas da estimativa de incerteza do computador e software, placa DSAG, cabos e caixas acústicas. O Quadro 3.8 apresenta essas estimativas de incerteza padrão.

Quadro 3.8: Incerteza padrão do sistema de medição.

| Equipamento | u[Bit] | u [mV] | u [dB] |
|------------------|--------|---------|---------|
| PC | 0,29 | - | - |
| Placa DSAG | - | 0,06478 | 0,05774 |
| Cabos | - | 0 | 0 |
| Caixas Acústicas | - | 0,00578 | 0,00506 |

A estimativa da incerteza padrão do computador e software pode ser desconsiderado conforme apresentado e explicado no item 3.2.1.2.1, que trata sobre o erro de quantização da placa DSAG. Para os cabos, a estimativa padrão também foi desconsiderada, pois este não apresentou erros aleatórios. A Equação (2.19) é utilizada para estimar a incerteza padrão do sistema de medição:

$$u_{\text{Equip}}^2 = c_{\text{SM}}^2 \cdot u_{\text{Placa DSAG}}^2 + c_{\text{SM}}^2 \cdot u_{\text{Caixas}}^2. \quad (3.52)$$

Sendo c_{SM} o coeficiente de sensibilidade do sistema de medição, que é a derivada das curvas de regressão das CRRs em relação a tensão. Como as CRRs não são lineares, a sensibilidade varia em função da tensão, desta forma, a estimativa de incerteza padrão dos equipamentos do sistema de medição é avaliada em função da tensão, para cada banda de frequência de ensaio. É importante ressaltar que as estimativas das incertezas padrão da placa DSAG em dB são avaliadas em separado das estimativas das incertezas padrão em volts e o mesmo se aplica para as estimativas das incertezas padrão das caixas acústicas. A incertezas padrão da placa DSAG e das caixas acústicas em volts devem ser estimadas em dB utilizando o coeficiente de sensibilidade. A estimativa da incerteza padrão dos equipamentos é determinada por,

$$u_{\text{Equip}}^2 = c_{\text{SM}}^2 \cdot [u_{\text{V}}^2(\text{Placa}) + u_{\text{V}}^2(\text{Caixas})] + \dots \\ \dots + u_{\text{dB}}^2(\text{Placa}) + u_{\text{dB}}^2(\text{Caixas}). \quad (3.53)$$

O coeficiente sensibilidade do sistema de medição é a derivada do NPS em função da tensão da Equação (3.46), têm-se então

$$c = \frac{d(\text{NPS})}{dV} = \frac{d[C \log_{10}(V) + D]}{dV} = \frac{C}{\ln(10)V}. \quad (3.54)$$

A incerteza dos equipamentos que compõem o sistema de medição pode ser estimada por

$$u_{\text{Equip}}^2 = \left[\frac{C}{\ln(10)V} \right]^2 \cdot [u_{\text{V}}^2(\text{Placa}) + u_{\text{V}}^2(\text{Caixas})] + \dots \\ \dots + u_{\text{dB}}^2(\text{Placa}) + u_{\text{dB}}^2(\text{Caixas}). \quad (3.55)$$

Utilizando os valores do coeficiente C de cada banda de frequência apresentados no item 3.2.1.5.3, o valor da estimativa da incerteza padrão da placa DSAG, apresentados no item 3.2.1.2.9, e o valor das estimativa da incerteza padrão das caixas acústicas, apresentado no item 3.2.1.4.5, têm-se as seguintes curvas das estimativas das incertezas padrão dos equipamentos que compõem o sistema de medição em função do NPS, no ponto de referência, dentro da sala de ensaio.

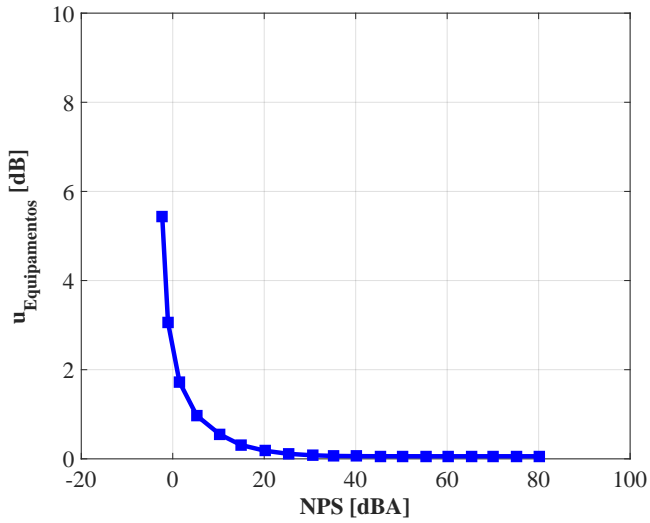


Figura 3.30: Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 125 Hz.

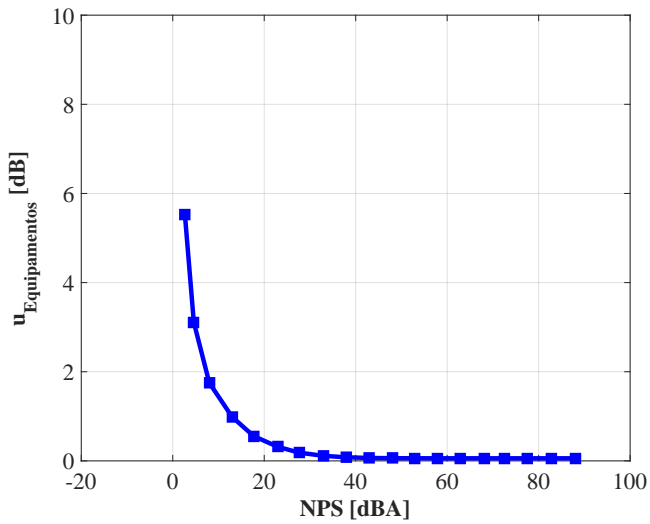


Figura 3.31: Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 250 Hz.

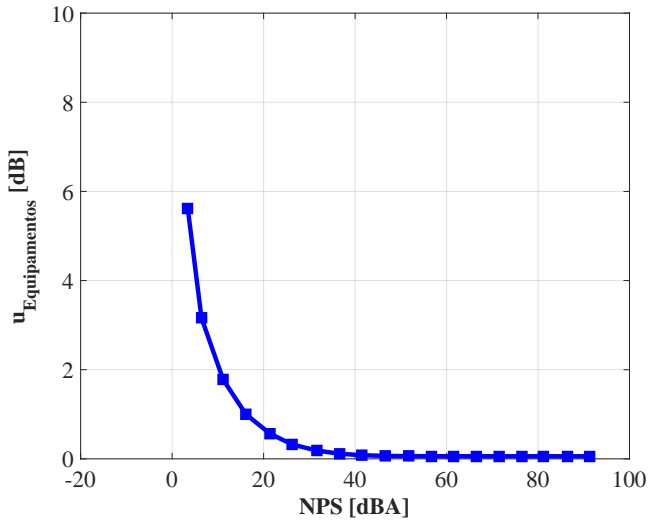


Figura 3.32: Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 500 Hz.

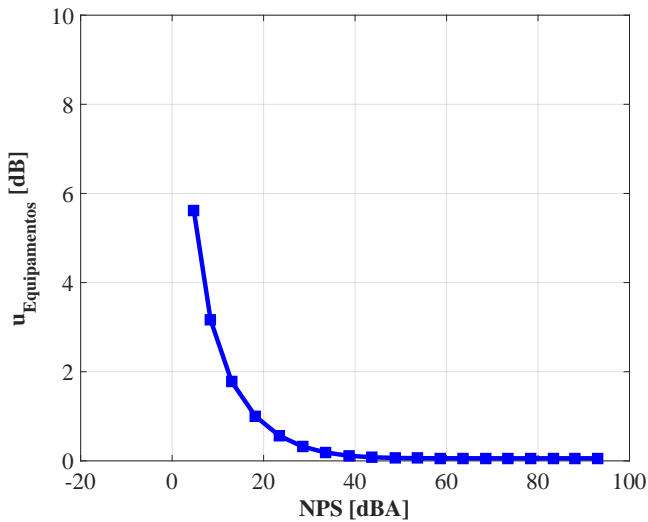


Figura 3.33: Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 1000 Hz.

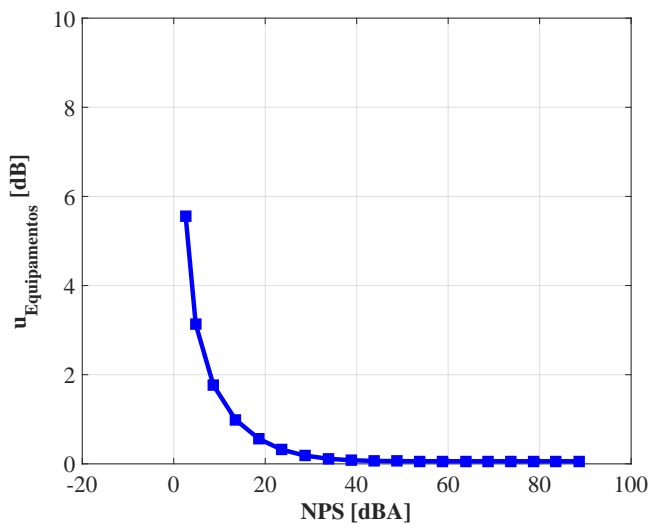


Figura 3.34: Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 2000 Hz.

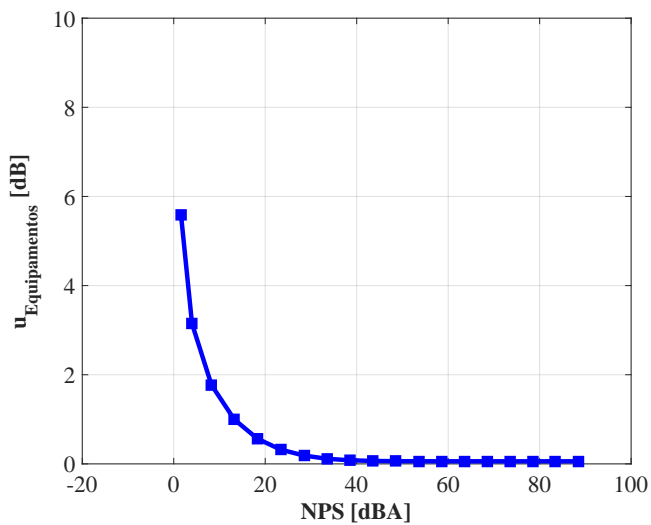


Figura 3.35: Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 4000 Hz.

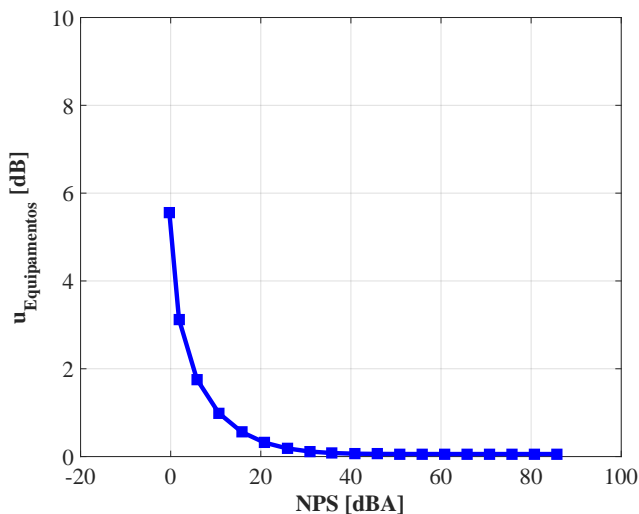


Figura 3.36: Estimativa da incerteza padrão dos equipamentos em 8000 Hz.

Nas Figuras 3.30 a 3.36 é possível perceber que a incerteza devido aos equipamentos é perto de 6 dB para NPS próximos de zero. Isto ocorre devido aos ruídos elétricos da placa DSAG e caixas acústicas. Para NPS acima de 20 dBA a estimativa de incerteza é menor que 1 dBA. Isso implica que a estimativa de incerteza dos equipamentos que compõem o sistema de medição é uma fonte de incerteza importante na determinação do limiar de audição aberto (sem o protetor auditivo), pois no limiar de audição aberto são utilizados baixos NPS, próximos a zero.

O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza dos equipamentos, para cada ponto de medição em cada banda de frequência de ensaio, pode ser considerado infinito, pois todas as fontes de incerteza são do tipo B.

$$\nu_{\text{Equipments}} = \infty. \quad (3.56)$$

3.2.1.7.2 Incerteza padrão do sistema de referência

A estimativa padrão do sistema de referência é composta pelo calibrador acústico, microfone e medidor de NPS. Considera-se que estas

estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada do sistema de referência,

$$u_{\text{SR}}^2 = u_{\text{Calibrador}}^2 + u_{\text{Microfone}}^2 + u_{\text{Medidor NPS}}^2. \quad (3.57)$$

No Apêndice D é apresentado todo o desenvolvimento para obtenção da estimativa de incerteza do sistema de referência. A seção D.5 apresenta o valor da estimativa da incerteza e o número de graus de liberdade,

$$u_{\text{SR}} = 0,40389 \text{ dB}, \quad (3.58a)$$

$$\nu_{\text{SR}} = \infty. \quad (3.58b)$$

3.2.1.7.3 Incerteza padrão da CCR

A estimativa da incerteza padrão da CCR é composta pelas parcelas da estimativa de incerteza do desvio da CCR em relação a resposta real do sistema de medição (linearidade) e do desvio padrão experimental. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza da CCR

$$u_{\text{CCR}}^2 = u_{\text{Desvio}}^2 + u_{\text{A}}^2. \quad (3.59)$$

O erro das CCRs pode ser considerado sistemático e pode ser corrigido, caso contrário deve ser considerado aleatório. No sistema de medição desenvolvido por Lima, não existe uma rotina implementada para corrigir este erro, desta forma, este é considerado aleatório. A estimativa padrão da incerteza do desvio é obtida através do erro das CCRs, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme. O erro do desvio é definido como sendo a maior diferença entre a CCR e as médias dos NPS medidos (curva real do sistema de medição).

$$\text{Erro}_{\text{Desvio}} = \pm |\text{extrmNPS}_{\text{Medidos}} - \text{CCR}|, \quad (3.60a)$$

$$u_{\text{Desvio}} = \frac{|\text{extrmNPS}_{\text{Medidos}} - \text{CCR}|}{\sqrt{3}}. \quad (3.60b)$$

Os valores do $\text{NPS}_{\text{Medidos}}$ podem ser encontrados nos Quadros

C.2 a C.8 no Apêndice C.

A estimativa da incerteza padrão do desvio padrão experimental é obtida através da Equação (2.11), para cada ponto de medição em cada banda de frequência de ensaio. Os valores dos desvios padrão de cada ponto de medição para cada banda de frequência de ensaio podem ser encontrados nos Quadros C.2 a C.8 no Apêndice C. A estimativa da incerteza padrão da CRR é

$$u_{\text{CCR}}^2 = \left(\frac{|\text{NPS}_{\text{Medidos}} - \text{CCR}|}{\sqrt{3}} \right)^2 + \sigma_{\text{A}}^2. \quad (3.61)$$

Utilizando os valores do $\text{NPS}_{\text{Medido}}$ apresentados nos Quadros C.2 a C.8 no Apêndice C e as equações da curva de regressão apresentadas das Figuras 3.23 a 3.29 e os desvios padrão apresentados nos Quadros C.2 a C.8 no Apêndice C, têm-se as seguintes curvas das estimativas da incerteza padrão da CCR em função do NPS para cada banda de frequência de ensaio, no ponto de referência, dentro da sala de ensaio.

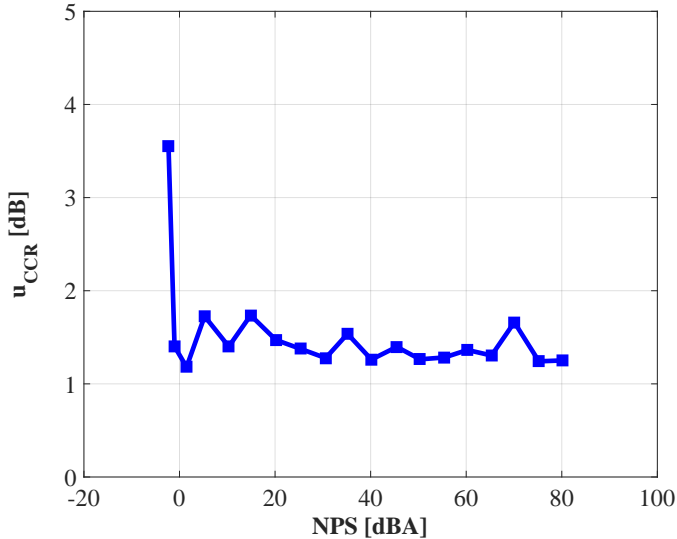


Figura 3.37: Estimativa da incerteza padrão da CCR em 125 Hz.

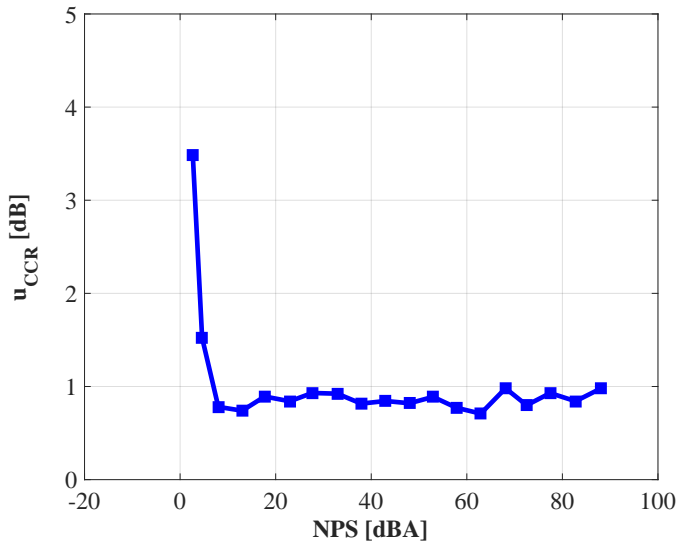


Figura 3.38: Estimativa da incerteza padrão da CCR em 250 Hz.

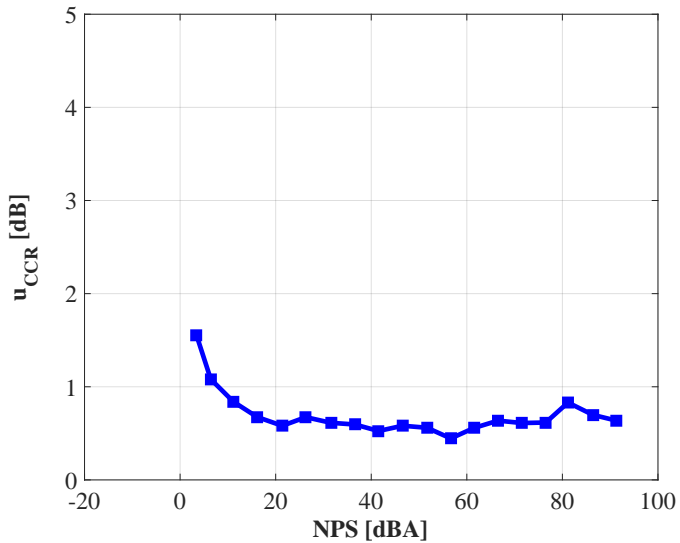


Figura 3.39: Estimativa da incerteza padrão da CCR em 500 Hz.

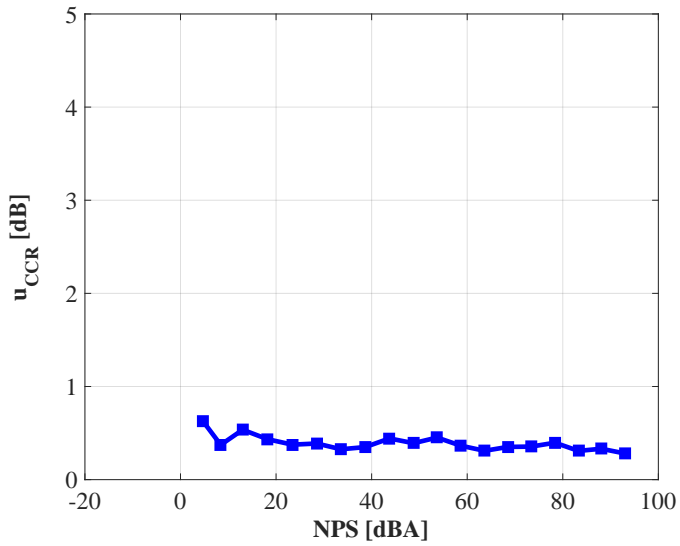


Figura 3.40: Estimativa da incerteza padrão da CCR em 1000 Hz.

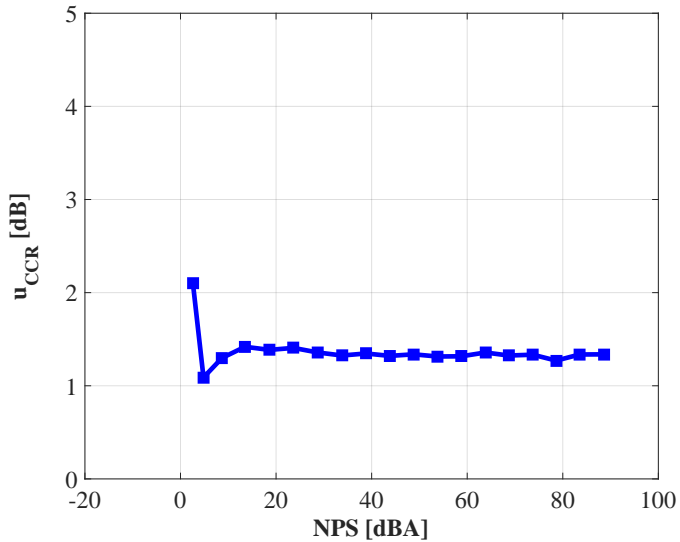


Figura 3.41: Estimativa da incerteza padrão da CCR em 2000 Hz.

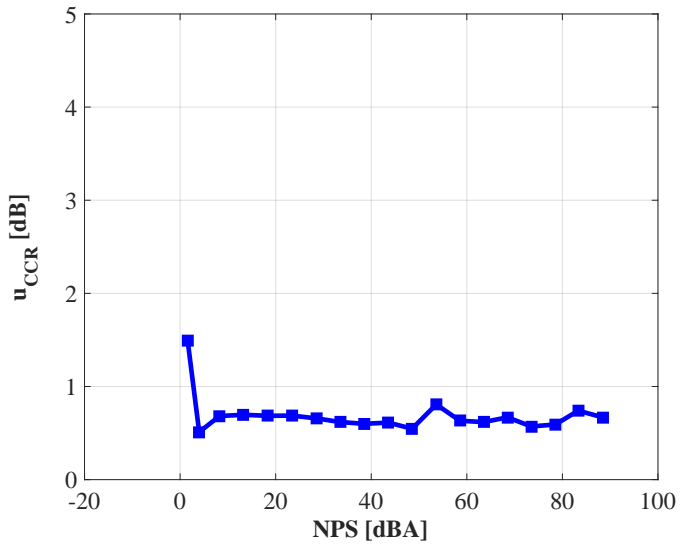


Figura 3.42: Estimativa da incerteza padrão da CCR em 4000 Hz.

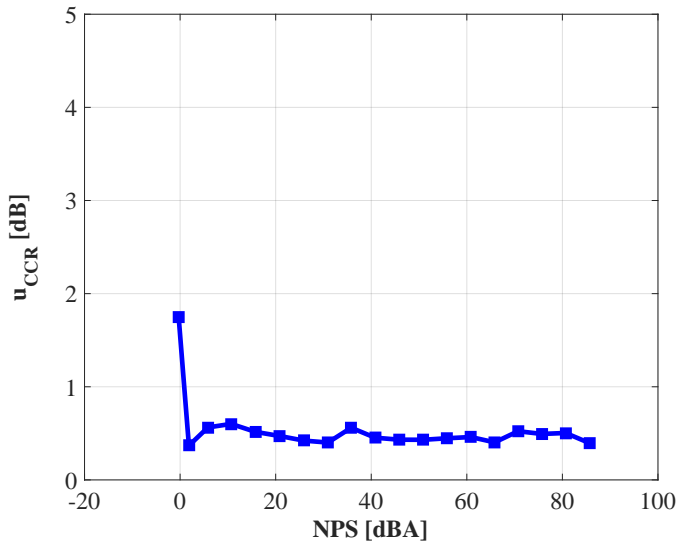


Figura 3.43: Estimativa da incerteza padrão da CCR em 8000 Hz.

O número de graus de liberdade, para cada ponto de medição em cada banda de frequência de ensaio, da estimativa da incerteza padrão do desvio pode ser considerado infinito pois é uma fonte de incerteza considerada do tipo B. O número de graus de liberdade do desvio padrão experimental é definido pela Equação (2.13). O número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da CRR é calculado pela Equação (2.20). Desta forma, o número de graus de liberdade é

$$\nu_{CCR} = 4. \quad (3.62)$$

3.2.1.7.4 Incerteza padrão do sistema de medição

A estimativa de incerteza padrão do sistema de medição é obtida utilizando a Equação (3.51) e os dados obtidos da incerteza padrão dos equipamentos que compõem o sistema de medição, item 3.2.1.7.1, do sistema de referência, item 3.2.1.7.2 e da CCR, item 3.2.1.7.3. As Figuras 3.44 a 3.50 apresentam a estimativa de incerteza do sistema de medição em função do NPS, no ponto de referência, dentro da sala de ensaio.

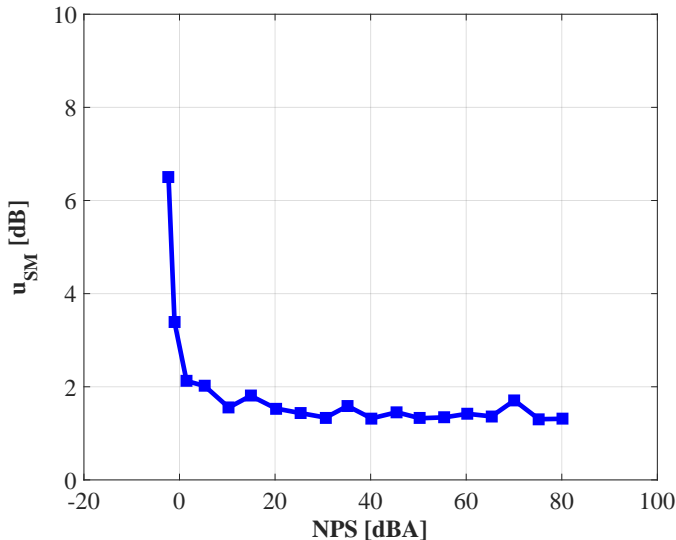


Figura 3.44: Estimativa da incerteza padrão do SM em 125 Hz.

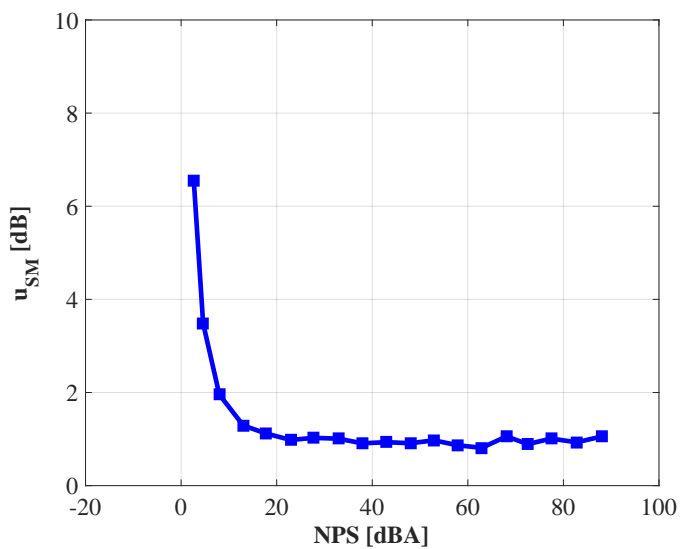


Figura 3.45: Estimativa da incerteza padrão do SM em 250 Hz.

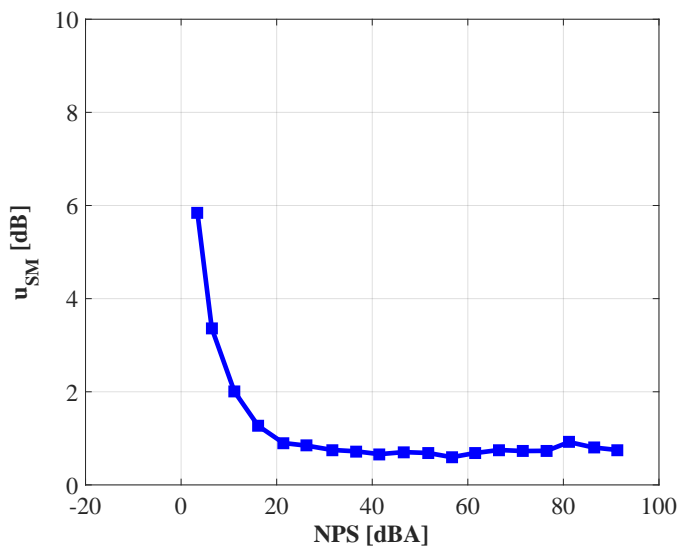


Figura 3.46: Estimativa da incerteza padrão do SM em 500 Hz.

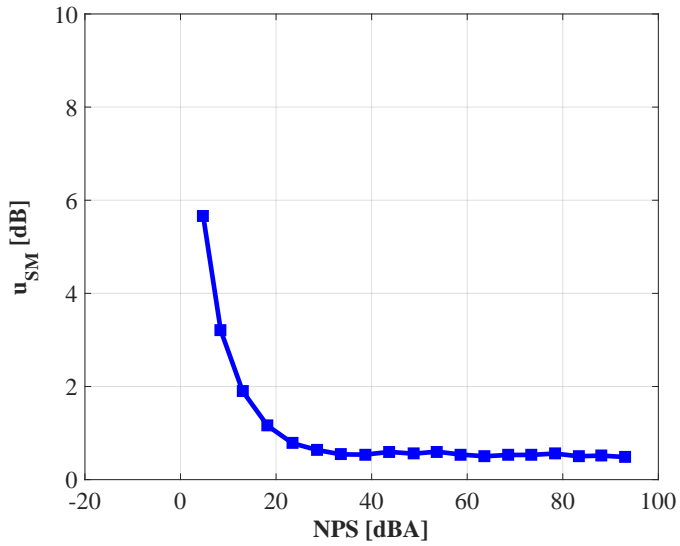


Figura 3.47: Estimativa da incerteza padrão do SM em 1000 Hz.

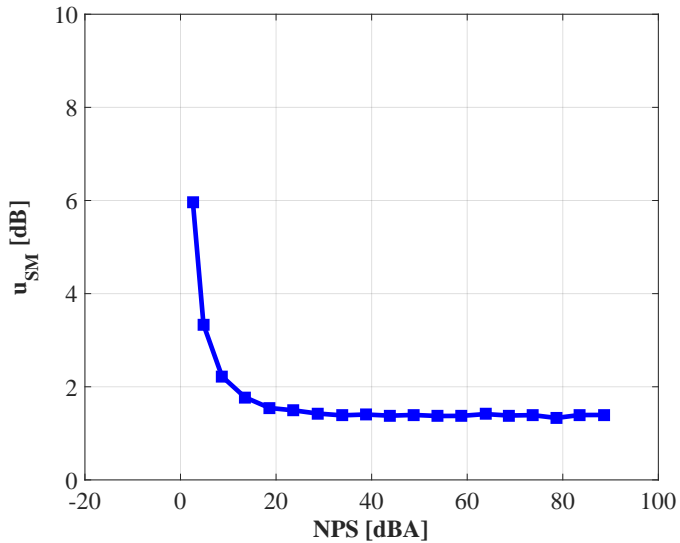


Figura 3.48: Estimativa da incerteza padrão do SM em 2000 Hz.

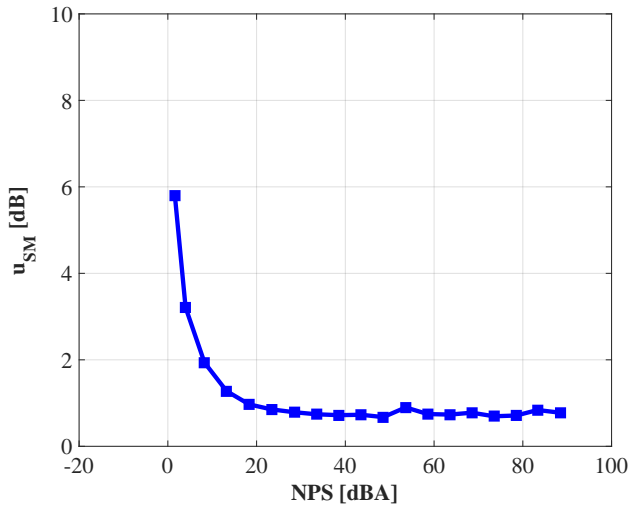


Figura 3.49: Estimativa da incerteza padrão do SM em 4000 Hz.

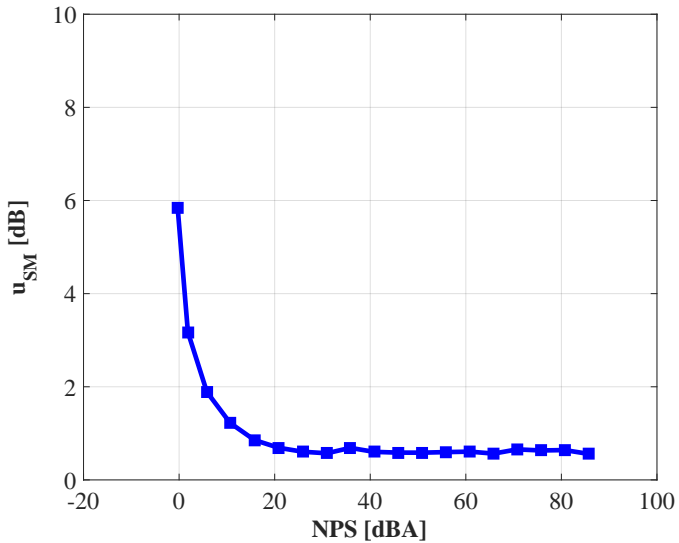


Figura 3.50: Estimativa da incerteza padrão do SM em 8000 Hz.

A estimativa de incerteza padrão do sistema de medição é próximo de 6 dB para NPS próximos a zero. A principal parcela de contribuição é devido as fontes de incerteza da placa DSAG e das caixas acústicas. Para NPS acima de 20 dBA a estimativa da incerteza padrão é próxima de 2 dB para todas as bandas de frequência de ensaio. O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza do sistema de medição é considerado infinito.

$$\nu_{SM} = \infty. \quad (3.63)$$

3.2.2 Parâmetros de ensaio

Os parâmetros de ensaio considerados são o incremento de amplitude e a resolução dos valores de NPS que são armazenados pelo sistema de medição.

3.2.2.1 Incremento de amplitude

Esse parâmetro define o valor em dB, da diferença entre o NPS do estímulo sonoro atual e subsequente, podendo ser para mais ou para menos, para todas as bandas de frequência de ensaio. De acordo com a Norma ANSI S12.6 (2016) esse valor deve ser inferior a 2,5 dB. A Figura 3.51 apresenta um esquemático do funcionamento do incremento de amplitude durante o ensaio.

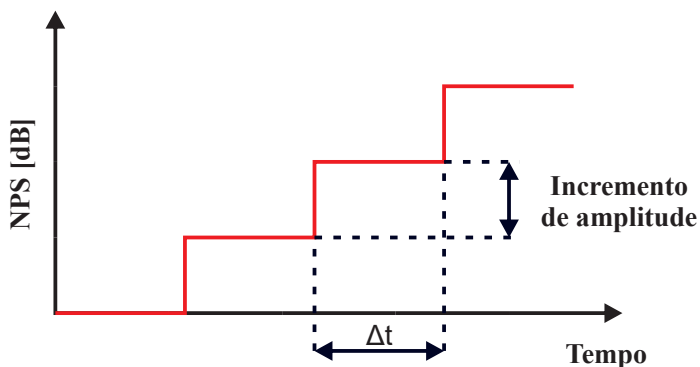
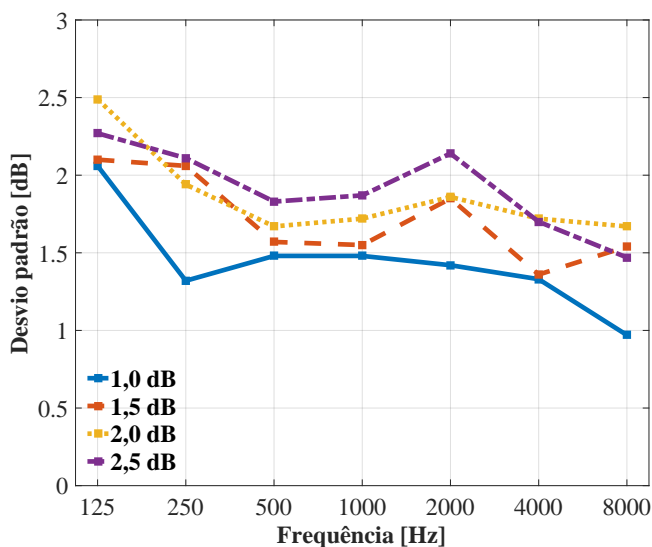


Figura 3.51: Incremento de amplitude.

Lima (2003) analisou 4 configurações de incremento de amplitude, 1,0 dB; 1,5 dB; 2,0 dB e 2,5 dB com o objetivo de avaliar qual desses valores gera um menor erro no processo de determinação do limiar de audição. O método de teste consistiu em determinar 3 limiares de audição aberto (sem protetor auditivo) em todas as 7 bandas de frequência de ensaio, para os 4 valores de incremento de amplitude citados, em 26 ouvintes. Desta forma, foram mensurados 12 limiares de audição aberto para cada ouvinte em cada banda de frequência. Foi calculado o desvio padrão experimental para cada valor do incremento de amplitude, frequência de ensaio e ouvinte e por fim a média dos desvios padrão experimental dos limiares de audição dos ouvintes em função da frequência de ensaio. A Figura 3.52 apresenta os resultados obtidos por Lima (2003).



Fonte: adaptado de Lima (2003).

Figura 3.52: Média dos desvios padrão em função da frequência.

Observando a Figura 3.52, nota-se que o incremento de amplitude de 1,0 dB gera menos desvio padrão para todas as bandas de frequência de ensaio. Apesar disso, Lima (2003) realiza uma análise de

variância através do Duncan's Multiple Range Test ¹³, para verificar se essas diferenças apresentadas na Figura 3.52 são estatisticamente significativas.

Lima (2003) concluiu que para as bandas de frequência de 125 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz não existem diferenças significativas nos 4 valores do incremento de amplitude, com um nível de confiança de 95 %. Para a banda de frequência de 250 Hz, com um nível de confiança de 95 %, os incrementos de amplitude de 1,0 dB e 2,0 dB apresentam as menores médias dos desvios padrão e, consequentemente, as menores incertezas. O mesmo acontece para a banda de frequência de 8000 Hz para os incrementos de amplitude de 1,0 dB e 2,5 dB. Conclui-se então que o Incremento de Amplitude (IA) de 1,0 dB gera o menor desvio padrão e, consequentemente, a menor incerteza para todas as bandas de frequência de ensaio.

A estimativa de incerteza padrão dessa fonte de incerteza pode ser modelada como sendo $\pm IA/2$ dB com uma distribuição de probabilidade uniforme, uma vez que o incremento de amplitude é discreto, tendo a mesma probabilidade de ocorrer entre $-IA/2$ dB e $+IA/2$ dB, para todas as bandas de frequência de ensaio,

$$Erro_{IA} = \pm \frac{IA}{2}, \quad (3.64a)$$

$$u_{IA} = \frac{IA}{2\sqrt{3}}. \quad (3.64b)$$

No caso do sistema de medição utilizado, é configurado um incremento de amplitude de 1 dB. O erro aleatório e a estimativa da incerteza padrão do incremento de amplitude são

$$Erro_{IA} = \pm \frac{1}{2} = 0,5 \text{ dB}, \quad (3.65a)$$

$$u_{IA} = \frac{IA}{2\sqrt{3}} = 0,28868 \text{ dB}. \quad (3.65b)$$

O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza do incremento de amplitude é considerado infinito, pois esta fonte de incerteza é considerada do tipo B.

$$\nu_{IA} = \infty. \quad (3.66)$$

¹³Teste do alcance múltiplo de Duncan, em tradução livre.

3.2.2.2 Resolução

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), a resolução é a menor diferença possível entre as indicações do sistema de medição e no caso de dispositivos eletrônicos, a resolução corresponde ao incremento digital. Em cada operação matemática que é realizada no computador, uma certa quantidade de informação é perdida, uma vez que nenhum sistema possui resolução infinita. A quantidade de informação perdida dependerá da resolução definida no sistema, neste caso, do número de casa decimais utilizadas para armazenar as informações ou valores. Esse tipo de incerteza possui uma distribuição de probabilidade uniforme, uma vez que o sistema sempre arredondará o valor para o número de algarismos significativos definidos pela resolução. O erro aleatório e a incerteza padrão da Resolução (R) podem ser estimados por

$$Error_R = \pm \frac{R}{2}, \quad (3.67a)$$

$$u_R = \frac{R}{2\sqrt{3}}. \quad (3.67b)$$

O sistema de medição desenvolvido por Lima (2003) e utilizado nos dias atuais (após algumas revisões), armazena os valores dos limiares de audição abertos e fechados com duas casas decimais, tendo assim uma resolução de 0,01 dB. Neste caso, o erro aleatório e a incerteza padrão da resolução é

$$Error_R = \pm \frac{0,01}{2} = 0,005 \text{ dB}, \quad (3.68a)$$

$$u_R = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,00289 \text{ dB}. \quad (3.68b)$$

O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza da resolução é considerado infinito, pois, esta fonte de incerteza é considerada do tipo B.

$$\nu_R = \infty. \quad (3.69)$$

3.2.2.3 Incerteza padrão dos parâmetros de ensaio

A estimativa padrão dos parâmetros de ensaio é composta pelo incremento de amplitude e resolução, apresentados nos itens 3.2.2.1 e 3.2.2.2. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada do sistema de referência:

$$u_{\text{Parâmetros de ensaio}}^2 = u_{\text{IA}}^2 + u_{\text{R}}^2. \quad (3.70)$$

O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza do incremento de amplitude e resolução é considerado infinito, conforme apresentado nos itens 3.2.2.1 e 3.2.2.2. O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza dos parâmetros de ensaio é obtido através da Equação (2.20). O Quadro 3.9 apresenta as estimativas da incerteza padrão e o número de graus de liberdade dos parâmetros de ensaio.

Quadro 3.9: Incerteza padrão dos parâmetros de ensaio.

| N. | Fonte de Erro | Erro Aleatório (dB) | Distribuição | u (dB) | ν |
|----|-------------------------|---------------------|--------------|---------|----------|
| 1 | Incremento de Amplitude | 0,5 | Uniforme | 0,28868 | ∞ |
| 2 | Resolução | 0,005 | Uniforme | 0,00289 | ∞ |

$$u_{\text{Parâmetros de ensaio}} = 0,28870 \text{ dB}, \quad (3.71a)$$

$$\nu_{\text{Parâmetros de ensaio}} = \infty. \quad (3.71b)$$

Os parâmetros de ensaio são iguais para todas as bandas de frequência de ensaio, dessa forma a estimativa da incerteza padrão dos parâmetros de ensaio é a mesma.

3.2.3 Campo acústico

Os parâmetros físicos da câmara de ensaio como as dimensões, absorção sonora e a posição da cabeça do ouvinte devem ser avaliados, uma vez que influenciam na percepção do estímulo sonoro durante o

ensaio. Além disso, existe uma movimentação natural da cabeça do ouvinte durante o ensaio, pois é impossível para o mesmo mantê-la no ponto de referência durante todo o período do ensaio. Esses parâmetros podem ser avaliados através da distribuição do NPS do campo sonoro em torno da posição de referência (posição da cabeça do ouvinte). A Norma ANSI S12.6 descreve que a uniformidade sonora, direcionalidade sonora e tempo de reverberação devem ser avaliados em todas as bandas de frequência de ensaio e define valores limites para qualificar o ambiente, no caso, a sala de ensaio. Apesar da qualificação definir valores mínimos que o campo acústico deve atender, existem componentes de erro aleatório que devem ser avaliados.

A ANSI S12.6 descreve que a uniformidade sonora deve ser avaliada em seis posições a 15 cm do ponto de referência (posição da cabeça do ouvinte), em três eixos perpendiculares, conforme ilustrado na Figura 3.53 e Figura 3.54. Os valores do NPS nos eixos $\pm x$ e $\pm y$ não devem ultrapassar em 5 dB de diferença, enquanto que, no eixo $\pm z$ não devem ultrapassar de 3 dB, para todas as bandas de frequência de ensaio.

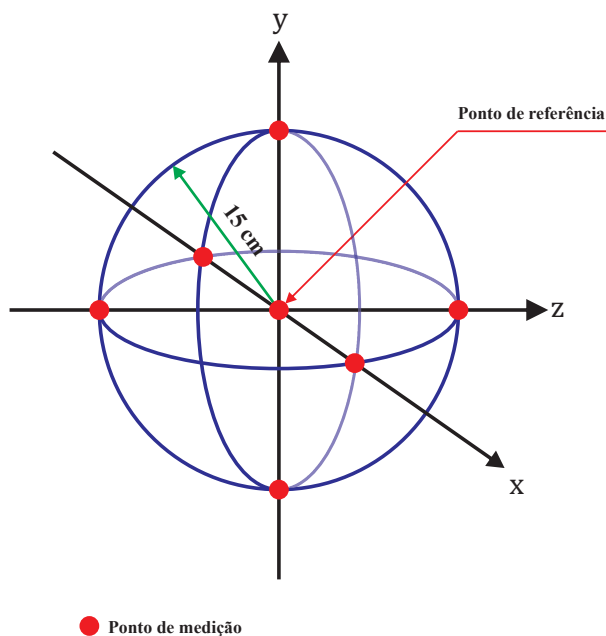


Figura 3.53: Pontos de medição da uniformidade sonora.

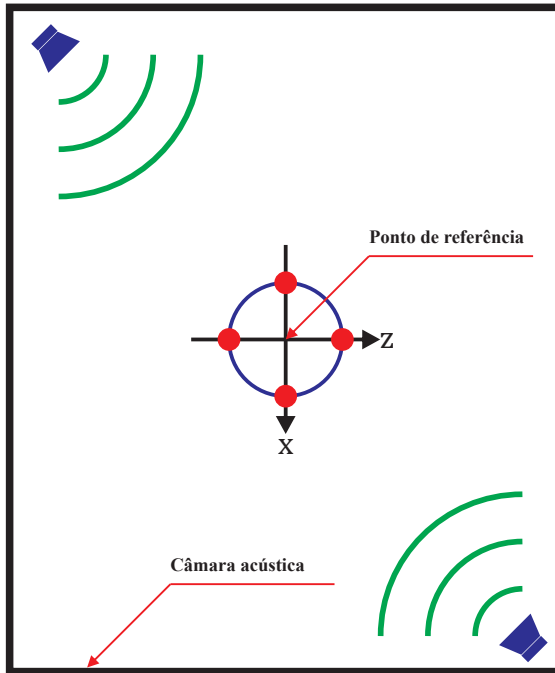


Figura 3.54: Esquemático da sala de ensaio.

3.2.3.1 Procedimento de avaliação

A incerteza padrão do campo acústico poderia ser estimada utilizando os limites de variação do NPS da uniformidade sonora permitido pela Norma. Apesar disso, essa estimativa de incerteza pode ser experimentalmente obtida reduzindo assim o seu valor. A incerteza padrão do campo acústico pode ser estimada através da maior diferença entre o NPS do ponto de referência e o NPS dos pontos $\pm x$, $\pm y$ e $\pm z$. Voix e Lapotre (2014) utilizaram um ATF para avaliar a distribuição do NPS em torno do ponto de referência. O NPS foi medido conforme o ATF se deslocava nos 3 eixos perpendiculares ($\pm x$, $\pm y$ e $\pm z$) e 2 planos de rotação. Voix e Lapotre (2014) concluíram que essa fonte de incerteza possui uma distribuição de probabilidade normal. Dessa forma, o erro e a estimativa de incerteza da variação do campo acústico podem ser obtidos por

$$Erro_{\text{Campo Acústico}} = \pm |\text{Max}(\text{NPS}_{\pm x, y, z}) - \text{NPS}_{\text{Ponto de referência}}|, \quad (3.72a)$$

$$u_{\text{Campo Acústico}} = \frac{|\text{Max}(\text{NPS}_{\pm x, y, z}) - \text{NPS}_{\text{Ponto de referência}}|}{2}. \quad (3.72b)$$

O número de graus de liberdade é infinito, pois esta fonte de incerteza é considerada do tipo B.

$$\nu_{\text{Campo Acústico}} = \infty. \quad (3.73)$$

3.2.3.2 Procedimento de medição

Este ensaio é realizado através de uma rotina no software de ensaio, que gera um sinal de tensão do tipo ruído branco de banda larga na saída da placa DSAG, que transmite o sinal através de cabos até as duas caixas acústicas dentro da sala de ensaio. São utilizadas 7 posições de medição dentro da sala de ensaio: o ponto de referência, $\pm x$, $\pm y$ e $\pm z$, conforme ilustrado na Figura 3.53.

Os seguintes equipamentos foram utilizados para as medições de avaliação do campo acústico:

- Analisador portátil da Brüel & Kjaer, tipo 1, modelo 2250, com filtro de 1/3 de oitava e ponderação A, classe 1;
- Microfone da marca Brüel & Kjaer, modelo 4955 (*low-noise*) com cabo de 15 metros;
- Calibrador acústico da marca Brüel & Kjaer, modelo 4231;
- Placa de geração de sinais da *National Instruments* PCI 4461 e rotina de geração de sinais do software desenvolvido por Lima.

O microfone 4955 foi acoplado a um tripé e colocado na posição do ponto de referência a 1,5 metros de altura, $\pm x$, $\pm y$ e $\pm z$ e conectado ao analisador portátil 2250 posicionado fora da sala de ensaio. Antes de cada série de medições o sistema foi calibrado. Para gerar os sinais de tensão foi utilizado o próprio sistema de medição com uma rotina própria para esse ensaio.

Os parâmetros utilizados para as medições de avaliação do campo acústico foram:

- Bandas de frequências (1/3 oitava): 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz;
- Faixa de medição: 50 a 80 dBA;
- Número de posições de medição: 7;
- Número de medições por ponto: 5;
- Tempo médio por medição: 60 segundos;

Foram realizadas 5 séries de medições, cada qual com 7 posições de medição e 60 segundos de duração. Como foi utilizado um ruído do tipo banda larga, em cada medição é extraído o valor médio do NPS por banda de frequência de ensaio. Para cada série de medição foi utilizado um valor de NPS diferente.

3.2.3.3 Incerteza padrão do campo acústico

Utilizando os procedimentos de avaliação descrito no item 3.2.3.1 e de medição descrito no item 3.2.3.2, são determinados os erros com uma distribuição de probabilidade normal e infinitos graus de liberdade e a estimativa da incerteza padrão para cada banda de frequência de ensaio. O Quadro 3.10 apresenta a estimativa da incerteza padrão e o número de graus de liberdade para cada banda de frequência do ensaio. No Apêndice E são apresentados os resultados de todas as medições da variação do campo acústico.

Quadro 3.10: Incerteza padrão do campo acústico.

| N. | Frequência (Hz) | Erro Aleatório (dB) | Distribuição | u (dB) | ν |
|----|-----------------|---------------------|--------------|--------|----------|
| 1 | 125 | 3,78 | Normal | 1,89 | ∞ |
| 2 | 250 | 2,10 | Normal | 1,05 | ∞ |
| 3 | 500 | 2,01 | Normal | 1,01 | ∞ |
| 4 | 1000 | 1,58 | Normal | 0,79 | ∞ |
| 5 | 2000 | 2,18 | Normal | 0,66 | ∞ |
| 6 | 4000 | 2,39 | Normal | 1,20 | ∞ |
| 7 | 8000 | 2,02 | Normal | 1,01 | ∞ |

3.2.4 Ouvinte e amostra do protetor auditivo

Como explicado na seção 3.1, o NPS do limiar de audição é calculado através da média aritmética dos pontos de inversão (Equação 3.1),

ou seja, é utilizado somente o limiar médio aberto e fechado de audição para calcular a atenuação de cada série de medição. As informações do traço do limiar de audição do ouvinte, apesar de serem gravadas, não são utilizadas. Essa variação da resposta do ouvinte, mesmo respeitando os critérios apresentados (seção 3.1), possui uma parcela de incerteza relativa a capacidade do ouvinte responder aos estímulos sonoros adequadamente e, no caso do limiar fechado de audição, a capacidade de colocação adequada e as variações de materiais e geometrias das amostras dos protetores auditivos utilizadas.

De acordo com Lima (2003), existe uma série de fatores que influenciam a capacidade do ouvinte de responder assertivamente os estímulos sonoros:

- Experiência e aptidão em responder ao sistema de medição;
- Capacidade de concentração;
- Estado psicológico;
- Temperatura, umidade e pressão da sala de ensaio.

Além desses fatores apresentados, existem os fatores relativos as amostras do protetor auditivo e sua interação com o ouvinte como:

- Tamanho dos canais auditivos e da cabeça do ouvinte;
- Capacidade da colocação correta do protetor auditivo, através da experiência e perícia no manuseio e capacidade de interpretação dos manuais de instrução do produto;
- Variação das propriedades dos materiais e geometria entre as amostras de um mesmo modelo de protetor auditivo.

Todos esses fatores apresentados influenciam o traço do limiar de audição dos ouvintes e conseqüentemente, influenciam os valores das inversões (vales e picos) obtidos durante o ensaio, que são utilizados para obtenção do limiar médio de audição e cálculo de atenuação.

A estimativa da incerteza padrão da resposta do ouvinte é obtida através do desvio padrão dos pontos de inversão e a distribuição de probabilidade destes pontos. Lima (2003) e ISO 4869-5 (2006) descrevem que os pontos de inversão distribuem-se de forma normal em torno do limiar de audição médio, posteriormente Lima et al. (2010) descrevem que esses pontos de inversão distribuem-se de forma uniforme e a ANSI S12.6 (2016) descreve que esses pontos de inversão distribuem-se de forma normal em torno do limiar de audição médio. É necessário avaliar a distribuição de probabilidade da resposta do ouvinte no limiar de audição aberto e fechado.

3.2.4.1 Distribuição de probabilidade da resposta do ouvinte

A distribuição de probabilidade da resposta do ouvinte no limiar de audição aberto e fechado pode ser avaliada experimentalmente através dos dados de ensaios realizados. Para isso se avalia o histograma de cada banda de frequência de ensaio para cada tipo de limiar de audição.

O limiar de audição é diferente para cada ouvinte e pode variar inclusive, para um mesmo ouvinte e dessa forma, é necessário normalizar os pontos de inversão de todos os ouvintes para que seja possível analisá-los de forma conjunta. Nessas situações, Kraft e Eeden (1968) descrevem que deve ser realizada uma transformação alterando a origem dos valores, sem alterar a escala. Para cada limiar de audição transformam-se os valores absolutos dos pontos de inversão (I) para valores relativos (I_r) ao limiar médio de audição (L), isto é:

$$I_r(i) = I(i) - L. \quad (3.74)$$

Sendo I o valor absoluto do ponto de inversão, L o limiar de audição médio e I_r o valor relativo (distância) do ponto de inversão ao limiar de audição médio. Isto deve ser realizado para cada limiar de audição ensaiado de cada ouvinte e para cada banda de frequência de ensaio. Desta forma, é possível avaliar conjuntamente todos os limiares de audição de uma amostra de ouvintes. A Figura 3.55 apresenta um exemplo do histograma da distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição do ouvinte.

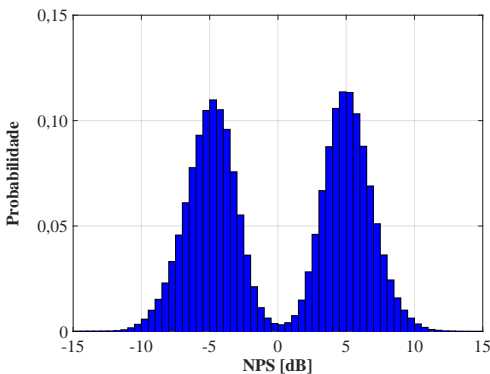


Figura 3.55: Exemplo do histograma da resposta dos ouvintes.

Na Figura 3.55 é possível perceber a existência de dois picos, um referente às inversões dos vales e o outro dos picos. Assume-se que a distribuição de probabilidade dos pontos de inversão dos vales e picos são normais, o que é razoável, uma vez que os pontos de inversões dos vales devem ser próximos um dos outros e dos picos também. Têm-se assim, duas distribuições de probabilidade normais, deslocadas entre si, formando assim uma distribuição bimodal ou binormal. É possível verificar ainda que a média dos pontos de inversões dos vales é próximo a -5 dB e dos picos a 5 dB, o que torna a distribuição de probabilidade simétrica. De acordo com Murphy et al. (2002), a função de densidade de probabilidade de uma distribuição bimodal é

$$p(x) = \frac{\phi}{\sqrt{2\pi}s_V} e^{-\frac{(x-L_V)^2}{2s_V^2}} + \frac{(1-\phi)}{\sqrt{2\pi}s_P} e^{-\frac{(x-L_P)^2}{2s_P^2}}. \quad (3.75)$$

Sendo $p(x)$ a função de densidade de probabilidade, L_V e L_P a média dos pontos de inversão dos vales e picos, s_V e s_P o desvio padrão dos pontos de inversão dos vales e picos e ϕ a constante de proporcionalidade que relaciona as duas distribuições normais (vale e pico), que varia de 0 a 1. Esses valores podem ser calculados por:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i, \quad (3.76a)$$

$$L_{V,P} = \frac{1}{N_{V,P}} \sum_{i=1}^{N_{V,P}} I_{V_i,P_i}, \quad (3.76b)$$

$$s_{V,P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{V,P}} (L_{V_i,P_i} - L_{V,P})^2}{N_{V,P} - 1}}. \quad (3.76c)$$

As Figuras 3.56 a 3.62 apresentam o histograma e a curva de probabilidade obtida para os limiares de audição aberto, enquanto que as Figuras 3.63 a 3.69 apresentam o histograma e a curva de probabilidade obtida para os limiares de audição fechado, cada uma para uma banda de frequência diferente. Para cada histograma foram utilizados 25.556 limiares de audição, cada um contendo 6 pontos de inversão (3 vales e 3 picos), totalizando 153.336 pontos. Os dados utilizados foram de ensaios previamente realizados entre 2003 e 2016.

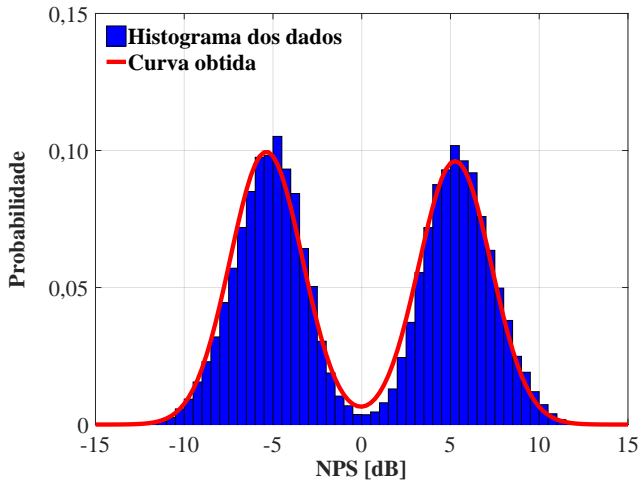


Figura 3.56: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 125 Hz.

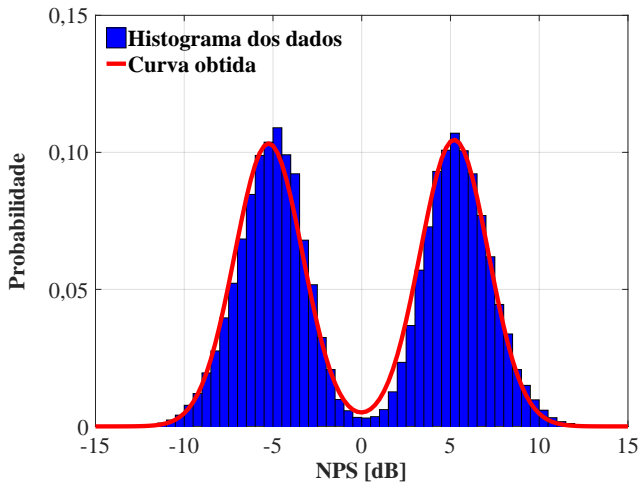


Figura 3.57: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 250 Hz.

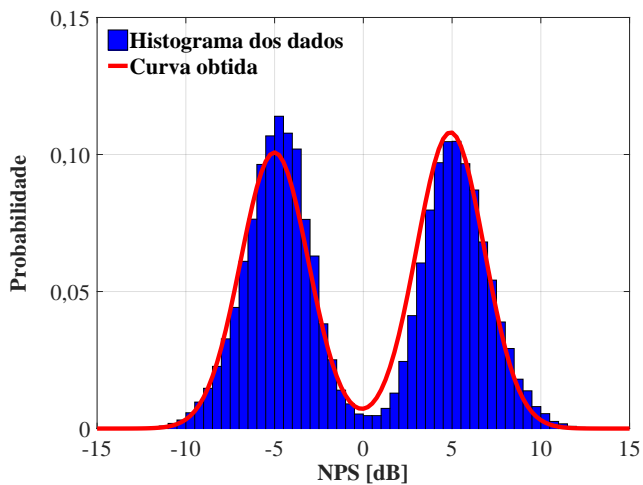


Figura 3.58: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 500 Hz.

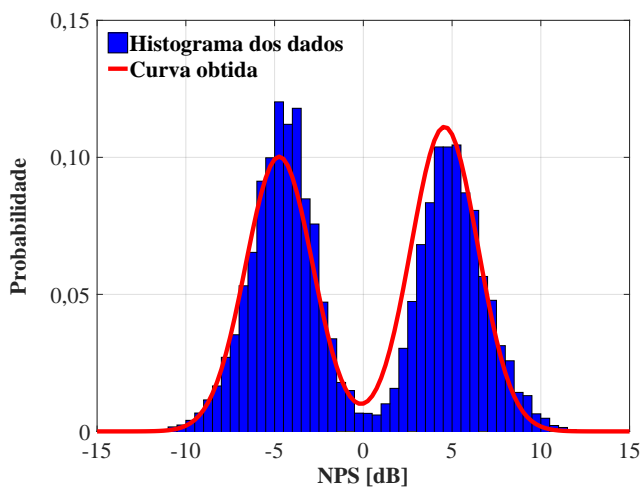


Figura 3.59: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 1000 Hz.

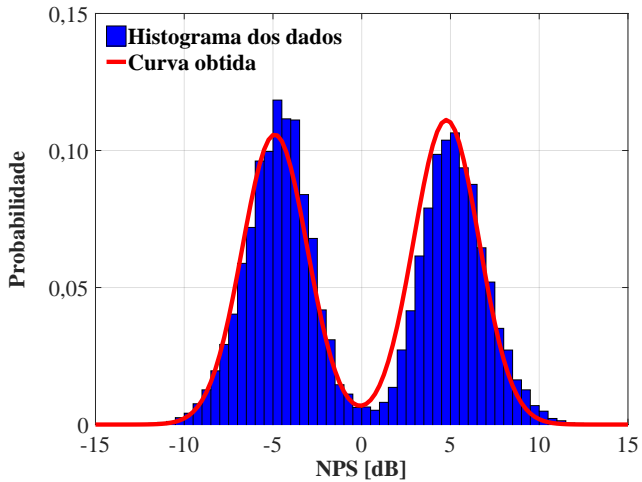


Figura 3.60: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 2000 Hz.

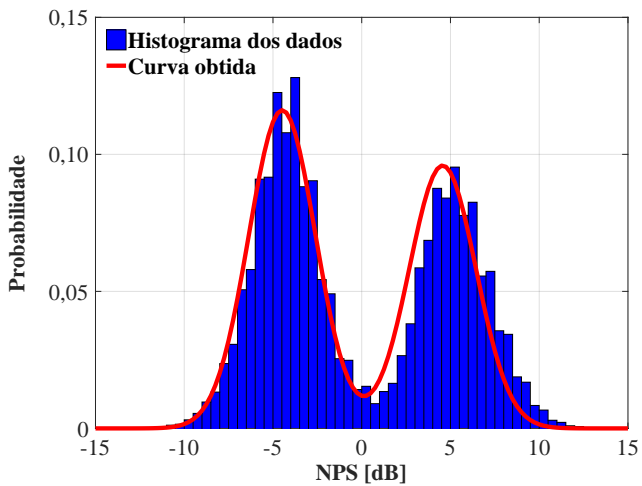


Figura 3.61: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 4000 Hz.

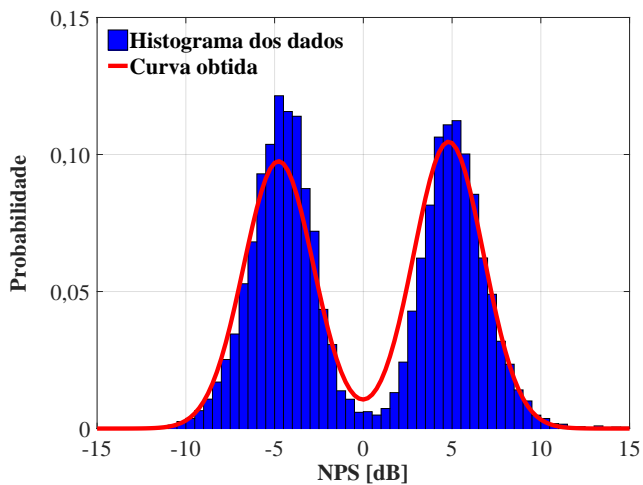


Figura 3.62: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição aberto dos ouvintes em 8000 Hz.

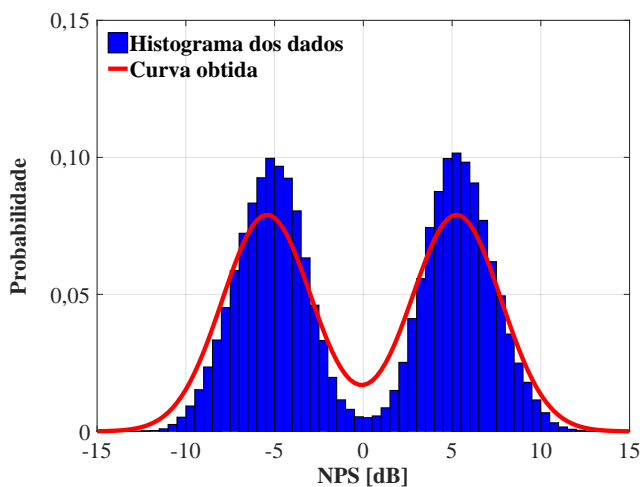


Figura 3.63: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 125 Hz.

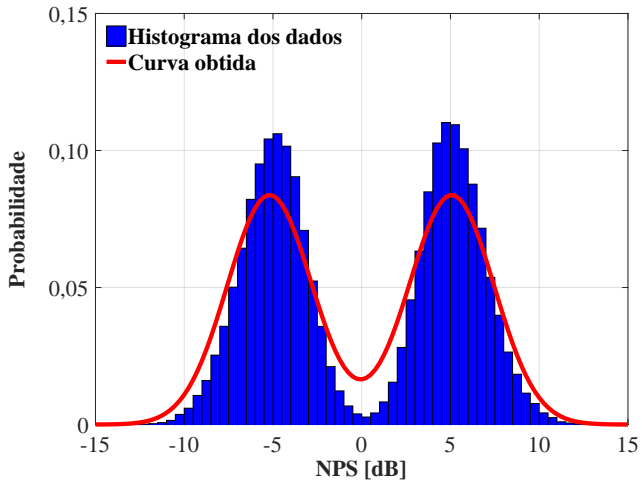


Figura 3.64: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 250 Hz.

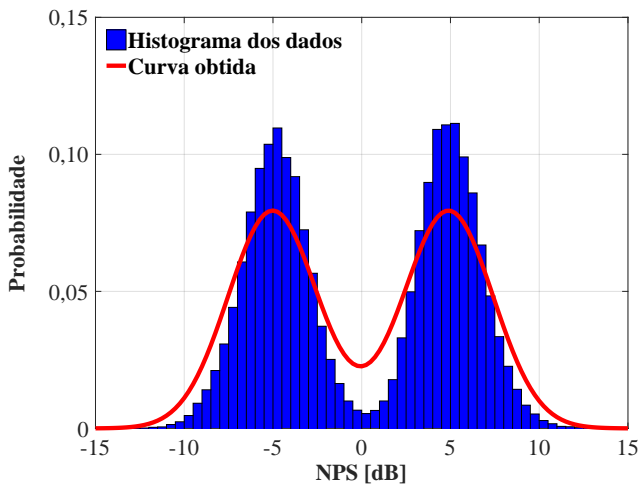


Figura 3.65: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 500 Hz.

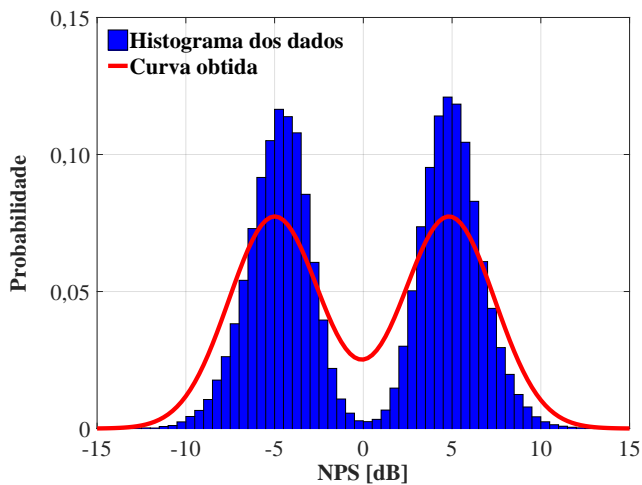


Figura 3.66: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 1000 Hz.

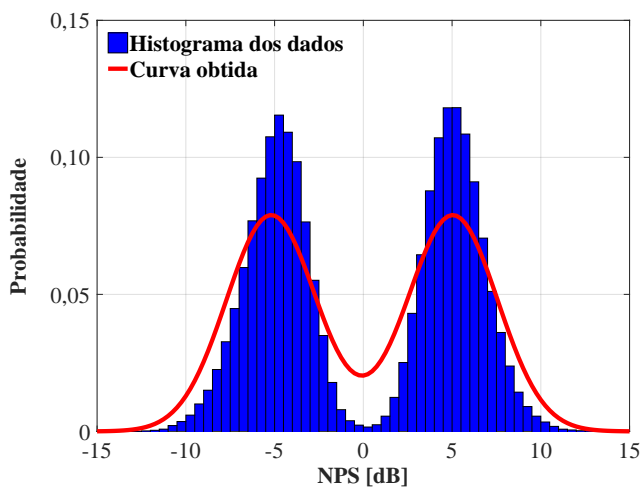


Figura 3.67: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 2000 Hz.

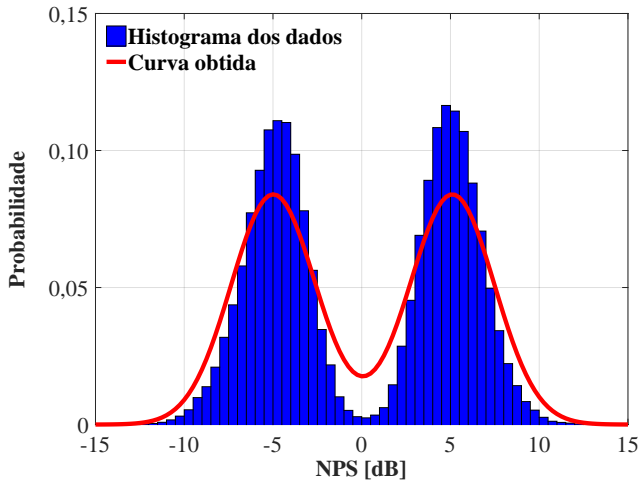


Figura 3.68: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 4000 Hz.

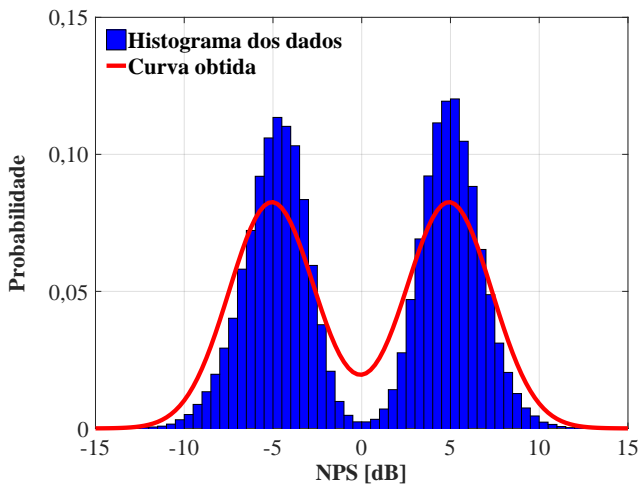


Figura 3.69: Distribuição de probabilidade da resposta do limiar de audição fechado dos ouvintes em 8000 Hz.

Os limiares de audição abertos possuem uma simetria menor entre os picos e vales e menor dispersão se comparados com as mesmas bandas de frequência dos limiares de audição fechados. A constante de proporcionalidade tende a 0,5 ($\phi \rightarrow 0,5$), uma vez que, as distribuições de probabilidade tendem a ser simétricas. As Figuras 3.56 a 3.69 mostram que as curvas da função densidade de probabilidade da distribuição bimodal representam bem os dados experimentais obtidos e podem ser utilizadas para obter a estimativa da incerteza padrão da resposta do ouvinte.

3.2.4.2 Incerteza padrão da resposta do ouvinte

A estimativa da incerteza padrão da resposta do ouvinte pode ser obtida através do desvio padrão, que pode ser estimado através da Equação (2.14), sendo a função de densidade de probabilidade da distribuição fornecida na Equação (3.75),

$$u_{Ouvinte}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - L)^2 p(x) dx. \quad (3.77)$$

A estimativa de incerteza da resposta do ouvinte é do tipo A e o número de graus de liberdade é o valor do número de inversões decrescido de 1, conforme a Equação (2.13). De acordo com Everitt e Hand (1981), a solução da Equação (3.77) é

$$u_{Ouvinte}^2 = \phi[s_V^2 + (L_V - L)^2] + (1 - \phi)[s_P^2 + (L_P - L)^2], \quad (3.78a)$$

$$\nu_{Ouvinte} = 5. \quad (3.78b)$$

A estimativa da incerteza padrão da resposta do ouvinte deve ser calculada para todas as bandas de frequência de ensaio.

3.2.5 Incerteza padrão do limiar de audição

A estimativa da incerteza padrão do limiar de audição (u_L) é composta pela parcela de incerteza do sistema de medição (u_{SM}), parâmetros do ensaio (u_{PE}), campo acústico (u_{CA}) e ouvinte ($u_{Ouvinte}$) para cada banda de frequência de ensaio, apresentados nos itens 3.2.1 ao 3.2.4. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são cor-

relacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada do limiar de audição,

$$u_L^2 = u_{SM}^2 + u_{PE}^2 + u_{CA}^2 + u_{Ouvinte}^2. \quad (3.79)$$

A Figura 3.70 apresenta a estimativa da incerteza padrão do sistema de medição de todas as bandas de frequência de ensaio. As curvas das estimativas da incerteza padrão dos equipamentos em função do NPS são apresentadas na Figura 3.44 a Figura 3.44, para cada banda de frequência de ensaio, respectivamente.

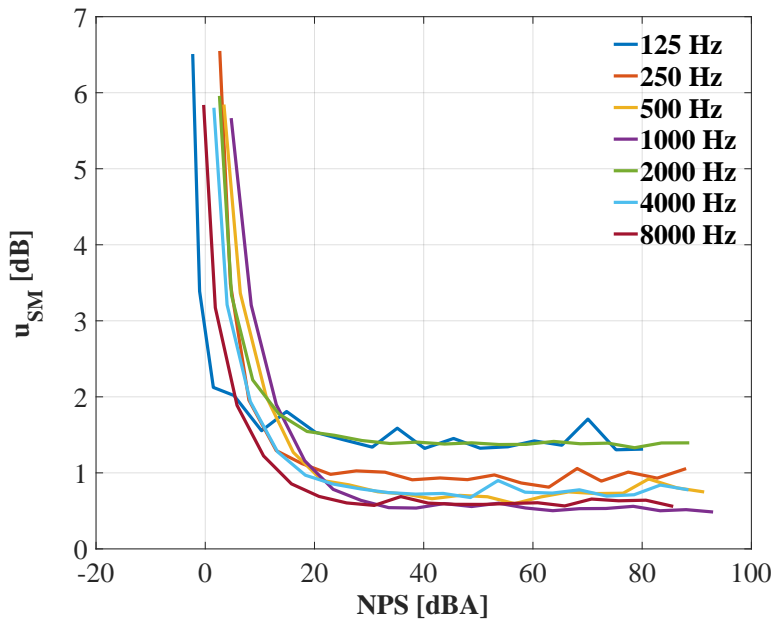


Figura 3.70: Estimativa da incerteza padrão do SM.

A estimativa de incerteza padrão do sistema de medição é próximo de 6 dB para NPS até 10 dBA, próximo de 3 dB para NPS entre 10 e 20 dBA e 1,5 dB para NPS maiores que 20 dBA. O Quadro 3.11 apresenta esses resultados e o número de graus de liberdade do sistema de medição.

Quadro 3.11: Estimativa da incerteza padrão do sistema de medição.

| Frequência [Hz] | $u_{SM} [dB]$ | | | ν_{SM} |
|-----------------|---------------|--------------------|------------|------------|
| | $NPS \leq 10$ | $10 < NPS \leq 20$ | $NPS > 20$ | |
| 125 | 6,0 | 2,0 | 1,75 | ∞ |
| 250 | 6,0 | 2,0 | 1,0 | ∞ |
| 500 | 6,0 | 2,0 | 1,0 | ∞ |
| 1000 | 6,0 | 2,0 | 1,0 | ∞ |
| 2000 | 6,0 | 2,25 | 1,5 | ∞ |
| 4000 | 6,0 | 1,5 | 1,0 | ∞ |
| 8000 | 6,0 | 1,5 | 0,5 | ∞ |

A estimativa de incerteza padrão e o número de graus de liberdade dos parâmetros do ensaio são apresentados na Equação (3.71) e as estimativas da incerteza padrão e o número de graus de liberdade do campo acústico são apresentados no Quadro 3.10. O Quadro 3.12 apresenta esses valores.

Quadro 3.12: Estimativa da incerteza padrão dos parâmetros do ensaio e campo acústico.

| Frequência [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $u_{PE} [dB]$ | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 |
| ν_{PE} | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| $u_{CA} [dB]$ | 1,89 | 1,05 | 1,01 | 0,79 | 0,66 | 1,20 | 1,01 |
| ν_{CA} | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

A estimativa da incerteza do ouvinte dependerá dos pontos de inversões obtidos durante o ensaio e é calculado conforme Equação (3.78a). O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza do limiar de audição é

$$\nu_L = \frac{u_L^4}{\frac{u_{SM}^4}{\nu_{SM}} + \frac{u_{PE}^4}{\nu_{PE}} + \frac{u_{CA}^4}{\nu_{CA}} + \frac{u_{Ouvinte}^4}{\nu_{Ouvinte}}}. \quad (3.80)$$

O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza do sistema de medição, parâmetros de ensaio e campo acústico são infinitos, logo a Equação (3.80) pode ser simplificada para

$$\nu_L = \frac{u_L^4}{u_{Ouvinte}^4} \cdot \nu_{Ouvinte}. \quad (3.81)$$

3.2.6 Contribuição das fontes de incerteza

É possível avaliar a contribuição de cada fonte de incerteza na estimativa da incerteza padrão combinada do limiar de audição. A contribuição da estimativa da incerteza padrão do sistema de ensaio, parâmetros de ensaio, campo acústico e resposta do ouvinte pode ser determinado através da seguinte equação:

$$\%u_{SM} = \frac{u_{SM}^2}{u_L^2}, \quad (3.82a)$$

$$\%u_{PE} = \frac{u_{PE}^2}{u_L^2}, \quad (3.82b)$$

$$\%u_{CA} = \frac{u_{CA}^2}{u_L^2}, \quad (3.82c)$$

$$\%u_{Ouvinte} = \frac{u_{Ouvinte}^2}{u_L^2}. \quad (3.82d)$$

Com isto é possível avaliar qual(is) fonte(s) de incerteza possui(em) maior(es) contribuição para a estimativa da incerteza padrão combinada do limiar de audição.

3.3 DETERMINAÇÃO DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA ATENUAÇÃO DO ENSAIO

A atenuação de ruído de protetores auditivos é a diferença entre o limiar de audição fechado (com o protetor auditivo) e aberto (sem o protetor auditivo), para cada banda de frequência de ensaio. Dependendo da norma de ensaio utilizada, o ouvinte pode realizar mais de uma série de medição¹⁴,

$$A_{i,j} = LF_{i,j} - LA_{i,j}. \quad (3.83)$$

Sendo $A_{i,j}$ a j -ésima atenuação do i -ésimo ouvinte, $LF_{i,j}$ e $LA_{i,j}$ o j -ésimo limiar de audição fechado e aberto, respectivamente, do i -ésimo ouvinte. A atenuação média do i -ésimo ouvinte é a média aritmética das j -ésimas atenuações daquele ouvinte para cada banda de frequência

¹⁴Uma série de medição é composta por um conjunto de limiar de audição fechado e aberto.

de ensaio,

$$A_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M A_{i,j}. \quad (3.84)$$

Sendo A_i a atenuação média do i -ésimo ouvinte. A atenuação de um ensaio é a média aritmética das atenuações médias de cada ouvinte (A_i) para cada banda de frequência de ensaio,

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i. \quad (3.85)$$

Sendo A a atenuação do ensaio, para cada banda de frequência de ensaio. Além da atenuação do ensaio, o desvio padrão de cada banda de frequência de ensaio é calculado, conforme,

$$s = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - A)^2}. \quad (3.86)$$

3.4 AVALIAÇÃO METROLÓGICA DA ATENUAÇÃO DO ENSAIO

A estimativa da incerteza padrão da atenuação do ensaio é composta pela parcela da estimativa de incerteza da atenuação média de um grupo de ouvintes advinda das estimativas das incertezas dos limiares de audição dos ouvintes e a estimativa da incerteza padrão da média da atenuação advinda do desvio padrão das atenuações médias dos ouvintes. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (3.87) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada da atenuação média do ensaio,

$$u_{\text{Ensaio}}^2 = u_A^2 + u_s^2 \quad (3.87)$$

3.4.1 Incerteza padrão da atenuação média dos ouvintes

Conforme explicado na Seção 3.3, a atenuação é a diferença entre os limiares de audição fechado e aberto. Desta forma, a atenuação é considerada uma medição indireta, pois não é obtida diretamente de uma medição, mas sim da diferença entre duas medições. Com isso,

é necessário avaliar a correlação existente entre os limiares de audição fechado e aberto conforme apresentando no item 2.4.8. A estimativa da incerteza da atenuação, para cada banda de frequência de ensaio, é obtida através da Equação (3.83) aplicada a Equação (2.24),

$$u_{A_{i,j}}^2 = u_{LF_{i,j}}^2 + u_{LA_{i,j}}^2 - 2u_{LF_{i,j}}u_{LA_{i,j}}r(LF_{i,j}, LA_{i,j}). \quad (3.88)$$

Sendo $u_{A_{i,j}}$ a estimativa da incerteza padrão da j -ésima atenuação do i -ésimo ouvinte, $u_{LF_{i,j}}$ e $u_{LA_{i,j}}$ a estimativa da incerteza padrão do j -ésimo limiar de audição fechado e aberto, respectivamente, do i -ésimo ouvinte e $r(LF_{i,j}, LA_{i,j})$ o coeficiente de correlação entre o limiar de audição fechado e aberto da j -ésima atenuação do i -ésimo ouvinte. O Quadro 3.13 apresenta o coeficiente de correlação entre os limiares de audição aberto e fechado para cada banda de frequência de ensaio, calculado através da Equação (2.25) e foram utilizados 25.556 pares de limiares de audição fechado e aberto.

Quadro 3.13: Coeficiente de correlação entre os limiares de audição fechado e aberto.

| Frequência [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $r(LF_{i,j}, LA_{i,j})$ | 0,56 | 0,60 | 0,59 | 0,51 | 0,56 | 0,50 | 0,51 |

A partir do Quadro 3.13 é possível afirmar que existe uma correlação positiva de intensidade moderada entre os limiares de audição fechado e aberto. Essa correlação pode ser explicada pelo fato de que em geral, os limiares de audição fechados serão sempre maiores que os limiares de audição abertos, além disso, quando o limiar de audição aberto aumenta, o limiar de audição fechado também aumentará na mesma proporção deslocado (*offset*) pelo valor de atenuação do protetor auditivo. A mesma sistemática se aplica quando o limiar de audição aberto diminui.

O coeficiente de correlação entre os limiares de audição fechados e abertos pode ser aproximado em média para 0,5 para todas as bandas de frequência de ensaio, dessa forma a estimativa da incerteza padrão da atenuação é

$$u_{A_{i,j}}^2 = u_{LF_{i,j}}^2 + u_{LA_{i,j}}^2 - u_{LF_{i,j}}u_{LA_{i,j}}. \quad (3.89)$$

O número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da j -ésima atenuação do i -ésimo ouvinte, para cada banda de frequência

do ensaio, é obtido utilizando a Equação (2.21):

$$\nu_{A_{i,j}} = \frac{u_{A_{i,j}}^4}{\frac{(u_{LF_{i,j}}^2 + 0, 5u_{LF_{i,j}}u_{LA_{i,j}})^2}{\nu_{LF_{i,j}}} + \frac{(u_{LA_{i,j}}^2 + 0, 5u_{LF_{i,j}}u_{LA_{i,j}})^2}{\nu_{LA_{i,j}}}}. \quad (3.90)$$

Sendo $\nu_{A_{i,j}}$ o número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da j -ésima atenuação do i -ésimo ouvinte, $\nu_{LF_{i,j}}$ e $\nu_{LA_{i,j}}$ o número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão do j -ésimo limiar de audição fechado e aberto, respectivamente, do i -ésimo ouvinte.

A estimativa de incerteza da atenuação média do ouvinte (A_i) é obtida a partir das estimativas de incertezas das atenuações individuais do ouvinte ($A_{i,j}$) para cada banda de frequência de ensaio. Utiliza-se a Equação (2.15) devido à existência de correlação entre as atenuações de um mesmo ouvinte. A estimativa da incerteza da atenuação média do ouvinte é obtida através da Equação (3.84) aplicada à Equação (2.24),

$$\overline{u_{A_i}^2} = \sum_{j=1}^M \left(\frac{1}{M} u_{A_{i,j}} \right)^2 + 2 \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{k=j+1}^M \left[\frac{1}{M^2} u_{A_{i,j}} u_{A_{i,k}} r(A_{i,j}, A_{i,k}) \right]. \quad (3.91)$$

Sendo $\overline{u_{A_i}}$ a estimativa da incerteza padrão da atenuação média do i -ésimo ouvinte, $u_{A_{i,j}}$ a estimativa da incerteza padrão da j -ésima atenuação do i -ésimo ouvinte, $r(A_{i,j}, A_{i,k})$ o coeficiente de correlação entre as atenuações do i -ésimo ouvinte e M o número de atenuações do i -ésimo ouvinte. No caso da ANSI S12.6 (2016), para cada ouvinte são obtidas duas atenuações para cada banda de frequência de ensaio, logo a Equação (3.91) pode ser simplificada para:

$$\overline{u_{A_i}^2} = \frac{1}{22} [u_{A_{i,A}}^2 + u_{A_{i,B}}^2 + 2u_{A_{i,A}} u_{A_{i,B}} r(A_{i,A}, A_{i,B})]. \quad (3.92)$$

O Quadro 3.14 apresenta o coeficiente de correlação entre as duas atenuações do ouvinte, para cada banda de frequência de ensaio, calculado através da Equação (2.25) e foram utilizados 12.778 pares de atenuações ($A_{i,A}, A_{i,B}$).

Quadro 3.14: Coeficiente de correlação entre as atenuações dos ouvintes.

| Frequência [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $r(A_{i,A}, A_{i,B})$ | 0,76 | 0,75 | 0,77 | 0,82 | 0,76 | 0,77 | 0,76 |

Através do Quadro 3.14 é possível afirmar que existe uma correlação positiva com intensidade forte entre as atenuações de um mesmo ouvinte em todas as bandas de frequência de ensaio. Albertazzi e Sousa (2008) citam que duas variáveis podem ser consideradas totalmente correlacionadas quando o coeficiente de correlação entre elas for superior a 0,8. Como o valor da correlação da atenuação do ouvinte é próximo a 0,8 para todas as bandas de frequência de ensaio, será considerado que as atenuações de um mesmo ouvinte são totalmente correlacionadas, $r(A_{i,A}, A_{i,B}) \rightarrow 1$, logo,

$$u_{A_i} = \frac{1}{2}(u_{A_{i,A}} + u_{A_{i,B}}). \quad (3.93)$$

O número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da atenuação média do i -ésimo ouvinte, para cada banda de frequência do ensaio, é obtido utilizando a Equação (2.21),

$$\nu_{A_i} = \frac{u_{A_i}^4}{\sum_{i=1}^M \frac{\left[\sum_{j=1}^M (u_{A_{i,j}} u_{A_{i,k}}) / M^2 \right]^2}{\nu_i}}. \quad (3.94)$$

Sendo ν_{A_i} o número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da atenuação média do i -ésimo ouvinte e $\nu_{A_{i,j}}$ o número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da j -ésima atenuação do i -ésimo ouvinte. No caso da ANSI S12.6 (2016), em que para cada ouvinte são obtidas duas atenuações, o número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da atenuação média do i -ésimo ouvinte, para cada banda de frequência de ensaio, é

$$\nu_{A_i} = \frac{u_{A_i}^4}{\frac{[(u_{A_{i,A}}^2 + u_{A_{i,A}} u_{A_{i,B}}) / 2]^2}{\nu_{A_{i,A}}} + \frac{[(u_{A_{i,B}}^2 + u_{A_{i,A}} u_{A_{i,B}}) / 2]^2}{\nu_{A_{i,B}}}}. \quad (3.95)$$

Sendo $\nu_{A_{i,A}}$ e $\nu_{A_{i,B}}$ o número de graus de liberdade da estimativa

da incerteza padrão da primeira e da segunda atenuação, respectivamente, do i -ésimo ouvinte.

A estimativa da incerteza da atenuação média de um grupo de ouvintes (A) é obtida a partir da estimativa de incerteza das atenuações médias dos ouvintes (A_i), para cada banda de frequência do ensaio, novamente utiliza-se a Equação (2.15) devido a existência de correlação entre as atenuações médias dos ouvintes. A estimativa da incerteza da atenuação de um grupo de ouvintes é obtida através da Equação (3.85) aplicada à Equação (2.24),

$$u_A^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{N} u_{A_i} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N \left[\frac{1}{N^2} u_{A_i} u_{A_k} r(A_i, A_k) \right]. \quad (3.96)$$

Sendo u_A a estimativa da incerteza padrão da atenuação de um grupo de ouvintes, u_{A_i} a estimativa da incerteza padrão da atenuação média do i -ésimo ouvinte, $r(A_i, A_k)$ o coeficiente de correlação entre as atenuações médias dos ouvintes e N o número de ouvinte. A correlação existente entre as atenuações médias dos ouvintes podem ser consideradas totalmente não correlacionadas, $r(A_i, A_k) \rightarrow 0$, dessa forma,

$$u_A^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N u_{A_i}^2. \quad (3.97)$$

O número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da atenuação de um grupo de ouvintes, para cada banda de frequência de ensaio, é obtido utilizando a Equação (2.20):

$$\nu_A = \frac{u_{A_i}^4}{\sum_{i=1}^N \frac{(u_{A_i}/N)^4}{\nu_{A_i}}}. \quad (3.98)$$

Sendo ν_A o número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da atenuação de um grupo de ouvintes.

3.4.2 Incerteza padrão da média da atenuação

A estimativa de incerteza padrão da média da atenuação é obtida através da Equação (2.12), conforme,

$$u_s = \frac{s}{\sqrt{N}}. \quad (3.99)$$

Sendo u_s a estimativa da incerteza padrão da média da atenuação, s o desvio padrão calculado conforme a Equação (3.86) e N o número de ouvintes. O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza padrão da média, para cada banda de frequência de ensaio é:

$$\nu_s = N - 1. \quad (3.100)$$

3.4.3 Incerteza padrão da atenuação do ensaio

A estimativa da incerteza da atenuação do ensaio é obtida através da Equação (3.97) e (3.99) aplicada na Equação (3.87), para cada banda de frequência de ensaio,

$$u_{\text{Ensaio}}^2 = u_A^2 + u_s^2. \quad (3.101)$$

Sendo u_{Ensaio} a estimativa da incerteza padrão do ensaio. O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza padrão do ensaio, para cada banda de frequência de ensaio é obtido utilizando a Equação (2.20):

$$\nu_{\text{Ensaio}} = \frac{u_{\text{Ensaio}}^4}{\frac{u_A^4}{\nu_A} + \frac{u_s^4}{\nu_s}}. \quad (3.102)$$

Sendo ν_A o número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da atenuação do ensaio.

3.4.4 Incerteza expandida da atenuação do ensaio

A incerteza expandida da atenuação do ensaio, para cada banda de frequência de ensaio, é obtida através da Equação (2.22) e do valor da incerteza padrão do ensaio e o respectivo coeficiente t de *Student*, de acordo com o número de graus de liberdade (Quadro A.1).

$$U_{\text{Ensaio}} = t u_{\text{Ensaio}}. \quad (3.103)$$

3.5 DETERMINAÇÃO DO \tilde{NRR}_{SF}

Conforme apresentado no item 2.2.6.3, o Nível de Redução de Ruído com colocação do protetor auditivo pelo sujeito de teste (\tilde{NRR}_{SF}), é calculado a partir do *Single Number Rating* (SNR) com um nível de proteção¹⁵ de 84%. O SNR é estimado a partir dos *assumed protection values* (APV)¹⁶ em banda de frequência de 1/1 oitava de 125 Hz a 8 kHz e de um ruído rosa com valor global de 100 dBC conforme apresenta Gerges (2003),

$$\tilde{NRR}_{SF} = 100 - 10 \log_{10} \left(\sum_{f=125\text{Hz}}^{8000\text{Hz}} 10^{\frac{L_{af} - APV_{84\%f}}{10}} \right) - 5. \quad (3.104)$$

O APV é obtido a partir da subtração do nível de proteção e desvio padrão da atenuação do ensaio, para cada banda de frequência do ensaio, conforme

$$APV_f = A_f - \alpha s_f. \quad (3.105)$$

Sendo A a atenuação do ensaio, α o coeficiente do nível de proteção e s o desvio padrão para cada banda de frequência de ensaio. No caso do \tilde{NRR}_{SF} , conforme o Quadro 2.2, para um nível de proteção de 84 % o valor de α é 1, logo a Equação (3.105) torna-se,

$$APV_{84\%f} = A_f - s_f. \quad (3.106)$$

O L_{af} é o NPS de um ruído rosa com valor total (global) de 100 dBC, sendo 91,5 dBC para cada banda de frequência. Este valor é convertido em dBA para cada banda de frequência, conforme Quadro 3.15.

Quadro 3.15: Ruído rosa em dBC e dBA.

| Frequência [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|------------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído Rosa [dBC] | 91,5 | 91,5 | 91,5 | 91,5 | 91,5 | 91,5 | 91,5 |
| Correção [dB] | -16,1 | -8,6 | -3,2 | 0,0 | 1,2 | 1,0 | -1,1 |
| L_{af} [dBA] | 75,4 | 82,9 | 88,3 | 91,5 | 92,7 | 92,5 | 90,4 |

Este valor do \tilde{NRR}_{SF} significa que 84% da população de usuários

¹⁵Percentagem da população que pode ser protegida.

¹⁶Valores assumidos de proteção, em tradução livre.

está protegida, assumindo uma distribuição de probabilidade normal para a atenuação. Conforme apresenta a Figura 3.71, apenas a cauda esquerda com 1 desvio padrão da população de usuários não está protegida.

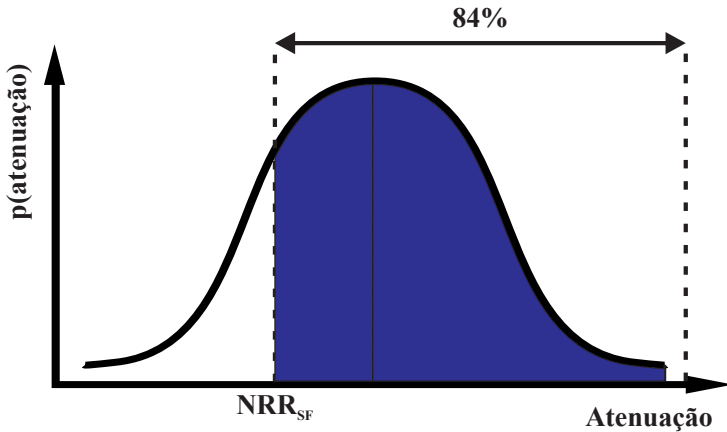


Figura 3.71: NRR_{SF} com nível de proteção de 84%.

3.6 AVALIAÇÃO METROLÓGICA DO NRR_{SF}

O NRR_{SF} é um valor estatístico em que se considera que a atenuação possua uma distribuição de probabilidade normal para a população de usuários. Conforme apresentado na seção 3.5, apesar do NRR_{SF} ser definido para um nível de proteção de 84 % da população de usuários, outros níveis de proteção podem ser utilizados.

3.6.1 Incerteza padrão do NRR_{SF}

A estimativa da incerteza padrão do NRR_{SF} é composta pela atenuação e estimativa da incerteza padrão de cada banda de frequência de ensaio, conforme apresentado nos itens 3.3 e 3.4.3, respectivamente. A incerteza padrão do NRR_{SF} pode ser estimada pela diferença entre o NRR_{SF} calculado com a estimativa da incerteza padrão e o calculado sem a estimativa da incerteza padrão, conforme apresenta a Figura 3.72.

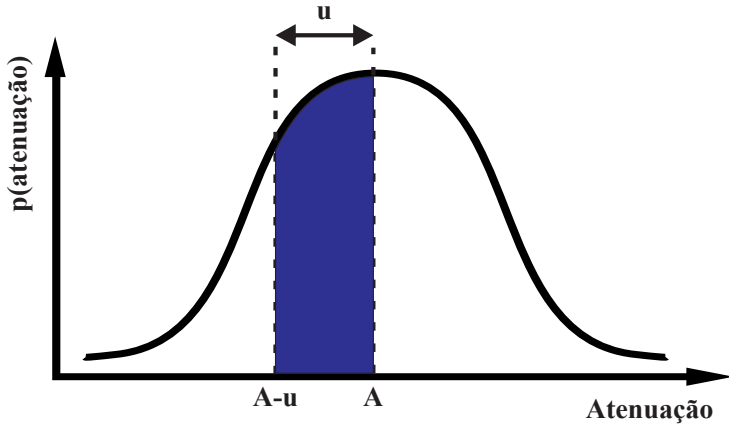


Figura 3.72: Estimativa da incerteza padrão do NRR_{SF} .

Na Equação (3.105) substitui-se o desvio padrão pela estimativa da incerteza padrão, para cada banda de frequência de ensaio, desta forma:

$$\text{APV}_f = A_f - \alpha u_f. \quad (3.107)$$

A incerteza padrão do NRR_{SF} é estimada por

$$\begin{aligned} u_{\text{NRR}_{\text{SF}}} &= 100 - 10 \log_{10} \left(\sum_{f=125\text{Hz}}^{8000\text{Hz}} 10^{\frac{\text{Laf}_f - A_f}{10}} \right) - 5 - \dots \\ &\dots - \left[100 - 10 \log_{10} \left(\sum_{f=125\text{Hz}}^{8000\text{Hz}} 10^{\frac{\text{Laf}_f - (A_f - u_f)}{10}} \right) - 5 \right]. \end{aligned} \quad (3.108)$$

Que pode ser simplificada para:

$$u_{\text{NRR}_{\text{SF}}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{f=125\text{Hz}}^{8000\text{Hz}} 10^{\frac{\text{Laf}_f - (A_f - u_f)}{10}}}{\sum_{f=125\text{Hz}}^{8000\text{Hz}} 10^{\frac{\text{Laf}_f - A_f}{10}}} \right). \quad (3.109)$$

O número de graus de liberdade da estimativa de incerteza do

NRR_{SF} é obtido utilizando a Equação (2.20),

$$\nu_{\text{NRR}_{\text{SF}}} = \frac{u_{\text{NRR}_{\text{SF}}}^4}{8000\text{Hz} \sum_{f=125\text{Hz}} \frac{c_f^4 u_f^4}{\nu_f}}. \quad (3.110)$$

Sendo c_f o coeficiente de sensibilidade da f-ésima atenuação, obtido da derivada parcial em relação a f-ésima atenuação, ou seja,

$$c_f = \frac{10^{\frac{\text{Laf} - (A_f - s_f)}{10}}}{8000\text{Hz} \sum_{f=125\text{Hz}} 10^{\frac{\text{Laf} - (A_f - s_f)}{10}}}. \quad (3.111)$$

3.6.2 Incerteza expandida do NRR_{SF}

A incerteza expandida do NRR_{SF} é obtida através da Equação (2.22) e do valor da incerteza padrão do NRR_{SF} e o respectivo coeficiente t de *Student*, de acordo com o número de graus de liberdade (Quadro A.1).

$$U_{\text{NRR}_{\text{SF}}} = t u_{\text{NRR}_{\text{SF}}}. \quad (3.112)$$

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta um estudo de caso utilizando toda a metodologia desenvolvida no Capítulo 3, ilustrando passo a passo todo o procedimento de cálculo da atenuação de ruído e estimativa da incerteza da atenuação de ruído, além do cálculo do NRR_{SF} e da estimativa da incerteza do NRR_{SF} . Posteriormente é apresentada a avaliação da incerteza da atenuação do ensaio de 5 modelos de protetores auditivos tipo concha, concha acoplável ao capacete de segurança e plugue. Por fim, uma análise de sensibilidade do valor do NRR_{SF} e da estimativa da incerteza do NRR_{SF} em função do número de ouvintes é apresentada.

4.1 ESTUDO DE CASO

Para exemplificar toda avaliação metrológica desenvolvida no Capítulo 3, é apresentado o cálculo da incerteza do ensaio de atenuação de ruído de um protetor auditivo do tipo concha, passo a passo. O protetor auditivo do tipo concha foi escolhido com a finalidade de reduzir o número de dados, uma vez que são utilizados 10 ouvintes ao invés de 20, como nos protetores auditivos do tipo concha acoplável ao capacete de segurança ou plugue. O procedimento de cálculo é o mesmo para todos os tipos de protetores auditivos, a única diferença é a quantidade de dados a serem utilizados, sendo que este depende do número de ouvintes, quanto mais ouvintes mais são os dados a serem utilizados.

4.1.1 Determinação da atenuação e desvio padrão do ensaio

O cálculo da média e desvio padrão da atenuação do ensaio é realizado conforme apresentado na seção 3.3. Para exemplificar os procedimentos, será apresentado o cálculo dos parâmetros para um ouvinte e em seguida apresentado o resultado dos demais ouvintes.

Primeiramente é determinado o limiar de audição fechado e aberto conforme a Equação (3.1). A Figura 4.1 apresenta o traço do limiar de audição aberto da série B do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz.

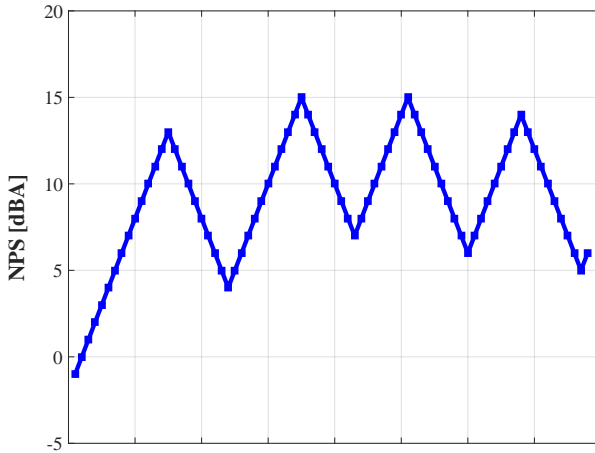


Figura 4.1: Traço do limiar de audição aberto da série B do ouvinte 5.

Desconsiderando a primeira e última inversão, têm-se o limiar de audição dado por:

$$L_{LA,5,B}(1 \text{ kHz}) = \frac{4 + 15 + 7 + 15 + 6 + 14}{6} = 10,17 \text{ dB.} \quad (4.1)$$

Este procedimento é realizado para todos os limiares de audição fechados e abertos de todos os ouvintes para cada banda de frequência de ensaio. O Quadro 4.1 apresenta o limiar de audição fechado (LF) e aberto (LA) de cada série de medição (S) de cada ouvinte (O) para cada banda de frequência de ensaio.

O segundo passo é realizar o cálculo da atenuação de cada série de medição para cada ouvinte conforme a Equação (3.83), utilizando os valores do limiar de audição fechado e aberto para cada banda de frequência de ensaio. A atenuação da série B do ouvinte 5 em 1 kHz é calculada por:

$$A_{5,B}(1 \text{ kHz}) = 34,67 - 10,17 = 24,50 \text{ dB.} \quad (4.2)$$

O Quadro 4.2 apresenta a atenuação das séries (S) de cada ouvinte (O) para cada banda de frequência de ensaio.

Quadro 4.1: Limiares de audição em dB.

| O | S | L | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|---|----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | A | LF | 20,33 | 27,50 | 36,50 | 42,17 | 49,00 | 36,50 | 48,17 |
| | | LA | 16,00 | 13,67 | 12,33 | 15,50 | 15,83 | 7,83 | 17,67 |
| | B | LF | 21,00 | 26,83 | 36,00 | 40,17 | 43,00 | 34,50 | 46,67 |
| | | LA | 13,83 | 11,17 | 8,33 | 10,50 | 13,33 | 3,17 | 15,67 |
| 2 | A | LF | 27,67 | 26,83 | 35,67 | 39,00 | 44,00 | 37,33 | 43,50 |
| | | LA | 15,50 | 10,00 | 8,00 | 8,83 | 11,17 | -0,83 | 7,17 |
| | B | LF | 23,00 | 23,00 | 31,33 | 35,00 | 37,83 | 30,83 | 41,00 |
| | | LA | 11,33 | 8,67 | 5,00 | 7,33 | 9,83 | 2,17 | 7,50 |
| 3 | A | LF | 18,83 | 23,50 | 31,17 | 34,50 | 35,00 | 32,50 | 37,67 |
| | | LA | 8,33 | 12,33 | 6,83 | 6,50 | 1,83 | -3,50 | 4,00 |
| | B | LF | 20,00 | 26,67 | 31,67 | 33,67 | 33,83 | 32,00 | 37,67 |
| | | LA | 9,83 | 11,00 | 5,50 | 7,83 | 4,33 | 0,50 | 1,00 |
| 4 | A | LF | 22,17 | 33,33 | 43,50 | 42,33 | 45,00 | 38,33 | 45,50 |
| | | LA | 12,67 | 15,83 | 17,17 | 18,33 | 15,83 | 8,33 | 13,50 |
| | B | LF | 24,17 | 30,50 | 43,67 | 43,50 | 49,17 | 39,83 | 42,33 |
| | | LA | 12,50 | 14,00 | 17,00 | 14,17 | 14,17 | 3,83 | 9,50 |
| 5 | A | LF | 24,50 | 29,67 | 36,50 | 31,83 | 40,00 | 32,83 | 33,83 |
| | | LA | 15,50 | 12,83 | 15,50 | 8,17 | 9,33 | 2,00 | 3,67 |
| | B | LF | 25,83 | 29,83 | 37,17 | 34,67 | 41,33 | 30,83 | 35,00 |
| | | LA | 12,33 | 12,50 | 12,17 | 10,17 | 10,17 | -0,50 | 5,33 |
| 6 | A | LF | 29,17 | 30,83 | 38,83 | 36,33 | 43,33 | 41,83 | 37,33 |
| | | LA | 19,00 | 15,83 | 14,00 | 11,50 | 11,50 | 8,67 | 6,67 |
| | B | LF | 30,50 | 30,00 | 38,33 | 36,00 | 40,33 | 42,67 | 42,33 |
| | | LA | 20,83 | 18,83 | 12,67 | 13,83 | 11,50 | 9,83 | 6,17 |
| 7 | A | LF | 19,00 | 27,33 | 37,83 | 40,00 | 48,50 | 31,83 | 34,33 |
| | | LA | 8,83 | 11,00 | 10,33 | 14,33 | 14,33 | -0,67 | 1,33 |
| | B | LF | 18,83 | 28,00 | 39,67 | 38,67 | 51,00 | 31,33 | 40,17 |
| | | LA | 10,33 | 10,67 | 11,67 | 13,50 | 15,17 | 0,17 | 2,83 |
| 8 | A | LF | 46,83 | 48,33 | 50,17 | 50,83 | 48,83 | 47,33 | 49,50 |
| | | LA | 22,33 | 23,17 | 22,50 | 23,00 | 21,67 | 17,33 | 20,33 |
| | B | LF | 45,17 | 48,17 | 50,50 | 46,50 | 46,00 | 43,83 | 50,33 |
| | | LA | 27,50 | 26,33 | 23,67 | 17,67 | 18,50 | 18,33 | 22,50 |
| 9 | A | LF | 23,00 | 26,00 | 29,67 | 35,33 | 45,50 | 36,00 | 38,33 |
| | | LA | 12,17 | 13,00 | 7,67 | 7,00 | 11,67 | 3,83 | 11,50 |
| | B | LF | 23,50 | 23,83 | 25,67 | 36,00 | 41,17 | 39,17 | 40,00 |
| | | LA | 13,83 | 14,67 | 7,33 | 10,00 | 12,67 | 4,83 | 11,17 |
| 10 | A | LF | 20,33 | 27,83 | 33,00 | 39,00 | 44,00 | 34,50 | 33,33 |
| | | LA | 12,50 | 10,33 | 7,50 | 7,33 | 11,67 | -0,83 | 1,00 |
| | B | LF | 23,33 | 26,33 | 36,00 | 37,83 | 43,33 | 38,67 | 40,33 |
| | | LA | 16,50 | 8,17 | 7,50 | 8,67 | 8,83 | -2,83 | 0,33 |

Quadro 4.2: Atenuação das séries de cada ouvinte em dB.

| O | S | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|---|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | A | 4,33 | 13,83 | 24,17 | 26,67 | 33,17 | 28,67 | 30,50 |
| | B | 7,17 | 15,66 | 27,67 | 29,67 | 29,67 | 31,33 | 31,00 |
| 2 | A | 12,17 | 16,83 | 27,67 | 30,17 | 32,83 | 38,16 | 36,33 |
| | B | 11,67 | 14,33 | 26,33 | 27,67 | 28,00 | 28,66 | 33,50 |
| 3 | A | 10,50 | 11,17 | 24,34 | 28,00 | 33,17 | 36,00 | 33,67 |
| | B | 10,17 | 15,67 | 26,17 | 25,84 | 29,50 | 31,50 | 36,67 |
| 4 | A | 9,50 | 17,50 | 26,33 | 24,00 | 29,17 | 30,00 | 32,00 |
| | B | 11,67 | 16,50 | 26,67 | 29,33 | 35,00 | 36,00 | 32,83 |
| 5 | A | 9,00 | 16,84 | 21,00 | 23,66 | 30,67 | 30,83 | 30,16 |
| | B | 13,50 | 17,33 | 25,00 | 24,50 | 31,16 | 31,33 | 29,67 |
| 6 | A | 10,17 | 15,00 | 24,83 | 24,83 | 31,83 | 33,16 | 30,66 |
| | B | 9,67 | 11,17 | 25,66 | 22,17 | 28,83 | 32,84 | 36,16 |
| 7 | A | 10,17 | 16,33 | 27,50 | 25,67 | 34,17 | 32,50 | 33,00 |
| | B | 8,50 | 17,33 | 28,00 | 25,17 | 35,83 | 31,16 | 37,34 |
| 8 | A | 24,50 | 25,16 | 27,67 | 27,83 | 27,16 | 30,00 | 29,17 |
| | B | 17,67 | 21,84 | 26,83 | 28,83 | 27,50 | 25,50 | 27,83 |
| 9 | A | 10,83 | 13,00 | 22,00 | 28,33 | 33,83 | 32,17 | 26,83 |
| | B | 9,67 | 9,16 | 18,34 | 26,00 | 28,50 | 34,34 | 28,83 |
| 10 | A | 7,83 | 17,50 | 25,50 | 31,67 | 32,33 | 35,33 | 32,33 |
| | B | 6,83 | 18,16 | 28,50 | 29,16 | 34,50 | 41,50 | 40,00 |

O terceiro passo é calcular a atenuação média de cada ouvinte para cada banda de frequência de ensaio conforme a Equação (3.84), utilizando os dados do Quadro 4.2. A atenuação do ouvinte 5 em 1 kHz é calculada por:

$$A_5(1 \text{ kHz}) = \frac{23,66 + 24,50}{2} = 24,08 \text{ dB.} \quad (4.3)$$

O Quadro 4.3 apresenta a atenuação média de cada ouvinte para cada banda de frequência de ensaio.

O quarto e último passo é calcular a atenuação e o desvio padrão da atenuação do ensaio para cada banda de frequência de ensaio conforme a Equação (3.85) e Equação (3.86), respectivamente. A atenuação do ensaio em 1 kHz é calculada por:

$$A(1 \text{ kHz}) = \frac{28,17 + 28,92 + \dots + 27,17 + 30,42}{10} = 26,96 \text{ dB.} \quad (4.4)$$

O desvio padrão da atenuação do ensaio em 1 kHz é calculado por:

$$s(1 \text{ kHz}) = \frac{1}{\sqrt{9}} \cdot \sqrt{(28,17 - 26,96)^2 + \dots + (30,42 - 26,96)^2} = 2,16 \text{ dB.} \quad (4.5)$$

O Quadro 4.4 apresenta a atenuação (A) e desvio padrão (s) do ensaio para cada banda de frequência de ensaio.

Quadro 4.3: Atenuação de cada ouvinte em dB.

| O | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | 5,75 | 14,75 | 25,92 | 28,17 | 31,42 | 30,00 | 30,75 |
| 2 | 11,92 | 15,58 | 27,00 | 28,92 | 30,42 | 33,41 | 34,92 |
| 3 | 10,34 | 13,42 | 25,26 | 26,92 | 31,34 | 33,75 | 35,17 |
| 4 | 10,59 | 17,00 | 26,50 | 26,67 | 32,09 | 33,00 | 32,42 |
| 5 | 11,25 | 17,09 | 23,00 | 24,08 | 30,92 | 31,08 | 29,92 |
| 6 | 9,92 | 13,09 | 25,25 | 23,50 | 30,33 | 33,00 | 33,41 |
| 7 | 9,34 | 16,83 | 27,75 | 25,42 | 35,00 | 31,83 | 35,17 |
| 8 | 21,09 | 23,50 | 27,25 | 28,33 | 27,33 | 27,75 | 28,50 |
| 9 | 10,25 | 11,08 | 20,17 | 27,17 | 31,17 | 33,26 | 27,83 |
| 10 | 7,33 | 17,83 | 27,00 | 30,42 | 33,42 | 38,42 | 36,17 |

Quadro 4.4: Atenuação e desvio padrão do ensaio em dB.

| Frequência [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | 10,78 | 16,02 | 25,51 | 26,96 | 31,34 | 32,55 | 32,42 |
| s | 4,06 | 3,39 | 2,32 | 2,16 | 2,01 | 2,78 | 3,02 |

4.1.2 Determinação da incerteza da atenuação do ensaio

O cálculo da estimativa de incerteza da atenuação do ensaio é realizado conforme apresentado na seção 3.4. Primeiramente é realizado o cálculo da estimativa de incerteza do limiar de audição fechado e aberto de cada série de medição de cada ouvinte conforme a Equação (3.79), utilizando as estimativas de incerteza do sistema de medição, parâmetros de ensaio, campo acústico e resposta do ouvinte para cada banda de frequência de ensaio.

O Quadro 4.5 apresenta a incerteza padrão do sistema de medição que é estimada utilizando os valores apresentados no Quadro 3.11 e os limiares de audição do Quadro 4.1.

O Quadro 4.6 apresenta a estimativa da incerteza padrão dos parâmetros do ensaio (PE) e campo acústico (CA) para cada banda de frequência de ensaio, conforme apresentado no Quadro 3.12.

Quadro 4.6: Incerteza padrão dos PE e CA em dB.

| Frequência [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| u_{PE} | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 |
| u_{CA} | 1,89 | 1,05 | 1,01 | 0,79 | 0,66 | 1,20 | 1,01 |

A incerteza da resposta do ouvinte é estimada utilizando a Equação (3.78a) e os valores das inversões do traço do limiar de audição apresentado na Figura 4.1. A Equação (4.6) apresenta os valores do limiar de audição aberto da série B do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz.

$$L = \frac{4 + 15 + 7 + 15 + 6 + 14}{6} = 10,17 \text{ dB}, \quad (4.6a)$$

$$L_V = \frac{4 + 7 + 6}{3} = 5,67 \text{ dB}, \quad (4.6b)$$

$$L_P = \frac{15 + 15 + 14}{3} = 14,67 \text{ dB}, \quad (4.6c)$$

$$s_V = \sqrt{\frac{(4 - 5,67)^2 + (7 - 5,67)^2 + (6 - 5,67)^2}{2}} = 1,53 \text{ dB}, \quad (4.6d)$$

$$s_P = \sqrt{\frac{(15 - 14,67)^2 + (15 - 14,67)^2 + (14 - 14,67)^2}{2}} = 0,58 \text{ dB}. \quad (4.6e)$$

A estimativa da incerteza padrão da resposta do ouvinte do limiar de audição aberto da série B do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz é calculada por:

$$u_{LA,5,B}(1 \text{ kHz}) = 0,5 \cdot [1,53^2 + (5,67 - 10,17)^2] + \dots \\ \dots + (1 - 0,5) \cdot [0,58^2 + (14,67 - 10,17)^2] = 4,65 \text{ dB}. \quad (4.7)$$

Esse mesmo procedimento é realizado para todos os limiares de audição fechados e abertos de todos os ouvintes para cada banda de frequência de ensaio. O Quadro 4.7 apresenta a estimativa da incerteza padrão da resposta do ouvinte para o limiar de audição fechado (LF) e aberto (LA) de cada série de medição (S) de cada ouvinte (O) para cada banda de frequência de ensaio.

Quadro 4.7: Incerteza padrão da resposta do ouvinte em dB.

| O | S | L | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|---|----|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| | | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | A | LF | 5,81 | 4,92 | 5,39 | 5,89 | 5,91 | 5,49 | 4,65 |
| | | LA | 5,61 | 5,77 | 6,39 | 4,32 | 5,80 | 5,33 | 5,13 |
| | B | LF | 6,08 | 6,46 | 5,83 | 5,97 | 6,40 | 4,87 | 6,42 |
| | | LA | 7,91 | 7,42 | 5,90 | 5,86 | 5,85 | 6,10 | 7,11 |
| 2 | A | LF | 7,81 | 7,13 | 5,81 | 5,20 | 7,91 | 7,84 | 6,31 |
| | | LA | 7,76 | 7,59 | 7,13 | 6,95 | 8,06 | 7,37 | 6,75 |
| | B | LF | 7,79 | 7,52 | 8,11 | 8,31 | 8,55 | 7,32 | 7,23 |
| | | LA | 7,30 | 7,09 | 7,25 | 7,55 | 8,00 | 7,94 | 8,04 |
| 3 | A | LF | 5,62 | 5,86 | 6,26 | 6,19 | 8,31 | 5,95 | 6,50 |
| | | LA | 5,81 | 6,11 | 6,22 | 5,95 | 7,56 | 5,77 | 5,70 |
| | B | LF | 5,10 | 5,04 | 5,37 | 5,68 | 6,34 | 6,24 | 4,79 |
| | | LA | 6,57 | 5,74 | 6,54 | 6,18 | 5,13 | 7,07 | 6,91 |
| 4 | A | LF | 5,34 | 5,03 | 5,86 | 4,74 | 4,81 | 5,51 | 5,83 |
| | | LA | 5,23 | 4,48 | 4,85 | 4,41 | 4,59 | 4,45 | 3,94 |
| | B | LF | 5,42 | 7,11 | 5,77 | 5,29 | 6,76 | 5,75 | 5,56 |
| | | LA | 5,43 | 5,24 | 5,05 | 4,86 | 5,15 | 5,66 | 5,90 |
| 5 | A | LF | 4,82 | 4,68 | 5,25 | 5,56 | 4,58 | 4,25 | 4,25 |
| | | LA | 6,65 | 5,28 | 4,66 | 4,59 | 5,08 | 3,71 | 5,67 |
| | B | LF | 4,75 | 4,65 | 6,06 | 5,03 | 6,35 | 4,53 | 5,20 |
| | | LA | 6,19 | 5,59 | 5,18 | 4,65 | 4,70 | 4,61 | 4,68 |
| 6 | A | LF | 5,23 | 5,00 | 4,85 | 4,41 | 5,13 | 4,54 | 4,41 |
| | | LA | 4,00 | 5,23 | 4,06 | 4,61 | 4,50 | 5,13 | 4,41 |
| | B | LF | 5,29 | 4,18 | 5,18 | 4,70 | 5,40 | 5,03 | 5,81 |
| | | LA | 5,75 | 6,22 | 5,08 | 6,01 | 4,87 | 5,05 | 4,59 |
| 7 | A | LF | 5,21 | 5,09 | 5,80 | 5,55 | 4,25 | 4,04 | 4,74 |
| | | LA | 5,42 | 6,00 | 5,32 | 4,68 | 4,48 | 5,37 | 5,03 |
| | B | LF | 5,75 | 6,16 | 6,23 | 5,13 | 5,20 | 5,13 | 4,30 |
| | | LA | 4,22 | 5,44 | 5,32 | 4,27 | 5,23 | 6,26 | 4,86 |
| 8 | A | LF | 2,57 | 2,37 | 2,86 | 4,17 | 3,62 | 2,70 | 4,21 |
| | | LA | 3,06 | 3,27 | 3,50 | 3,78 | 3,69 | 3,29 | 3,82 |
| | B | LF | 2,95 | 2,75 | 3,64 | 3,88 | 2,99 | 2,86 | 3,43 |
| | | LA | 4,38 | 3,36 | 3,37 | 3,06 | 2,89 | 2,37 | 2,89 |
| 9 | A | LF | 5,05 | 5,41 | 6,11 | 5,75 | 4,97 | 3,80 | 4,68 |
| | | LA | 5,75 | 5,87 | 5,73 | 6,16 | 6,25 | 5,42 | 6,23 |
| | B | LF | 5,20 | 5,89 | 4,63 | 5,68 | 5,28 | 6,06 | 5,36 |
| | | LA | 6,30 | 4,99 | 4,22 | 6,51 | 4,58 | 3,27 | 5,00 |
| 10 | A | LF | 4,04 | 4,59 | 4,54 | 6,56 | 4,65 | 5,63 | 4,10 |
| | | LA | 5,68 | 5,18 | 6,51 | 7,38 | 6,47 | 5,58 | 5,46 |
| | B | LF | 3,57 | 5,51 | 4,54 | 4,65 | 5,58 | 4,34 | 4,10 |
| | | LA | 5,72 | 6,06 | 5,29 | 5,98 | 6,83 | 5,42 | 6,46 |

Com os dados do Quadro 4.5, Quadro 4.6 e Quadro 4.7 calcula-se a estimativa da incerteza padrão de cada limiar de audição de cada série de medição de cada ouvinte para cada banda de frequência de ensaio. A estimativa da incerteza padrão do limiar da série *B* do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz é calculada por:

$$u_{LA,5,B}(1 \text{ kHz}) = \sqrt{2,00^2 + 0,29^2 + 0,79^2 + 4,65^2} = 5,13 \text{ dB.} \quad (4.8)$$

O Quadro 4.8 apresenta a estimativa da incerteza padrão do limiar de audição fechado (LF) e aberto (LA) de cada série de medição (S) de cada ouvinte (O) para cada banda de frequência de ensaio.

O segundo passo é calcular o número de graus de liberdade do limiar de audição fechado e aberto que é calculado conforme a Equação (3.81). O número de graus de liberdade do limiar de audição aberto da série *B* do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz é calculado por:

$$\nu_{LA,5,B}(1 \text{ kHz}) = \frac{5,30^2}{4,65^2} \cdot 5 = 7,41. \quad (4.9)$$

O Quadro 4.9 apresenta os graus de liberdade da incerteza padrão do limiar de audição fechado (LF) e aberto (LA) de cada série de medição (S) de cada ouvinte (O) para cada banda de frequência de ensaio.

Quadro 4.8: Incerteza padrão do limiar de audição em dB.

| O | S | L | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|---|----|-----------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | A | LF | 6,38 | 5,14 | 5,58 | 6,03 | 6,14 | 5,72 | 4,79 |
| | | LA | 6,26 | 6,20 | 6,78 | 4,83 | 6,28 | 8,12 | 5,45 |
| | B | LF | 6,62 | 6,63 | 6,01 | 6,11 | 6,61 | 5,12 | 6,52 |
| | | LA | 8,38 | 7,76 | 8,48 | 6,25 | 6,33 | 8,64 | 7,34 |
| 2 | A | LF | 8,24 | 7,28 | 5,99 | 5,36 | 8,08 | 8,00 | 6,42 |
| | | LA | 8,24 | 7,92 | 9,38 | 9,22 | 8,41 | 9,58 | 9,09 |
| | B | LF | 8,22 | 7,66 | 8,24 | 8,41 | 8,71 | 7,49 | 7,32 |
| | | LA | 7,81 | 9,35 | 9,47 | 9,68 | 10,03 | 10,03 | 10,09 |
| 3 | A | LF | 6,26 | 6,04 | 6,43 | 6,33 | 8,47 | 6,16 | 6,60 |
| | | LA | 8,57 | 6,52 | 8,71 | 8,49 | 9,68 | 8,42 | 8,34 |
| | B | LF | 5,74 | 5,25 | 5,56 | 5,83 | 6,55 | 6,44 | 4,93 |
| | | LA | 9,10 | 6,18 | 8,94 | 8,65 | 7,93 | 9,35 | 9,21 |
| 4 | A | LF | 5,95 | 5,24 | 6,04 | 4,92 | 5,09 | 5,73 | 5,94 |
| | | LA | 5,92 | 5,03 | 5,35 | 4,91 | 5,18 | 7,57 | 4,34 |
| | B | LF | 6,02 | 7,26 | 5,95 | 5,45 | 6,96 | 5,97 | 5,68 |
| | | LA | 6,09 | 5,71 | 5,53 | 5,32 | 5,69 | 8,34 | 8,48 |
| 5 | A | LF | 5,49 | 4,91 | 5,45 | 5,71 | 4,87 | 4,54 | 4,41 |
| | | LA | 7,20 | 5,75 | 5,18 | 7,60 | 7,89 | 7,16 | 8,32 |
| | B | LF | 5,43 | 4,88 | 6,23 | 5,20 | 6,56 | 4,80 | 5,33 |
| | | LA | 6,78 | 6,04 | 5,65 | 5,13 | 5,28 | 7,67 | 7,68 |
| 6 | A | LF | 5,85 | 5,21 | 5,06 | 4,60 | 5,39 | 4,81 | 4,56 |
| | | LA | 4,86 | 5,70 | 4,65 | 5,10 | 5,10 | 7,99 | 7,52 |
| | B | LF | 5,91 | 4,43 | 5,38 | 4,88 | 5,65 | 5,27 | 5,93 |
| | | LA | 6,32 | 6,62 | 5,56 | 6,39 | 5,43 | 7,94 | 7,63 |
| 7 | A | LF | 5,90 | 5,30 | 5,98 | 5,70 | 4,56 | 4,34 | 4,88 |
| | | LA | 8,31 | 6,42 | 5,78 | 5,16 | 5,09 | 8,15 | 7,90 |
| | B | LF | 6,38 | 6,33 | 6,40 | 5,29 | 5,46 | 5,37 | 4,45 |
| | | LA | 5,05 | 5,90 | 5,78 | 4,79 | 5,76 | 8,76 | 7,79 |
| 8 | A | LF | 3,67 | 2,79 | 3,21 | 4,37 | 3,98 | 3,13 | 4,37 |
| | | LA | 4,03 | 3,59 | 3,79 | 4,00 | 4,05 | 3,82 | 3,99 |
| | B | LF | 3,95 | 3,12 | 3,92 | 4,09 | 3,42 | 3,27 | 3,62 |
| | | LA | 5,11 | 3,67 | 3,67 | 3,75 | 3,76 | 3,06 | 3,12 |
| 9 | A | LF | 5,69 | 5,61 | 6,28 | 5,90 | 5,24 | 4,12 | 4,82 |
| | | LA | 6,38 | 6,30 | 8,36 | 8,64 | 6,70 | 8,18 | 6,49 |
| | B | LF | 5,83 | 6,07 | 4,85 | 5,83 | 5,54 | 6,26 | 5,48 |
| | | LA | 6,88 | 5,49 | 7,41 | 6,86 | 5,18 | 6,94 | 5,32 |
| 10 | A | LF | 4,82 | 4,82 | 4,77 | 6,69 | 4,94 | 5,85 | 4,26 |
| | | LA | 6,32 | 5,66 | 8,92 | 9,55 | 6,90 | 8,29 | 8,18 |
| | B | LF | 4,43 | 5,70 | 4,77 | 4,83 | 5,82 | 4,62 | 4,26 |
| | | LA | 6,35 | 8,60 | 8,07 | 8,51 | 9,12 | 8,18 | 8,88 |

Quadro 4.9: Graus de liberdade do limiar de audição.

| O | S | L | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|---|----|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | A | LF | 7,25 | 5,94 | 5,75 | 5,50 | 5,82 | 5,87 | 5,65 |
| | | LA | 7,73 | 6,68 | 6,33 | 7,84 | 6,88 | 26,93 | 6,36 |
| | B | LF | 7,04 | 5,54 | 5,64 | 5,49 | 5,70 | 6,12 | 5,33 |
| | | LA | 6,30 | 5,99 | 21,34 | 6,46 | 6,84 | 20,17 | 5,69 |
| 2 | A | LF | 6,19 | 5,44 | 5,64 | 5,65 | 5,45 | 5,42 | 5,35 |
| | | LA | 6,35 | 5,94 | 14,96 | 15,49 | 5,93 | 14,29 | 16,46 |
| | B | LF | 6,20 | 5,39 | 5,32 | 5,25 | 5,39 | 5,48 | 5,26 |
| | | LA | 6,54 | 15,13 | 14,55 | 13,51 | 12,33 | 12,72 | 12,39 |
| 3 | A | LF | 7,72 | 5,66 | 5,55 | 5,46 | 5,41 | 5,74 | 5,33 |
| | | LA | 23,65 | 6,49 | 19,19 | 20,74 | 13,43 | 22,62 | 22,94 |
| | B | LF | 8,00 | 5,90 | 5,76 | 5,54 | 5,71 | 5,67 | 5,61 |
| | | LA | 18,41 | 6,70 | 17,44 | 19,23 | 28,50 | 15,32 | 15,79 |
| 4 | A | LF | 7,71 | 5,90 | 5,63 | 5,79 | 6,27 | 5,87 | 5,41 |
| | | LA | 8,19 | 7,92 | 7,40 | 7,71 | 8,14 | 41,90 | 7,39 |
| | B | LF | 7,62 | 5,44 | 5,65 | 5,63 | 5,62 | 5,79 | 5,45 |
| | | LA | 7,93 | 7,07 | 7,20 | 7,19 | 7,43 | 23,57 | 21,34 |
| 5 | A | LF | 8,41 | 6,05 | 5,79 | 5,57 | 6,41 | 6,49 | 5,78 |
| | | LA | 6,88 | 7,03 | 7,63 | 37,60 | 29,16 | 69,42 | 23,20 |
| | B | LF | 8,52 | 6,06 | 5,59 | 5,70 | 5,71 | 6,31 | 5,51 |
| | | LA | 7,20 | 6,80 | 7,08 | 7,41 | 7,98 | 38,24 | 36,29 |
| 6 | A | LF | 7,84 | 5,91 | 5,93 | 5,92 | 6,11 | 6,30 | 5,72 |
| | | LA | 10,93 | 7,08 | 8,58 | 7,46 | 8,28 | 29,42 | 42,28 |
| | B | LF | 7,77 | 6,33 | 5,81 | 5,80 | 5,99 | 6,05 | 5,41 |
| | | LA | 7,30 | 6,43 | 7,17 | 6,39 | 7,75 | 30,54 | 38,12 |
| 7 | A | LF | 8,22 | 5,88 | 5,64 | 5,57 | 6,65 | 6,67 | 5,62 |
| | | LA | 27,61 | 6,54 | 6,97 | 7,38 | 8,31 | 26,48 | 30,42 |
| | B | LF | 7,58 | 5,59 | 5,56 | 5,67 | 6,08 | 6,00 | 5,76 |
| | | LA | 10,22 | 6,91 | 6,97 | 7,92 | 7,35 | 19,16 | 33,05 |
| 8 | A | LF | 20,89 | 9,65 | 7,90 | 6,03 | 7,34 | 9,06 | 5,79 |
| | | LA | 15,08 | 7,25 | 6,86 | 6,27 | 7,24 | 9,09 | 5,97 |
| | B | LF | 16,06 | 8,31 | 6,71 | 6,20 | 8,58 | 8,56 | 6,22 |
| | | LA | 9,24 | 7,12 | 7,02 | 11,29 | 14,37 | 13,97 | 6,75 |
| 9 | A | LF | 8,07 | 5,77 | 5,58 | 5,53 | 6,18 | 6,90 | 5,64 |
| | | LA | 7,58 | 6,62 | 22,69 | 19,35 | 6,60 | 25,93 | 5,90 |
| | B | LF | 7,88 | 5,65 | 6,03 | 5,54 | 6,04 | 5,71 | 5,48 |
| | | LA | 7,11 | 7,30 | 47,54 | 6,17 | 8,15 | 101,66 | 6,43 |
| 10 | A | LF | 10,12 | 6,09 | 6,07 | 5,40 | 6,36 | 5,83 | 5,84 |
| | | LA | 7,65 | 7,12 | 17,59 | 14,01 | 6,48 | 24,31 | 25,19 |
| | B | LF | 11,87 | 5,75 | 6,07 | 5,82 | 5,93 | 6,43 | 5,84 |
| | | LA | 7,61 | 20,25 | 27,05 | 20,53 | 15,89 | 25,93 | 17,84 |

O terceiro passo é estimar a incerteza padrão da atenuação de cada série de cada ouvinte para cada banda de frequência do ensaio conforme a Equação (3.89). A estimativa da incerteza padrão da atenuação da série *B* do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz é calculada por:

$$u_{5,B}(1 \text{ kHz}) = 5, 20^2 + 5, 13^2 - 5, 20.5, 13 = 5, 16 \text{ dB.} \quad (4.10)$$

O Quadro 4.10 apresenta a estimativa da incerteza padrão da atenuação das séries (S) de cada ouvinte (O) para cada banda de frequência do ensaio.

Quadro 4.10: Incerteza padrão da atenuação das séries de cada ouvinte em dB.

| O | S | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|---|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | A | 6,32 | 5,74 | 6,27 | 5,53 | 6,21 | 7,22 | 5,15 |
| | B | 7,65 | 7,26 | 7,55 | 6,18 | 6,47 | 7,53 | 6,97 |
| 2 | A | 8,24 | 7,62 | 8,22 | 8,02 | 8,25 | 8,90 | 8,09 |
| | B | 8,02 | 8,63 | 8,92 | 9,11 | 9,44 | 9,03 | 9,03 |
| 3 | A | 7,68 | 6,30 | 7,82 | 7,64 | 9,14 | 7,54 | 7,62 |
| | B | 7,97 | 5,77 | 7,82 | 7,64 | 7,34 | 8,29 | 7,98 |
| 4 | A | 5,93 | 5,14 | 5,72 | 4,92 | 5,14 | 6,84 | 5,33 |
| | B | 6,06 | 6,62 | 5,75 | 5,39 | 6,42 | 7,44 | 7,48 |
| 5 | A | 6,52 | 5,38 | 5,32 | 6,85 | 6,90 | 6,28 | 7,21 |
| | B | 6,22 | 5,55 | 5,96 | 5,16 | 6,03 | 6,71 | 6,82 |
| 6 | A | 5,43 | 5,48 | 4,87 | 4,87 | 5,25 | 6,97 | 6,56 |
| | B | 6,12 | 5,85 | 5,47 | 5,78 | 5,55 | 7,00 | 6,93 |
| 7 | A | 7,40 | 5,94 | 5,88 | 5,45 | 4,85 | 7,06 | 6,90 |
| | B | 5,83 | 6,13 | 6,11 | 5,06 | 5,62 | 7,65 | 6,77 |
| 8 | A | 3,87 | 3,26 | 3,53 | 4,20 | 4,02 | 3,53 | 4,19 |
| | B | 4,64 | 3,43 | 3,80 | 3,93 | 3,60 | 3,17 | 3,40 |
| 9 | A | 6,07 | 5,98 | 7,54 | 7,65 | 6,10 | 7,08 | 5,84 |
| | B | 6,42 | 5,80 | 6,52 | 6,41 | 5,36 | 6,63 | 5,41 |
| 10 | A | 5,72 | 5,29 | 7,73 | 8,49 | 6,16 | 7,38 | 7,09 |
| | B | 5,64 | 7,58 | 7,03 | 7,39 | 8,00 | 7,10 | 7,69 |

O quarto passo é calcular o número de graus de liberdade da atenuação de cada série de medição conforme a Equação (3.90). O número de graus de liberdade da atenuação da série *B* do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz é calculado por:

$$\nu_{5,B}(1 \text{ kHz}) = \frac{5,16^4}{\frac{(5,20^2 + 0,55,20,5,13)^2}{5,70} + \frac{(5,13^2 + 0,55,20,5,13)^2}{7,41}} = 1,43. \quad (4.11)$$

O Quadro 4.11 apresenta os graus de liberdade da incerteza padrão da atenuação de cada série de medição (S) de cada ouvinte (O) para cada banda de frequência de ensaio.

Quadro 4.11: Graus de liberdade da atenuação de cada série.

| O | S | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|---|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | A | 1,66 | 1,46 | 1,40 | 1,43 | 1,41 | 3,30 | 1,36 |
| | B | 1,52 | 1,32 | 2,92 | 1,32 | 1,38 | 3,79 | 1,24 |
| 2 | A | 1,39 | 1,28 | 2,82 | 3,22 | 1,27 | 2,01 | 2,55 |
| | B | 1,42 | 2,09 | 1,93 | 1,86 | 1,83 | 2,15 | 2,14 |
| 3 | A | 3,51 | 1,36 | 2,62 | 2,64 | 1,88 | 2,88 | 2,48 |
| | B | 3,74 | 1,45 | 3,19 | 2,96 | 2,61 | 2,62 | 3,61 |
| 4 | A | 1,76 | 1,49 | 1,41 | 1,47 | 1,58 | 3,33 | 1,42 |
| | B | 1,73 | 1,38 | 1,40 | 1,40 | 1,42 | 3,04 | 3,09 |
| 5 | A | 1,73 | 1,50 | 1,45 | 3,16 | 4,39 | 5,65 | 4,68 |
| | B | 1,77 | 1,50 | 1,38 | 1,43 | 1,47 | 4,73 | 3,56 |
| 6 | A | 2,01 | 1,46 | 1,54 | 1,50 | 1,55 | 4,54 | 4,87 |
| | B | 1,68 | 1,62 | 1,44 | 1,46 | 1,49 | 3,84 | 2,94 |
| 7 | A | 4,03 | 1,44 | 1,38 | 1,40 | 1,69 | 5,32 | 4,13 |
| | B | 1,94 | 1,37 | 1,37 | 1,45 | 1,49 | 3,49 | 4,95 |
| 8 | A | 3,84 | 1,86 | 1,65 | 1,37 | 1,62 | 2,09 | 1,31 |
| | B | 2,53 | 1,72 | 1,53 | 1,73 | 2,49 | 2,32 | 1,46 |
| 9 | A | 1,75 | 1,40 | 2,74 | 2,91 | 1,51 | 5,77 | 1,39 |
| | B | 1,68 | 1,40 | 4,54 | 1,34 | 1,53 | 2,76 | 1,31 |
| 10 | A | 1,97 | 1,52 | 3,98 | 2,39 | 1,57 | 3,14 | 5,05 |
| | B | 2,09 | 3,15 | 4,41 | 3,97 | 2,98 | 4,75 | 4,54 |

O quinto passo é estimar a incerteza padrão da atenuação média de cada ouvinte para cada banda de frequência de ensaio conforme a Equação (3.93). A estimativa da incerteza padrão da atenuação média do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz é calculada por:

$$u_5(1 \text{ kHz}) = \frac{6,85 + 5,16}{2} = 6,01 \text{ dB.} \quad (4.12)$$

O Quadro 4.12 apresenta a estimativa da incerteza padrão da atenuação média de cada ouvinte (O) para cada banda de frequência de ensaio.

Quadro 4.12: Incerteza padrão da atenuação média de cada ouvinte em dB.

| O | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | 6,99 | 6,50 | 6,91 | 5,86 | 6,34 | 7,38 | 6,06 |
| 2 | 8,13 | 8,13 | 8,57 | 8,57 | 8,85 | 8,96 | 8,56 |
| 3 | 7,82 | 6,03 | 7,82 | 7,64 | 8,24 | 7,92 | 7,80 |
| 4 | 6,00 | 5,88 | 5,74 | 5,15 | 5,78 | 7,14 | 6,41 |
| 5 | 6,37 | 5,46 | 5,64 | 6,01 | 6,46 | 6,49 | 7,01 |
| 6 | 5,78 | 5,66 | 5,17 | 5,33 | 5,40 | 6,98 | 6,75 |
| 7 | 6,62 | 6,03 | 6,00 | 5,26 | 5,23 | 7,35 | 6,84 |
| 8 | 4,25 | 3,35 | 3,67 | 4,07 | 3,81 | 3,35 | 3,80 |
| 9 | 6,24 | 5,89 | 7,03 | 7,03 | 5,73 | 6,86 | 5,62 |
| 10 | 5,68 | 6,43 | 7,38 | 7,94 | 7,08 | 7,24 | 7,39 |

O sexto passo é calcular o número de graus de liberdade da atenuação média de cada ouvinte conforme a Equação (3.94). O número de graus de liberdade da atenuação média do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz é calculado por:

$$\nu_5(1 \text{ kHz}) = \frac{6,01^4}{\frac{[(6,85^2 + 6,85 \cdot 5,16)/2]^2}{3,16} + \frac{[5,16^2 + 6,85 \cdot 5,16]/2^2}{1,42}} = 1,08. \quad (4.13)$$

O Quadro 4.13 apresenta os graus de liberdade da incerteza padrão da atenuação média de cada ouvinte (O) para cada banda de frequência de ensaio.

O sétimo passo é estimar a incerteza padrão da atenuação média do ensaio conforme a Equação (3.97) com os dados do Quadro 4.12 e a incerteza padrão da média da atenuação conforme a Equação (3.99) com os dados do desvio padrão do Quadro 4.4 para cada banda de frequência de ensaio, e por fim, combinar estas duas fontes de incerteza através da Equação (3.101).

Quadro 4.13: Graus de liberdade da atenuação média de cada ouvinte.

| O | Frequência [Hz] | | | | | | |
|----|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
| 1 | 0,78 | 0,68 | 1,00 | 0,68 | 0,69 | 1,77 | 0,63 |
| 2 | 0,70 | 0,81 | 1,13 | 1,14 | 0,76 | 1,04 | 1,15 |
| 3 | 1,81 | 0,70 | 1,44 | 1,40 | 1,04 | 1,36 | 1,48 |
| 4 | 0,87 | 0,70 | 0,70 | 0,71 | 0,73 | 1,58 | 1,08 |
| 5 | 0,87 | 0,75 | 0,70 | 1,08 | 1,18 | 2,56 | 2,04 |
| 6 | 0,90 | 0,77 | 0,74 | 0,73 | 0,76 | 2,08 | 1,81 |
| 7 | 1,41 | 0,70 | 0,69 | 0,71 | 0,78 | 2,07 | 2,25 |
| 8 | 1,46 | 0,89 | 0,79 | 0,76 | 0,96 | 1,09 | 0,68 |
| 9 | 0,86 | 0,70 | 1,64 | 0,98 | 0,76 | 1,91 | 0,68 |
| 10 | 1,01 | 1,13 | 2,08 | 1,44 | 1,10 | 1,88 | 2,38 |

A estimativa da incerteza padrão da atenuação média do ensaio na banda de frequência de 1 kHz é calculada por:

$$u_A(1 \text{ kHz}) = \frac{\sqrt{5,86^2 + \dots + 7,94^2}}{10} = 2,03 \text{ dB.} \quad (4.14)$$

A estimativa da incerteza padrão da média da atenuação do ensaio na banda de frequência de 1 kHz é calculada por:

$$u_s(1 \text{ kHz}) = \frac{2,16}{\sqrt{10}} = 0,68 \text{ dB.} \quad (4.15)$$

A estimativa da incerteza padrão da atenuação do ensaio na banda de frequência de 1 kHz é calculada por:

$$u_{\text{Ensaio}}(1 \text{ kHz}) = \sqrt{2,03^2 + 0,68^2} = 2,15 \text{ dB.} \quad (4.16)$$

O Quadro 4.14 apresenta a estimativa da incerteza padrão da atenuação média, média da atenuação e atenuação do ensaio para cada banda de frequência do ensaio.

Quadro 4.14: Incerteza padrão do ensaio em dB.

| Frequência [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| u_A | 2,05 | 1,91 | 2,07 | 2,03 | 2,04 | 2,25 | 2,13 |
| u_s | 1,28 | 1,07 | 0,73 | 0,68 | 0,64 | 0,88 | 0,95 |
| u_{Ensaio} | 2,42 | 2,19 | 2,19 | 2,15 | 2,14 | 2,41 | 2,33 |

O oitavo passo é calcular o número de graus de liberdade da estimativa da incerteza da atenuação média do ensaio conforme a Equação

(3.98) e da estimativa de incerteza da média da atenuação conforme a Equação (3.100) para cada banda de frequência de ensaio, e por fim, calcular o número de graus de liberdade da atenuação do ensaio conforme a Equação (3.102). O número de graus de liberdade da atenuação média do ensaio na banda de frequência de 1 kHz é calculado por:

$$\nu_A(1 \text{ kHz}) = \frac{2,03^4}{\frac{(5,86/10)^4}{0,68} + \dots + \frac{(7,94/10)^4}{1,44}} = 9,23. \quad (4.17)$$

O número de graus de liberdade da média da atenuação do ensaio na banda de frequência de 1 kHz é calculado por:

$$\nu_s(1 \text{ kHz}) = 10 - 1 = 9. \quad (4.18)$$

O número de graus de liberdade da atenuação do ensaio na banda de frequência de 1 kHz é calculado por:

$$\nu_{\text{Ensaio}}(1 \text{ kHz}) = \frac{2,15^4}{\frac{2,03^4}{9,23} + \frac{0,68^4}{9}} = 11,28. \quad (4.19)$$

O respectivo coeficiente t de *Student* do número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da atenuação do ensaio (ν_{Ensaio}) pode ser obtido do Quadro A.1 para uma faixa de abrangência de 95,45 %. O valor da estimativa da incerteza expandida da atenuação do ensaio pode ser calculado pela Equação (2.22). O coeficiente t de *Student* do número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão da atenuação do ensaio na banda de frequência de 1 kHz é

$$t = 2,25. \quad (4.20)$$

A estimativa da incerteza expandida da atenuação do ensaio na banda de frequência de 1 kHz para um fator de abrangência de 95,45 % é calculada por:

$$U_{95,45 \%}(1 \text{ kHz}) = 2,25 \cdot 2,15 = 4,84 \text{ dB}. \quad (4.21)$$

O Quadro 4.15 apresenta o número de graus de liberdade da estimativa de incerteza padrão da atenuação média, média da atenuação e atenuação do ensaio, o coeficiente t de *Student*, estimativa da incerteza padrão da atenuação do ensaio e estimativa da incerteza expandida da atenuação do ensaio para um fator de abrangência de 95,45 %.

Quadro 4.15: Estimativa da incerteza expandida da atenuação do ensaio.

| Frequência [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| ν_A | 8,63 | 6,86 | 9,80 | 9,23 | 7,48 | 13,85 | 12,06 |
| ν_s | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 |
| ν_{Ensaio} | 14,59 | 11,03 | 12,22 | 11,28 | 8,93 | 17,79 | 16,49 |
| t de <i>Student</i> | 2,20 | 2,25 | 2,23 | 2,25 | 2,37 | 2,16 | 2,17 |
| u_{Ensaio} | 2,42 | 2,19 | 2,19 | 2,15 | 2,14 | 2,41 | 2,33 |
| U_{Ensaio} | 5,30 | 4,94 | 4,89 | 4,84 | 5,05 | 5,20 | 5,06 |

4.1.3 Contribuição das fontes de incerteza

Conforme apresentado no item 3.2.6, é possível avaliar a contribuição de cada fonte de incerteza na estimativa da incerteza padrão combinada em termos percentuais. As Equações (3.82) são utilizadas para calcular o percentual de contribuição do sistema de medição, parâmetros de ensaio, campo acústico e resposta do ouvinte. A contribuição de cada uma dessas fontes de incerteza para o limiar aberto da série B do ouvinte 5 na banda de frequência de 1 kHz é:

$$\%u_{SM} = \frac{2,00^2}{6,39^2} = 9,8 \%, \quad (4.22a)$$

$$\%u_{PE} = \frac{0,29^2}{6,39^2} = 0,20 \%, \quad (4.22b)$$

$$\%u_{CA} = \frac{0,79^2}{6,39^2} = 1,53 \%, \quad (4.22c)$$

$$\%u_{Ouvinte} = \frac{6,01^2}{6,39^2} = 88,47 \%. \quad (4.22d)$$

A Figura 4.2 apresenta de forma gráfica a contribuição de cada fonte de incerteza da estimativa da incerteza padrão da determinação do limiar de audição. De acordo com a figura, as duas fontes de incerteza predominantes são o sistema de medição e a resposta do ouvinte. As parcelas devido aos parâmetros de ensaio e campo acústico são praticamente desprezíveis, não ultrapassando juntas o valor de 2 %.

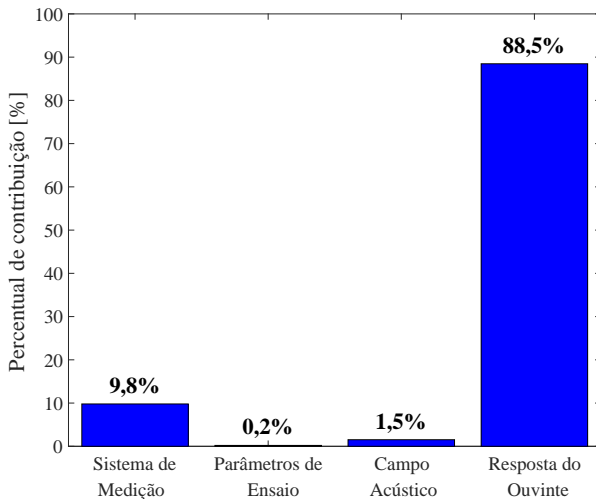


Figura 4.2: Contribuição das fontes de incerteza do ouvinte 5.

O mesmo procedimento é aplicado para as demais bandas de frequência de ensaio do limiar aberto da série *B* do ouvinte 5. O Quadro 4.16 apresenta os resultados em termos percentuais. A contribuição da componente de incerteza do sistema de medição é maior que a da resposta do ouvinte para a estimativa da incerteza padrão combinada, nas bandas de frequência de 4 e 8 kHz. Isso ocorre porque no limiar aberto o ouvinte responde aos estímulos sonoros em baixos NPS, fazendo com que o sistema de medição trabalhe em uma zona maior de incerteza conforme pode ser visto no Quadro 4.5 para o limiar de audição aberto da série *B* do ouvinte 5.

Quadro 4.16: Contribuição das fontes de incerteza do ouvinte 5.

| Frequência [Hz] | Sistema de Medição | Parâmetros de Ensaio | Campo Acústico | Resposta do Ouvinte |
|-----------------|--------------------|----------------------|----------------|---------------------|
| 125 | 9,82% | 0,20% | 8,77% | 81,20% |
| 250 | 9,12% | 0,19% | 2,51% | 88,18% |
| 500 | 12,94% | 0,27% | 3,30% | 83,49% |
| 1000 | 9,80% | 0,20% | 1,53% | 88,47% |
| 2000 | 17,92% | 0,28% | 1,48% | 80,33% |
| 4000 | 57,12% | 0,13% | 2,28% | 40,46% |
| 8000 | 61,89% | 0,14% | 1,75% | 36,22% |

O parâmetro de ensaio é a fonte de incerteza que se mostrou desprezível para todas as bandas de frequência, não ultrapassando o valor de 0,5 %. O campo acústico possui uma contribuição significativa dependendo da estimativa de incerteza padrão do sistema de medição e resposta do ouvinte. Na banda de frequência de 100 Hz o campo acústico possui uma contribuição de 8,77 %, esse valor é considerável e não deve ser desprezado.

4.1.4 Determinação do NRR_{SF}

O cálculo do NRR_{SF} é realizado conforme apresentado na seção 3.5. Na Equação (3.104), os valores do Laf do Quadro 3.15 e os valores da média e desvio padrão da atenuação do ensaio apresentados no Quadro 4.4 são utilizados,

$$\text{NRR}_{\text{SF}} = 100 - 10 \cdot \log_{10} \left[10^{\frac{75,4 - (10,78 - 1,4,06)}{10}} + \dots \right. \\ \left. \dots + 10^{\frac{90,4 - (32,42 - 1,3,02)}{10}} \right] - 5 = 20,05 \text{ dB.} \quad (4.23)$$

4.1.5 Determinação da incerteza do NRR_{SF}

O cálculo da estimativa de incerteza do NRR_{SF} é realizado conforme apresentado na seção 3.6. A Equação (3.110), os valores da atenuação média do Quadro 4.4 e os valores da estimativa da incerteza padrão da atenuação do ensaio do Quadro 4.15 são utilizados,

$$u_{\text{NRR}_{\text{SF}}} = 100 - 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{10^{\frac{75,4 - (10,78 - 2,42)}{10}}}{10^{\frac{75,4 - 10,78}{10}}} + \dots \right. \\ \left. \dots \frac{10^{\frac{90,4 - (32,42 - 2,33)}{10}}}{10^{\frac{90,4 - 32,42}{10}}} \right] - 5 = 2,24 \text{ dB.} \quad (4.24)$$

O número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão do NRR_{SF} é calculado conforme a Equação (3.110) e (3.111),

$$\nu_{\text{NRR}_{\text{SF}}} = \frac{2,24^4}{\sum_{f=125\text{Hz}}^{8000\text{Hz}} \left\{ \frac{\left[10^{\frac{\text{Laf}_f - (A_f - s_f)}{10}} \right]^4 u_f^4}{\sum_{j=125\text{Hz}}^{8000\text{Hz}} \left[10^{\frac{\text{Laf}_j - (A_j - s_j)}{10}} \right]^4 \nu_j} \right\}} = 991,16. \quad (4.25)$$

O respectivo coeficiente t de *Student* do número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão do NRR_{SF} pode ser obtido do Quadro A.1 para uma faixa de abrangência de 95,45 %. O valor da estimativa da incerteza expandida da atenuação do NRR_{SF} pode ser calculado pela Equação (2.22). O coeficiente t de *Student* do número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão do NRR_{SF} é

$$t = 2,00. \quad (4.26)$$

A estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} para um fator de abrangência de 95,45 % é calculada por

$$U_{95,45\%} = 2,00 \cdot 2,24 = 4,49 \text{ dB}. \quad (4.27)$$

4.1.6 Resultado do ensaio

O Quadro 4.17 apresenta o resultado do ensaio, com a atenuação e a estimativa da incerteza padrão por banda de frequência de ensaio e do NRR_{SF} . O resultado da atenuação de ruído de cada banda de frequência de ensaio é obtido do Quadro 4.4. A estimativa da incerteza expandida da atenuação de ruído de cada banda de frequência de ensaio é obtida do Quadro 4.15. O resultado do NRR_{SF} é obtido da Equação (4.23) e a estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} é obtida da Equação (4.27).

Quadro 4.17: Resultado do ensaio de atenuação de ruído em dB.

| Resultado | Frequência [Hz] | | | | | | | NRR_{SF} |
|------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
| | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k | |
| Atenuação | 10,78 | 16,02 | 25,51 | 26,96 | 31,34 | 32,55 | 32,42 | 20,05 |
| Incerteza* | ±5,30 | ±4,94 | ±4,89 | ±4,84 | ±5,05 | ±5,20 | ±5,06 | ±4,49 |

* Estimativa da incerteza expandida.

4.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE ENSAIO DE PROTETORES AUDITIVOS TIPO CONCHA

A Figura 4.3 apresenta a atenuação de ruído e a incerteza expandida da atenuação do ensaio, para um fator de abrangência de 95,45 %, de 5 modelos de protetores auditivos do tipo concha realizado com 10 ouvintes cada. O procedimento de avaliação é idêntico ao apresentado na seção 4.1 que foi desenvolvido no Capítulo 3.

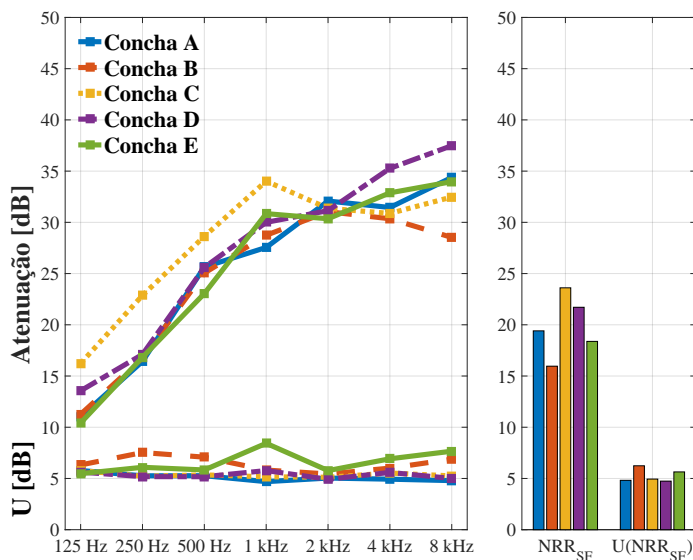


Figura 4.3: Atenuação e incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo concha.

Na parte inferior da Figura 4.3 é apresentada a estimativa da incerteza expandida da atenuação. É possível perceber que a estimativa da incerteza expandida da atenuação do ensaio entre os diferentes modelos de protetores auditivos tipo concha são similares e variam entre 5 e 10 dB em cada banda de frequência de ensaio e do NRR_{SF} .

A Figura 4.4 apresenta a estimativa da incerteza expandida da atenuação dos mesmos 5 modelos do ensaio. Nota-se que, em geral, a estimativa da incerteza expandida da atenuação está no intervalo entre 5 e 6 dB, com algumas exceções. Para o modelo *E*, a estimativa da

incerteza expandida alcançou quase 9 dB na banda de frequência de 1 kHz.

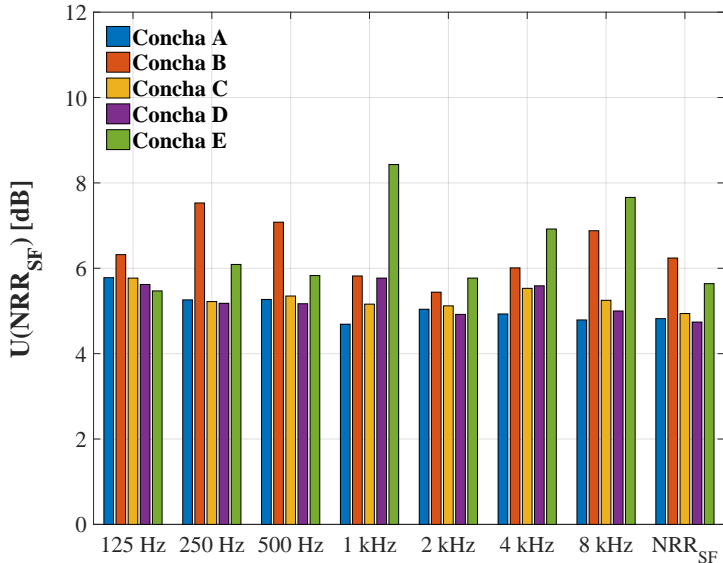


Figura 4.4: Incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo concha.

Os valores apresentados na Figura 4.3 e Figura 4.4 são inferiores aos apresentados na Norma ISO 4869-5, conforme apresentado no Quadro 2.5 e muito superiores dos apresentados na Norma ANSI S12.6 (2008), conforme apresentado nos Quadros 2.6 a 2.9. Além disso, os valores apresentados são superiores aos apresentados na Norma ANSI S12.6 (2016), que cita que a estimativa da incerteza expandida da atenuação para protetores auditivos tipo concha é em torno de 3 dB.

Na Figura 4.4 é possível notar que o modelo *B* e *E* apresentaram valores altos da estimativa da incerteza expandida da atenuação em algumas bandas de frequência. É possível explicar esse elevado valor devido as elevadas estimativas da incerteza padrão do limiar de audição aberto de grande parte dos ouvintes, nesses dois ensaios. A incerteza padrão do limiar aberto de pelo menos 5 ouvintes foi estimado acima de 10 dB, prejudicando assim a estimativa da incerteza expandida da atenuação nos dois ensaios.

4.3 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE ENSAIO DE PROTETORES AUDITIVOS TIPO CONCHA ACOPLÁVEL AO CAPACETE DE SEGURANÇA

A Figura 4.5 apresenta a atenuação de ruído e a incerteza expandida da atenuação do ensaio, para um fator de abrangência de 95, 45 %, de 5 modelos de protetores auditivos do tipo concha acoplável ao capacete de segurança realizado com 20 ouvintes cada. O procedimento de avaliação é idêntico ao apresentado na seção 4.1, que foi desenvolvido no Capítulo 3.

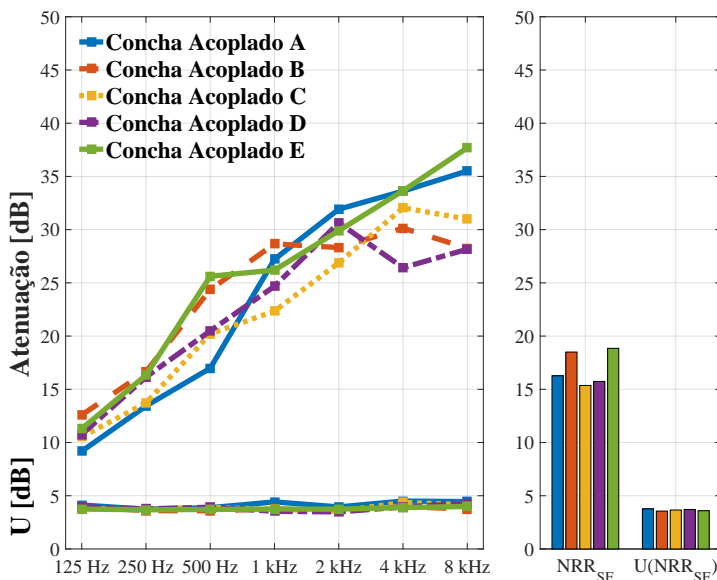


Figura 4.5: Atenuação e incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo concha acoplável ao capacete de segurança.

Na parte inferior da Figura 4.5 é apresentada a estimativa da incerteza expandida da atenuação. É possível perceber que, a estimativa da incerteza expandida do ensaio entre os diferentes modelos de protetores auditivos tipo concha, são similares e inferiores a 5 dB em cada banda de frequência de ensaio e do NRR_{SF} .

A Figura 4.6 apresenta a estimativa da incerteza expandida da

atenuação dos mesmos 5 modelos do ensaio. Nota-se que, em geral, a estimativa da incerteza expandida está no intervalo entre 3, 5 e 4, 5 dB.

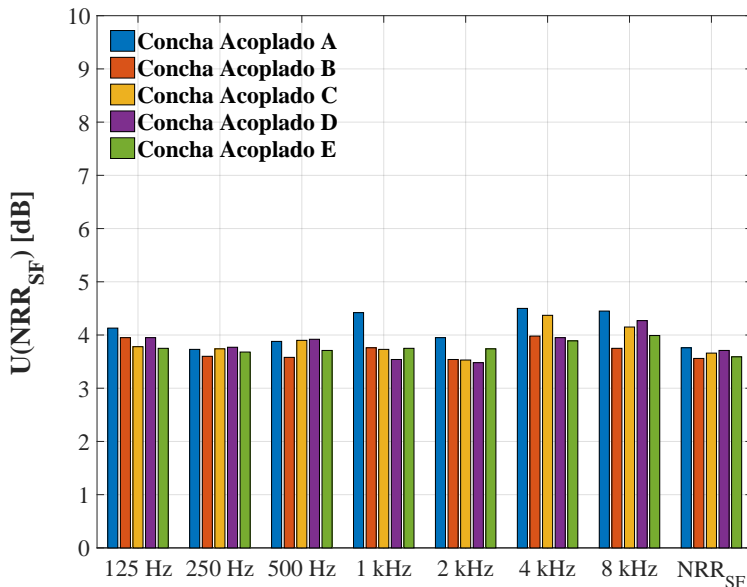


Figura 4.6: Incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo concha acoplável ao capacete de segurança.

Os valores apresentados na Figura 4.5 e Figura 4.6 são bem inferiores aos apresentados na Norma ISO 4869-5, conforme apresentado no Quadro 2.5 e superiores dos apresentados na Norma ANSI S12.6 (2008), conforme apresentado nos Quadros 2.6 a 2.9. Os valores apresentados são um pouco superiores aos apresentados na Norma ANSI S12.6 (2016), que cita que a estimativa da incerteza expandida da atenuação para protetores auditivos tipo concha é em torno de 3 dB.

A estimativa da incerteza expandida do ensaio de protetores auditivos tipo concha acoplável ao capacete de segurança é, em geral, inferior a estimativa dos protetores auditivos tipo concha. Esse fato pode ser explicado devido ao número de ouvintes utilizados no ensaio. Os ensaios de atenuação de ruído dos protetores auditivos do tipo concha são realizados com 10 ouvintes, enquanto que os ensaios do tipo concha acoplável ao capacete de segurança são realizados com 20 ouvintes.

4.4 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE ENSAIO DE PROTETORES AUDITIVOS TIPO PLUGUE

A Figura 4.7 apresenta a atenuação de ruído e a incerteza expandida da atenuação do ensaio, para um fator de abrangência de 95,45 %, de 5 modelos de protetores auditivos do tipo plugue realizado com 20 ouvintes cada. Sendo um modelo de protetor auditivo tipo plugue automoldável, um moldável, dois pré-moldáveis e um personalizado. O procedimento de avaliação é idêntico ao apresentado na seção 4.1, que foi desenvolvido no Capítulo 3.

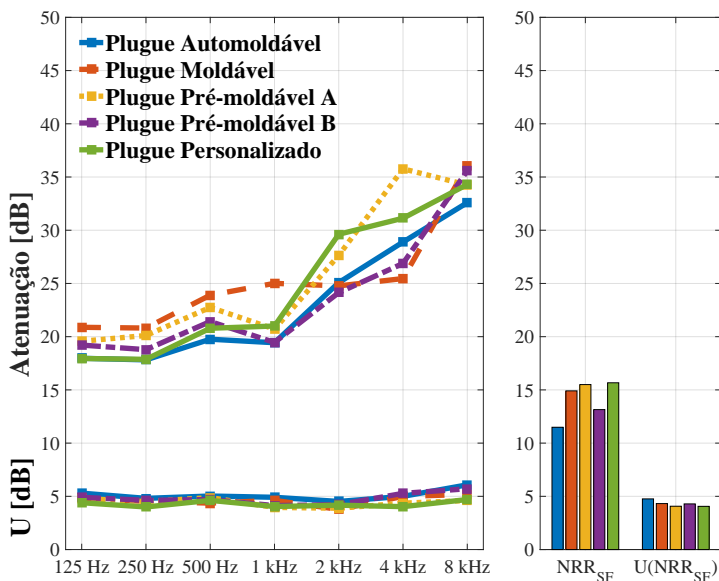


Figura 4.7: Atenuação e incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo plugue.

Na parte inferior da Figura 4.7 é apresentada a estimativa da incerteza expandida da atenuação. É possível perceber que, a estimativa da incerteza expandida da atenuação do ensaio entre os diferentes modelos de protetores auditivos tipo plugue são similares e em torno de 5 dB em cada banda de frequência de ensaio e do NRR_{SF} .

A Figura 4.8 apresenta a estimativa da incerteza expandida da atenuação dos mesmos 5 modelos do ensaio. Nota-se que, em geral, a estimativa da incerteza expandida está no intervalo entre 4 e 5 dB.

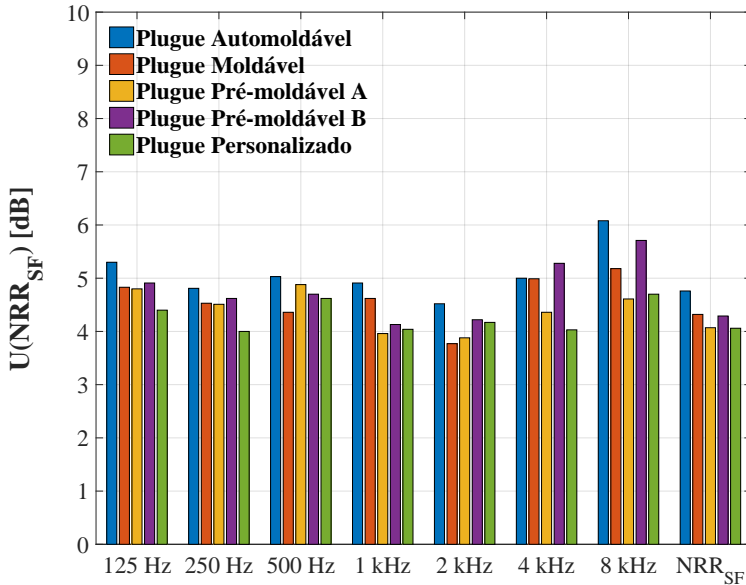


Figura 4.8: Incerteza do ensaio de protetores auditivos tipo plugue.

Os valores apresentados na Figura 4.7 e Figura 4.8 são bem inferiores aos apresentados na Norma ISO 4869-5, conforme apresentado no Quadro 2.5 e superiores dos apresentados na Norma ANSI S12.6 (2008), conforme apresentado nos Quadros 2.6 a 2.9. Além disso, a estimativa da incerteza expandida da atenuação do ensaio de protetores auditivos tipo plugue é um pouco maior que a estimativa dos conchas acopláveis ao capacete de segurança e inferior aos conchas. A maior estimativa da incerteza expandida da atenuação encontrada foi para o modelo automoldável. Um dos fatores que influenciam é a dificuldade de inserção correta desse tipo de protetor auditivo, sendo que a geometria do canal auditivo do usuário e a perícia na inserção correta do protetor auditivo são fundamentais para se obter uma boa vedação.

4.5 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE ENSAIO DE PROTETORES AUDITIVOS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE OUVINTES

Com o objetivo de avaliar a estimativa de incerteza do ensaio em função do número de ouvintes é realizada uma análise de sensibilidade. Essa análise é realizada para um modelo de protetor auditivo tipo concha, um concha acoplável ao capacete de segurança e um plugue pré-moldável. Para o modelo tipo concha, foram utilizados 100 ouvintes agrupados de 10 em 10. Para o modelo tipo concha acoplável ao capacete de segurança e tipo plugue, foram utilizados 200 ouvintes agrupados de 20 em 20. De acordo com as Normas ANSI S12.6 (2016), o número mínimo de ouvintes no ensaio do protetor auditivo tipo concha é 10 e para o tipo concha acoplável ao capacete de segurança e plugue é 20. Na Norma ISO 4869-5 (2006), o número mínimo de ouvintes no ensaio do protetor auditivo tipo concha e concha acoplável ao capacete de segurança é 16 enquanto que para o tipo plugue é 20. Subentende-se então que, a estimativa da incerteza do ensaio é maior para protetores auditivos do tipo plugue do que para os tipo concha, e ainda, para a Norma ANSI S12.6 (2016), entende-se que a estimativa de incerteza do protetor auditivo tipo concha acoplável ao capacete de segurança é maior do que para o tipo concha.

A Figura 4.9 apresenta a variação do NRR_{SF} e da estimativa da incerteza expandida para um modelo de protetor auditivo tipo concha. Conforme o número de ouvintes aumenta, o NRR_{SF} também aumenta gradativamente. Para um grupo de 10 ouvintes, o valor do NRR_{SF} é 14 dB, esse valor aumenta para 17 dB para um grupo de 40 ouvintes e atinge o valor de 18 dB para um grupo de 80 ouvintes. A estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} diminui de forma acentuada entre o grupo de 10 e 50 ouvintes, tendo seu valor alterado de 6 dB para próximo a 2 dB. É importante notar que de um grupo de 10 ouvintes para 20 ouvintes há um ganho expressivo de até 2 dB. Para grupos maiores que 50 ouvintes há uma redução pouco significativa da estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} , havendo uma redução de aproximadamente 0,25 dB.

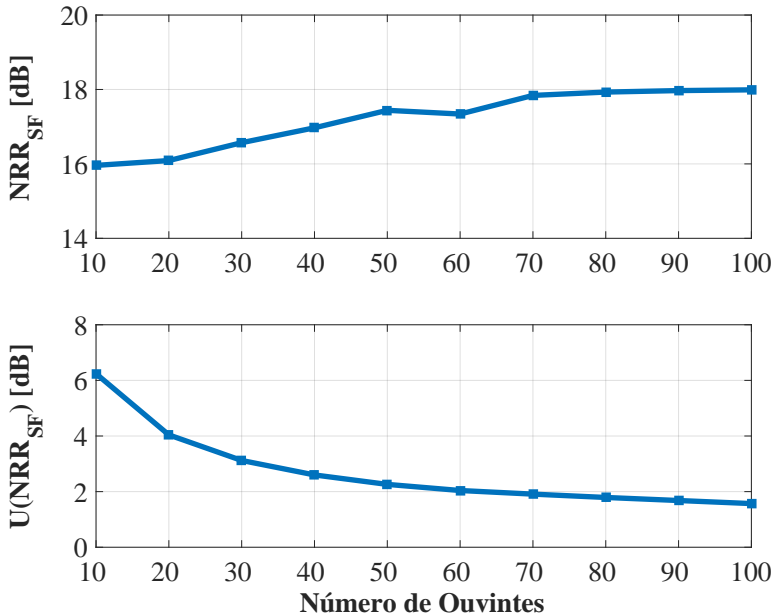


Figura 4.9: Análise de sensibilidade do NRR_{SF} e sua estimativa de incerteza para protetor auditivo tipo concha.

A Figura 4.10 apresenta a variação do NRR_{SF} e da estimativa da incerteza expandida para um modelo de protetor auditivo tipo concha acoplável ao capacete de segurança. Conforme o número de ouvidos aumenta, o NRR_{SF} também aumenta gradativamente. Para um grupo de 20 ouvidos, o valor do NRR_{SF} é próximo a 15 dB, esse valor aumenta para 16 dB para um grupo de 60 e 80 ouvidos e atinge o valor de 19 dB para um grupo de 180 ouvidos. É possível notar que há uma diferença de até 4 dB no valor do NRR_{SF} dependendo do tamanho do grupo de ouvidos, enquanto que para o modelo tipo concha essa diferença foi de 2 dB.

A estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} diminui gradualmente entre o grupo de 20 e 60 ouvidos, tendo seu valor alterado de 4 dB para próximo de 2 dB. Para grupos maiores que 60 ouvidos há pouca redução da estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} . Nota-se que de um grupo de 20 ouvidos para 40 ouvidos há um ganho expressivo de até quase 2 dB, o mesmo que aconteceu com o protetor auditivo tipo concha. Para grupos maiores que 100 ouvidos há uma

redução pouco significativa da estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} , havendo uma redução de aproximadamente 0,5 dB.

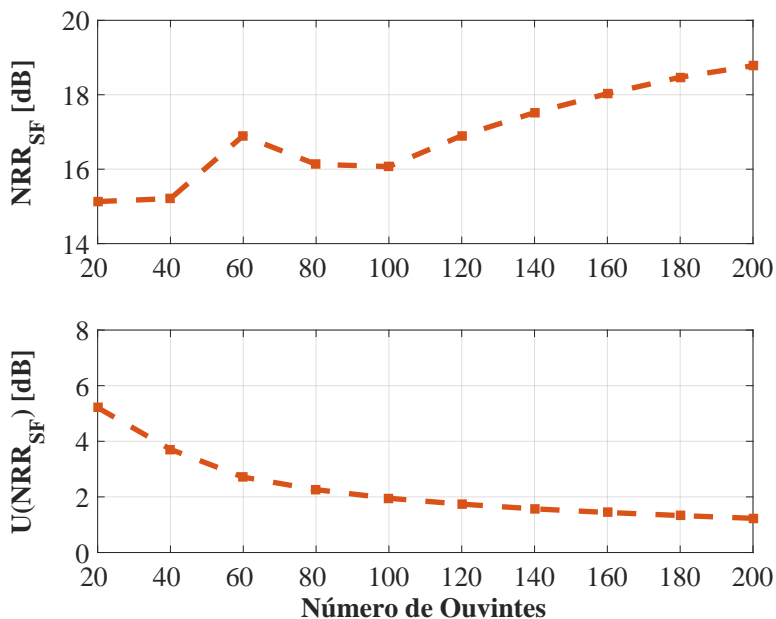


Figura 4.10: Análise de sensibilidade do NRR_{SF} e sua estimativa de incerteza para protetor auditivo tipo concha acoplável ao capacete de segurança.

A Figura 4.11 apresenta a variação do NRR_{SF} e da estimativa da incerteza expandida para um modelo de protetor auditivo tipo plugue. Conforme o número de ouvintes aumenta, o NRR_{SF} diminui e posteriormente aumenta. Apesar dessa diminuição e aumento, a variação nominal do NRR_{SF} é de apenas 2 dB, que é inferior a variação encontrada para o modelo tipo concha acoplável ao capacete de segurança e similar ao modelo tipo concha.

A estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} diminui gradualmente entre o grupo de 20 e 80 ouvintes, tendo seu valor alterado de 4 dB para próximo a 2 dB. Para grupos maiores que 80 ouvintes há pouca redução da estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} . Nota-se, que de um grupo de 20 ouvintes para 40 ouvintes há um ganho expressivo de até quase 2 dB, o mesmo que aconteceu com o protetor auditivo

tipo concha e concha acoplável ao capacete de segurança. Para grupos maiores que 100 ouvintes, há uma redução pouco significativa da estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} , havendo uma redução de aproximadamente 0,25 dB.

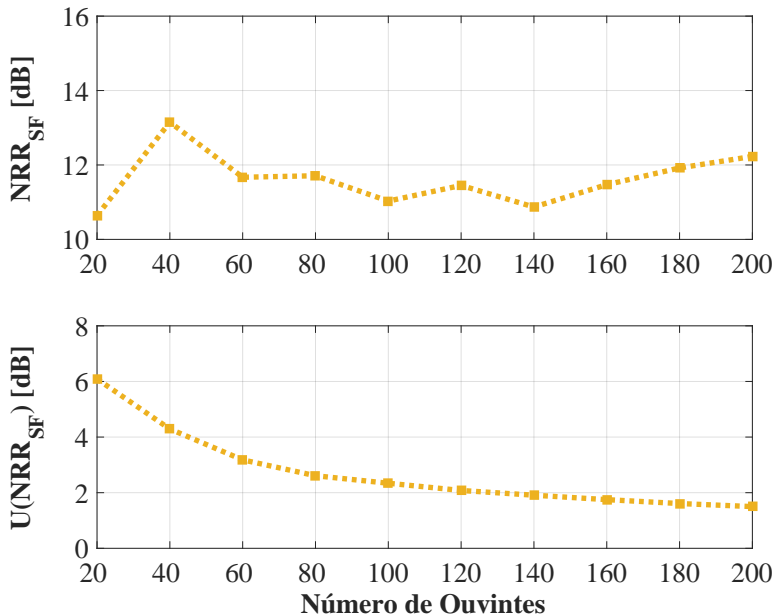


Figura 4.11: Análise de sensibilidade do NRR_{SF} e sua estimativa de incerteza para protetor auditivo tipo plugue.

A Figura 4.12 apresenta a análise de sensibilidade da estimativa de incerteza expandida do NRR_{SF} para os 3 modelos de protetores auditivos apresentados. A estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} para o modelo de protetor auditivo tipo concha é muito similar ao tipo concha acoplável ao capacete de segurança, nota-se que as duas curvas quase se sobrepõem. A estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} para o modelo de protetor auditivo tipo plugue é superior ao modelo tipo concha e concha acoplável ao capacete de segurança. Entretanto, observa-se que para um grupo de 10 ouvintes para o modelo de protetor auditivo tipo concha, a estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} é alta e próxima a 6 dB. Para um grupo de 50 ouvintes a estimativa da incerteza expandida do NRR_{SF} é em torno de 2,5 dB para os modelos

de protetores auditivos tipo concha e concha acoplável ao capacete de segurança e de 3 dB para o tipo plugue.

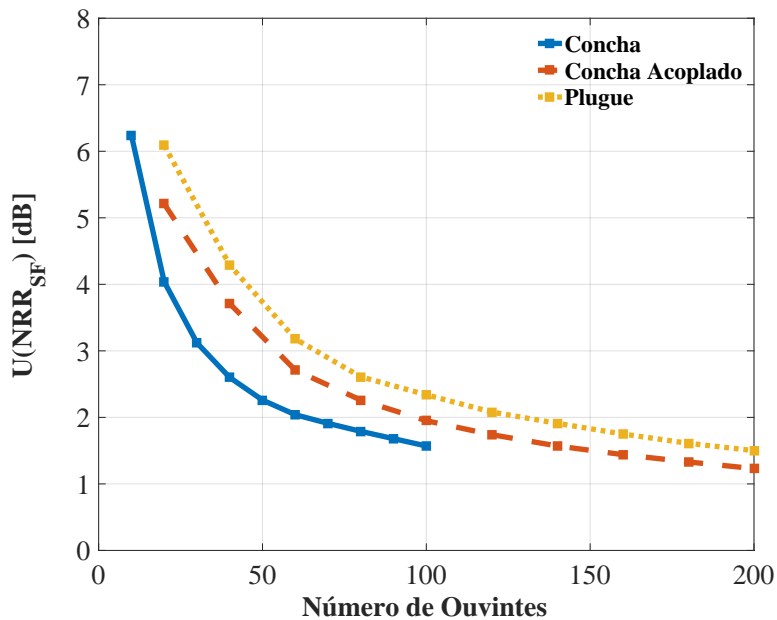


Figura 4.12: Análise de sensibilidade do NRR_{SF} e sua estimativa de incerteza para os 3 modelos de protetores auditivos.

5 CONCLUSÕES

A metodologia apresentada no ISO-GUM foi aplicada ao ensaio de atenuação de ruído de protetores auditivos, informações importantes sobre a estimativa da incerteza da atenuação do ensaio foram obtidas e comparações com os valores apresentados em normas internacionais foram realizadas.

De acordo com os resultados apresentados no Capítulo 4, a incerteza da atenuação de ruído estimada é, em geral, similar para as diferentes bandas de frequência de ensaio e para o NRR_{SF} . Além disso, essa estimativa também é similar para os diferentes modelos de um mesmo tipo de protetor auditivo, conforme apresentado na seção 4.2, seção 4.3 e seção 4.4. Para os protetores auditivos tipo concha, em média, a estimativa da incerteza expandida está na faixa entre ± 5 dB e $\pm 6,5$ dB para um grupo de 10 ouvintes. Para os protetores auditivos tipo concha acoplável ao capacete de segurança, em média, a estimativa da incerteza expandida está na faixa entre $\pm 3,5$ dB e $\pm 4,5$ dB para um grupo de 20 ouvintes. Para os protetores auditivos tipo plugue, em média, a estimativa da incerteza expandida está na faixa entre ± 4 dB e ± 5 dB para um grupo de 20 ouvintes. Conforme apresentado na seção 4.5, quanto maior for o número de ouvintes utilizados no ensaio, menor será a estimativa da incerteza da atenuação em cada banda de frequência de ensaio e para o NRR_{SF} .

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais são:

1. Diferentemente do que afirmam as Normas ANSI S12.6 e ISO 4869-1 e 4869-5, a estimativa da incerteza padrão do sistema de medição depende do NPS dentro da sala de ensaio, ou seja, essa estimativa não é constante e, em geral, se apresentou muito maior do que os valores indicados nestas normas. Além disso, nos limiares de audição abertos essa estimativa tende, em geral, a ser maior que a estimativa nos limiares de audição fechados. Essa fonte de incerteza deve ser avaliada para cada tipo de sistema de medição utilizado, podendo variar consideravelmente dependendo de suas características;
2. Para este sistema de medição especificamente, desenvolvido por Lima (2003) e atualizado em 2008, é possível reduzir a estimativa da incerteza padrão dos equipamentos diminuindo a sensibilidade das caixas

acústicas. A faixa de tensão gerada pela placa DSAG está entre 0,1 mV e 3,5 V, sendo que esta tem capacidade de gerar até 10 V. Dessa forma, a redução da sensibilidade das duas caixas acústicas faz com que a placa DSAG tenha que fornecer um maior nível de tensão e, conseqüentemente, essa trabalhará numa faixa de tensão mais distante da zona de tensão dos ruídos da própria placa e das caixas acústicas. Com esta ação, se espera que a estimativa da incerteza padrão do sistema de medição diminua;

3. A segunda ação a ser tomada para reduzir a estimativa de incerteza padrão dos equipamentos, é implementar um mecanismo (algoritmo) que realize em tempo real a correção da diferença entre a Curva Característica de Resposta (CCR) do sistema de medição e a curva de regressão utilizada pelo sistema de medição, conforme apresentado no item 3.2.1.7.3. No sistema de medição atual não há nenhum mecanismo ou rotina para realizar tal função, desta forma essa diferença entre a CCR e a curva de regressão é tratada como um erro aleatório, para cada banda de frequência de ensaio. Conforme apresentado na Figura 3.37 à Figura 3.43, essa diferença pode ser de até 3 dB;
4. Através do estudo de caso apresentado na seção 4.1, especificamente no item 4.1.3, é apresentado o percentual de contribuição de cada fonte de incerteza na estimativa da incerteza padrão combinada do limiar de audição aberto de uma série de uma medição de um ouvinte. Através da Figura 4.2 e do Quadro 4.16 é possível perceber que as fontes de incerteza com maiores contribuições são o sistema de medição e a resposta do ouvinte. Em alguns casos, o campo acústico possui uma contribuição considerável e não deve ser desprezado. Os parâmetros de ensaio é a fonte de incerteza que apresentou pouca contribuição, não ultrapassou o valor de 0,5 % da estimativa da incerteza padrão combinada;
5. Conclui-se também, que o número de ouvintes afeta de forma significativa a estimativa da incerteza da atenuação do ensaio. Conforme apresentado na Figura 4.12, quanto maior o número de ouvintes, menor será a estimativa da incerteza da atenuação do ensaio, sendo esta uma relação não linear. A estimativa da incerteza da atenuação para protetores auditivos tipo concha e concha acoplável ao capacete de segurança é muito similar. A estimativa da incerteza para protetores auditivos tipo plugue é superior ao do tipo concha e concha acoplável ao capacete de segurança. A variação do NRR_{SF} para os protetores auditivos tipo concha acoplável ao capacete de segurança é maior que do tipo concha e plugue. A variação do NRR_{SF} para os protetores tipo concha e plugue é similar;

6. As estimativas das incertezas da atenuação do ensaio apresentadas para os protetores auditivos tipo concha, concha acoplável ao capacete de segurança e plugue são inferiores às apresentadas na Norma ISO 4869-5 (2006) e bem superiores às apresentadas na Norma ANSI S12.6 (2016). É importante salientar que, em ambas as normas, os cálculos das estimativas de incerteza são tratados de forma muito simplificadas ou básicas, não levando em consideração a questão da correlação entre os limiares de audição e as atenuações de um mesmo ouvinte, além de não apresentarem uma explicação do dimensionamento da fonte de incerteza dos equipamentos, campo acústico e resposta do ouvinte, nem mesmo utilizando trabalhos publicados sobre o tema como referências;
7. Outro fator que pode ser investigado para reduzir a estimativa de incerteza do ensaio é o número de inversões utilizados para determinar o limiar de audição fechado e aberto. A resposta do ouvinte é a fonte de incerteza com maior contribuição para a estimativa da incerteza padrão do limiar de audição. Para reduzir a estimativa de incerteza de ensaio deve-se reduzir a estimativa de incerteza padrão da resposta do ouvinte. Atualmente na Norma ANSI S12.6 (2016) utiliza 6 inversões. Deve-se avaliar se o aumento do número de inversões reduz o desvio padrão dos pontos de inversões dos picos e vales e, conseqüentemente, reduz a estimativa da incerteza padrão da resposta do ouvinte. O aumento do número de inversões aumentará o tempo de realização do ensaio, dessa forma deve-se observar o cansaço do ouvinte em responder de forma assertiva os estímulos sonoros. Atualmente com 6 inversões, o tempo médio de ensaio é de 30 minutos. Deve haver um *trade-off* entre o número de inversões e o tempo de ensaio;
8. Por fim, a ordem das bandas de frequência do ensaio é sempre a mesma, começando em 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 500 Hz, 250 Hz e terminando em 125 Hz. A alteração da sequência em que as bandas de frequência são ordenadas pode influenciar no resultado do ensaio. Essa questão deve ser investigada para avaliar se a influência é significativa ou não e, caso positivo, o quanto ela influencia.

5.2 PROPOSTAS DE FUTUROS ESTUDOS

As fontes de incerteza com maior contribuição encontradas são o sistema de medição e a resposta do ouvinte. Dessa forma, para reduzir a estimativa da incerteza de ensaio sugere-se os seguintes futuros estudos:

1. Alterar a faixa de tensão de saída da placa DSAG para trabalhar afastada da zona de ruído da placa DSAG e das caixas acústicas. Conforme apresentado no Quadro 3.8, a estimativa da incerteza padrão dos equipamentos é 0,06504 mV, enquanto que o menor nível de tensão da placa DSAG é 0,1 mV, que equivale a -80 dBV. A placa DSAG está trabalhando muito próxima a zona de ruído, sugere-se então aumentar a faixa de tensão de -80 dBV para -60 dBV, que equivale a 1 mV, um valor quase 10 vezes maior que o nível de tensão do ruído da placa DSAG. Para isto, é necessário reduzir a sensibilidade das caixas acústicas. As estimativas de incerteza padrão apresentadas em *dB* não são afetadas por essa sistemática e continuarão com o mesmo valor;
2. Implementar um mecanismo ou rotina (algoritmo) que realize em tempo real a correção da diferença entre a CCR experimental e a curva de regressão utilizada pelo sistema de medição com o objetivo de reduzir a estimativa de incerteza padrão do sistema de medição. Como a CCR experimental é determinada através de pontos discretos distribuídos na faixa dinâmica para cada banda de frequência de ensaio, pode-se utilizar uma interpolação linear entre os pontos medidos para determinar a correção do sistema de medição;
3. É necessário realizar uma análise de sensibilidade do número de inversões utilizado para determinar o limiar de audição. A priori, estima-se que quanto maior o número de pontos de inversão dos picos e vales, menor será o desvio padrão dos picos e vales e, conseqüentemente, menor será a incerteza padrão da reposta do ouvinte, reduzindo assim a estimativa da incerteza da atenuação do ensaio. Atualmente não foi encontrado nenhum trabalho referente a este assunto na literatura e pode ser um ponto importante para reduzir a incerteza de ensaio.

REFERÊNCIAS

- AGURTO, D. A. *Avaliação da perda de inserção de dispositivos auditivos com controle de ruído ativo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- AGURTO, D. A.; GERGES, S. N. Y.; ARENAS, J. P. Mire-ii methodology applied to measuring the noise attenuation of earmuff hearing protectors. *Applied Acoustic*, v. 72, n. 7, p. 451–457, Fev 2011.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. 1. ed. Barueri: Ed. Manole, 2008.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. *ANSI/ASA S3.19: Method for the Measurement of Real-Ear Protection of Hearing Protectors and Physical Attenuation of Earmuffs*. New York, 1974. 15 p.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. *ANSI/ASA S12.6: Methods for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors*. New York, 1997. 23 p.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. *ANSI/ASA S12.6: Methods for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors*. New York, 2008. 31 p.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. *ANSI/ASA S12.42: Methods for the Measurement of Insertion Loss of Hearing Protection Devices in Continuous or Impulsive Noise Using Microphone-in-Real-Ear or Acoustic Test Fixture Procedures*. New York, 2010. 52 p.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. *ANSI/ASA S12.68: Methods of Estimating Effective A-Weighted Sound Pressure Levels When Hearing Protectors are Worn*. New York, 2012. 27 p.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. *ANSI/ASA S3.36: Specification for a Manikin for Simulated in-situ Airborne Acoustic Measure-ments*. New York, 2012. 35 p.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. *ANSI/ASA S12.6: Methods for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors*. New York, 2016. 36 p.

- BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática*. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2008.
- Behringer. *Truth B2031A Quick Star Guide*. Alemanha, 2013. 10 p.
- BERANEK, L. L.; VER, I. L. *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Application*. 2. ed. Hoboken (EUA): John Wiley & Sons, 2006.
- BERGER, E. H. Methods of measuring the attenuation of hearing protection device. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 79, n. 6, p. 1655–87, Jun 1986.
- BERGER, E. H. Preferred methods for measuring hearing protector attenuation. In: *Proceedings of the 34th Inter-Noise*. Rio de Janeiro: INCE, 2005.
- BERGER, E. H.; ROYSTER, L. H.; ROYSTER, J. D.; DRISCOLL, D. P.; LAYNE, M. *The Noise Manual*. 5. ed. Fairfax (EUA): American Industrial Hygiene, 2000.
- BISTAFA, S. R. *Acústica Aplicada Ao Controle de Ruído*. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2011.
- BORWICK, J. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3. ed. Oxford (Inglaterra): Focal Press, 2001.
- Brüel & Kjaer. *Type 4231 Datasheet*. Dinamarca, 2006. 4 p.
- Brüel & Kjaer. *Type 4955 Datasheet*. Dinamarca, 2013. 4 p.
- Brüel & Kjaer. *Certificado de calibração CBR1400866 do 2250*. São Paulo, 2014. 25 p.
- Brüel & Kjaer. *Certificado de calibração CBR1400868 do 4231*. São Paulo, 2014. 2 p.
- CZUBA, K.; SIKORA, D. Temperature stability of coaxial cables. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, v. 119, n. 4, p. 553–557, Abr 2011.
- DICKASON, V. *Caixas Acústicas e Alto-Falantes*. 1. ed. Rio de Janeiro: H. Sheldon, 2006.
- EVERITT, B.; HAND, D. J. *Finite Mixture Distribution*. 1. ed. Holanda: Springer, 1981.

FAHY, F.; GARDONIO, P. *Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Re-sponse*. 2. ed. Oxford (Inglaterra): Academic Press, 2007.

GERGES, S. N. Y. *Ruído: Fundamentos e Controle*. 2. ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.

GERGES, S. N. Y. *Protetores Auditivos*. 1. ed. Florianópolis: NR Editora, 2003.

GERGES, S. N. Y.; GERGES, R. N. C. Uncertainty calculation for hearing protector noise attenuation measurement for one specific brand in one laboratory. In: *Proceedings of the 44th Inter-Noise*. São Francisco: INCE, 2015.

GERGES, S. N. Y.; GERGES, R. N. C.; VERGARA, E. F. Uncertainty of hearing protector noise attenuation based on reat method. In: *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics*. Buenos Aires: ICA, 2016.

IIDA, I. *Ergonomia: Projeto e Produção*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1990.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 4869-2: Acoustics - Hearing protectors - Part 2: Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn*. Genebra, 1994. 12 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 4869-5: Acoustics - Hearing protectors - Part 5: Method for estimation of noise reduction using fitting by inexperienced test subjects*. Genebra, 2006. 18 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 4869-3: Acoustics - Hearing protectors - Part 3: Measurement of insertion loss of ear-muff type protectors using an acoustic test fixture*. Genebra, 2007. 11 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO GUM: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Genebra, 2008. 126 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 4869-1: Acoustics - Hearing protectors - Part 1: Subjective method for the measurement of sound attenuation*. Genebra, 2015. 15 p.

KRAFT, C. H.; EEDEN, C. *A nonparametric introduction to statistics*. 1. ed. Londres (Inglaterra): Macmillan, 1968.

LATHI, B. P. *Sinais e sistemas lineares*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

LIMA, F. R. *Desenvolvimento e Avaliação Metrológica de Sistema para Ensaio de Atenuação de Ruído de Protetores Auditivos pelo Método Subjetivo*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

LIMA, F. R.; GERGES, S. N. Y.; ZMIJEVSKI, T. R. L.; BENDER, D. F.; GERGES, R. N. C. Uncertainty calculation of hearing protector noise attenuation measurements by reat method. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 32, n. 1, p. 28–36, Jan./dez. 2010.

MURPHY, W. J.; BERGER, E. H.; GAUGER, D.; WITT, B.; MCKINLEY, R.; GERGES, S.; AHROON, W. Results from the national institute for occupational safety and health/environmental protection agency niosh/epa interlaboratory comparison of american national standards institute ansi s12.6-1997 methods a and b. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 120, n. 5, p. 3160, Mai 2006.

MURPHY, W. J.; BYRNE, D. C.; GAUGER, D.; AHROON, W. A.; BERGER, E.; GERGES, S. N. Y.; MCKINLEY, R.; WITT, B.; KRIEG, E. F. Results of the national institute for occupational safety and health?u.s. environmental protection agency interlaboratory comparison of american national standards institute s12.6-1997 methods a and b. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 125, n. 5, p. 3262–3267, Mai 2009.

MURPHY, W. J.; FRANKS, J. R.; BERGER, E. H.; CASALI, J. G.; DIXON-ERNS, C.; KRIEG, E. F.; MOZO, B. T.; D., R. J.; H., R. L.; SIMON, S. D.; STEPHENSON, C. Development of a new standard laboratory protocol for estimation of the field attenuation of hearing protection devices: Sample size necessary to provide acceptable reproducibility. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 115, n. 1, p. 311–323, Mar 2004.

MURPHY, W. J.; FRANKS, J. R.; KRIEG, E. F. Hearing protector attenuation: Models of attenuation distributions. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 111, n. 5, p. 2109–2116, Mai 2002.

MURPHY, W. J.; FRANKS, J. R.; SIMON, S. D. Repeatability and reproducibility in hearing protector testing. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 99, n. 3, p. 2464–2500, Mar 1996.

National Instruments. *NI PCI 4461 User Manual*. EUA, 2010. 96 p.

National Instruments. *NI PCI 4461 Datasheet*. EUA, 2014. 19 p.

NIOSH. *Occupational Noise Exposure*. Cincinnati (EUA), 1998. 105 p.

PEDROSO, M. A. *Aspectos Metrológicos da Calibração de Audiômetros*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

PIACENTINI, J. J.; GRANDI, B. C. S.; HOFMANN, M. P.; LIMA, F. R. R.; ZIMMERMANN, E. *Introdução ao Laboratório de Física*. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

ROYSTER, J. D.; BERGER, E. H.; MERRY, C. J.; NIXON, C. W.; FRANKS, J. R.; BEHAR, A.; CASALI, J. G.; C., D.-E.; KIEPER, R. W.; MOZO, B. T.; OHLIN, D.; ROYSTER, L. H. Development of a new standard laboratory protocol for estimating the field effectiveness of hearing protection device, part i: Research of working group 11, accredited standard committee s12, noise. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 99, n. 3, p. 1506–1526, Mar 1996.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. *Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais*. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1996.

SADIKU, M. N. O. *Elementos de eletromagnetismo*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SHIN, K.; HAMMOND, J. K. *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*. 1. ed. West Sussex (Inglaterra): John Wiley & Sons, 2008.

TEMKIN, S. *Elements of Acoustics*. 2. ed. Melville (EUA): Acoustical Society of America, 2001.

TOCCI, R. J.; NEAL, S. W.; MOSS, G. L. *Sistemas digitais: princípios e aplicações*. 10. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

VOIX, J.; LAPOTRE, C. Sound field uncertainty budget for real-ear attenuation at threshold measurement per ansi s12.6 standards. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 136, n. 4, p. 2134, Out 2014.

WILLINK, R. A generalization of the welch-satterthwaite formula for use with correlated uncertainty components. *Metrologia*, v. 44, n. 5, p. 340, Out 2007.

APÊNDICE A - Erro em dB e NPS

A.1 ERRO EM DB E NPS

É possível afirmar e demonstrar que um erro de tensão apresentado em dB pode ser somado diretamente a um valor de NPS em dB ou dBA, quando este erro é relativo ao sinal de tensão. Erros fornecidos em dBFS ou dBc não podem ser somados diretamente ao valor de NPS pois estes não são relativos ao sinal de tensão e sim a um valor de tensão de referência. O erro em dB relativo ao sinal de tensão de saída da placa é dado por

$$E[\text{dB}] = 20 \log_{10} \left(\frac{V + E[V]}{V} \right). \quad (\text{A.1})$$

Sendo $E[\text{dB}]$ o erro em dB, V o sinal de tensão e $E[V]$ o sinal de tensão do erro. Rearranjando a equação têm-se

$$E[V] = V(10^{E[\text{dB}]/20} - 1). \quad (\text{A.2})$$

Ao aplicar esses sinais de tensão (V e $E[V]$) a uma caixa de som qualquer, onde se conhece a sensibilidade S (Pa/V), conforme Apêndice C, é possível obter a pressão acústica através de

$$P = S.V, \quad (\text{A.3a})$$

$$E[P] = S.E[V]. \quad (\text{A.3b})$$

Sendo P a pressão acústica devido a excitação da tensão V e $E[P]$ a pressão acústica devido a excitação da tensão $E[V]$. O NPS total (NPS_T) é a soma das pressões acústicas P e $E[P]$ em relação a pressão acústica de referência P_o , calculada por

$$NPS_T = 20 \log_{10} \left(\frac{P + E[P]}{P_o} \right). \quad (\text{A.4})$$

Substituindo os termos de P e $E[P]$ da Equação (A.4) pelos termos da Equação (A.3) tem-se

$$NPS_T = 20 \log_{10} \left(\frac{S.V + S.E[V]}{P_o} \right). \quad (\text{A.5})$$

Substituindo o termo $E[V]$ da Equação (A.5) pela Equação (A.2) obtém-se

$$\text{NPS}_T = 20 \log_{10} \left(\frac{\mathbf{S.V} + \mathbf{S.V}(10^{E[\text{dB}]/20} - 1)}{P_o} \right), \quad (\text{A.6})$$

ou seja,

$$\text{NPS}_T = 20 \log_{10} \left(\frac{\mathbf{S.V.} \cdot 10^{E[\text{dB}]/20}}{P_o} \right). \quad (\text{A.7})$$

Rearranjando a equação é possível chegar a

$$\text{NPS}_T = 20 \log_{10} \left(\frac{\mathbf{S.V}}{P_o} \right) + 20 \cdot \log 10(10^{E[\text{dB}]/20}). \quad (\text{A.8})$$

Substituindo o termo $\mathbf{S.V}$ da primeira parcela da Equação (A.8) pelo termo da Equação (A.3a) e simplificando a segunda parcela tem-se

$$\text{NPS}_T = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_o} \right) + E[\text{dB}]. \quad (\text{A.9})$$

Sendo que o primeiro termo da Equação (A.9) nada mais é que o NPS sem a presença do erro, desta forma,

$$\text{NPS}_T = \text{NPS} + E[\text{dB}]. \quad (\text{A.10})$$

Conclui-se então que um dado erro apresentado em dB em relação ao sinal de tensão pode ser somado diretamente ao NPS em dB ou dBA do sistema de medição.

APÊNDICE B – Modelo elétrico do cabo

B.1 MODELO ELÉTRICO DO CABO

Para analisar o comportamento do cabo deve-se decidir se utiliza-se a teoria de ondas guiadas, utilizando parâmetros distribuídos e o efeito de reflexão, ou a teoria clássica de circuitos elétricos sem considerar o efeito de reflexão, utilizando parâmetros concentrados. De acordo com Sadiku (2004) e Borwick (2001), o critério para decidir a abordagem é a razão entre o tamanho do cabo (linha de transmissão) e o comprimento de onda, conforme segue,

$$\begin{aligned} \text{Se } \frac{l}{\lambda} > 0,01 & \text{ ondas guiadas,} \\ \text{Se } \frac{l}{\lambda} < 0,01 & \text{ circuitos elétricos.} \end{aligned} \tag{B.1}$$

A teoria de ondas guiadas implica em considerar que tensões e correntes sobre um condutor dependem da posição do ponto de observação, enquanto que, a teoria de circuitos elétricos considera que tensões e correntes independem dessa posição.

Os cabos utilizados para conectar a placa DSAG às caixas acústicas possuem um comprimento de **15** m e a máxima frequência do sinal é de **20** kHz, com comprimento de onda de **$15 \cdot 10^3$** (transmissão elétrica e não acústica no cabo)¹. A razão entre o comprimento do cabo (linha de transmissão) e o menor comprimento de onda (pior caso),

$$\frac{l}{\lambda} = \frac{15}{15 \cdot 10^3} = 0,001. \tag{B.2}$$

Desta forma é possível utilizar a teoria de circuitos elétricos, que simplifica a análise. De acordo com Sadiku (2004) e Borwick (2001), os cabos podem ser modelados conforme um circuito equivalente do tipo L, conforme a Figura B.1, em termos dos parâmetros da linha, no domínio da frequência.

R é o efeito da resistência para corrente alternada dos condutores utilizados no cabo, ele expressa a resistência do material à passagem de corrente elétrica, através do efeito Joule. ***L*** é o efeito de indutância gerado pelo campo magnético nos condutores devido à passagem de corrente elétrica alternada, criando uma força eletromotriz no circuito. ***G*** é a condutância devido ao dielétrico que separa os condutores, neste caso o material isolante. ***C*** é o efeito de capacitância dos condutores

¹ Considera-se a velocidade da luz de **$3 \cdot 10^8$** m/s, pois está se analisando o sinal elétrico no cabo.

devido ao campo elétrico gerado entre eles.

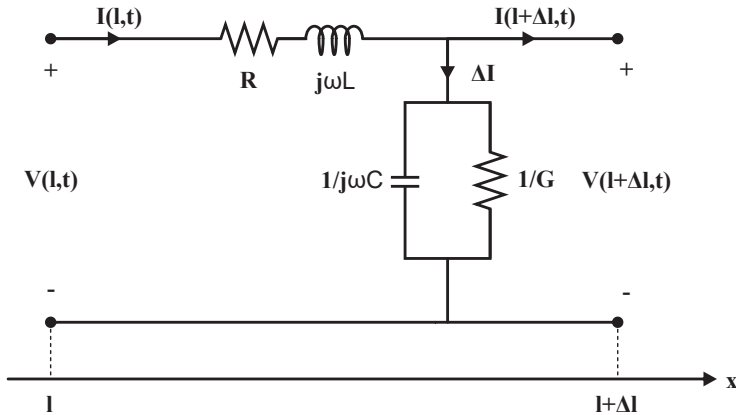


Figura B.1: Circuito L.

Para linha de transmissão do tipo coaxial, esses parâmetros podem ser obtidos a partir das dimensões e do material empregado na linha de transmissão. A figura B.2 ilustra as dimensões das partes condutoras (fios) e isolantes do cabo coaxial.

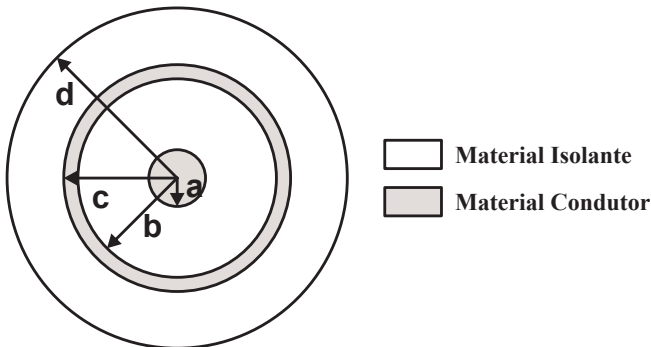


Figura B.2: Cabo coaxial.

As seguintes equações podem ser utilizadas para obtenção dos parâmetros de linha de transmissão descritos a partir das dimensões e material empregado.

$$R = \frac{1}{2\pi\delta\sigma_C} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \cdot l, \quad (\text{B.3a})$$

$$L = \frac{\mu_I}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{b}{a} \right) \cdot l, \quad (\text{B.3b})$$

$$G = \frac{2\pi\sigma_I}{\ln(b/a)} \cdot l, \quad (\text{B.3c})$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_I}{\ln(b/a)} \cdot l. \quad (\text{B.3d})$$

Sendo δ a profundidade pelicular do condutor, σ_C a condutividade elétrica do condutor, μ_I a permeabilidade magnética do isolante, ϵ_I a permissividade elétrica do isolante, a e b os raios do cabo conforme apresentado na Figura B.2 e l o comprimento do cabo.

A Figura B.3 apresenta o circuito elétrico equivalente, sendo V_G e Z_G a tensão e impedância da fonte geradora, Z_A e Z_B as impedâncias características do cabo com parâmetros concentrados e Z_C a impedância da carga.

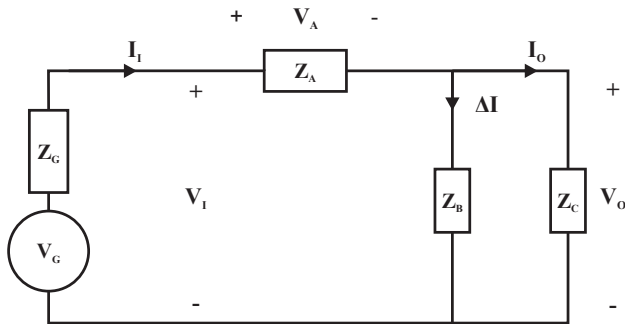


Figura B.3: Circuito equivalente com gerador, cabo e carga.

As impedâncias características, Z_A e Z_B , do cabo são,

$$Z_A = R + j\omega L, \quad (\text{B.4a})$$

$$Z_B = \frac{1}{G + j\omega C}. \quad (\text{B.4b})$$

Sendo $\omega = 2\pi f$.

B.2 MODELO ELÉTRICO PARA DUAS CARGAS EM PARALELO

Caso se tenha duas cargas conectadas em paralelo através de dois cabos, o circuito equivalente da Figura B.3 se torna o circuito equivalente apresentado na Figura B.4.

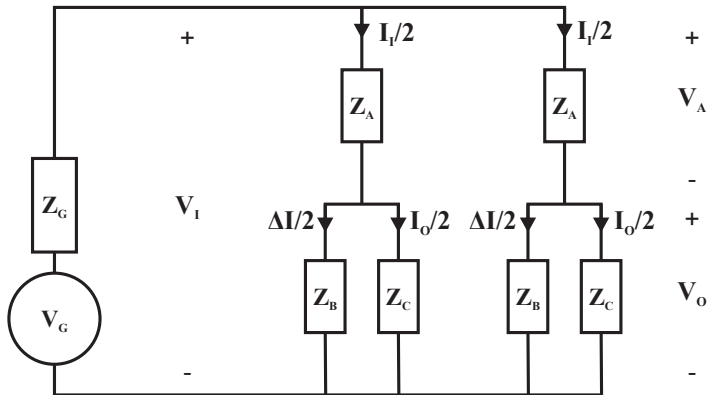


Figura B.4: Circuito equivalente com gerador, 2 cabos e 2 cargas.

Por simetria das impedâncias dos cabos e das cargas é possível simplificar o circuito. As duas impedâncias Z_A estão em paralelo e as duas impedâncias Z_B e Z_C estão em paralelo, desta forma, o circuito pode ser simplificado conforme a Figura B.5.

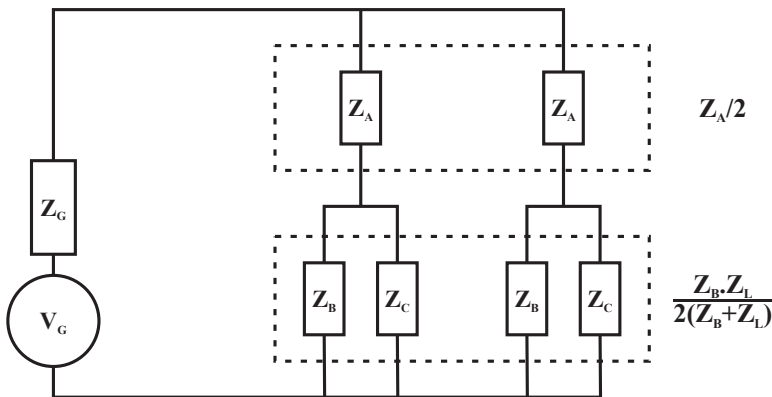


Figura B.5: Circuito simplificado com gerador, 2 cabos e 2 cargas.

B.3 FUNÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Com a função da resposta em frequência do cabo é possível avaliar a atenuação do sinal devido as perdas no cabo e a fase do sinal de saída em relação ao sinal de entrada. A função de resposta em frequência é a razão do sinal de saída pelo sinal de entrada, sendo uma função complexa. Na Figura B.5, a tensão de entrada é da placa DSAG, V_G , e a tensão de saída é das caixas acústicas V_O . Aplicando a lei de Kirchhoff de tensão e a relação tensão corrente na carga Z_C têm-se as seguintes equações,

$$V_G - Z_G \cdot I - \frac{Z_A}{2} \cdot I - \frac{Z_B \cdot Z_C}{2 \cdot (Z_B + Z_C)} \cdot I = 0, \quad (\text{B.5a})$$

$$V_O = \frac{Z_B \cdot Z_C}{2 \cdot (Z_B + Z_C)} \cdot I. \quad (\text{B.5b})$$

Na Equação (B.5a) é possível colocar o termo da corrente I em evidência e substituir a corrente I pelos termos da Equação (B.5b),

$$V_G - \left[Z_G + \frac{Z_A}{2} + \frac{Z_B \cdot Z_C}{2(Z_B \cdot Z_C)} \right] \cdot \frac{2 \cdot (Z_B + Z_C)}{Z_B + Z_C} \cdot V_O = 0. \quad (\text{B.6})$$

A função de resposta em frequência é a razão entre a tensão nas caixas acústicas (V_O) e a tensão da placa DSAG (V_G), rearranjando a equação têm-se a função de resposta em frequência,

$$\frac{V_O}{V_G} = \frac{Z_B \cdot Z_C}{(2 \cdot Z_G + Z_A) \cdot (Z_B + Z_C) + Z_B \cdot Z_C}. \quad (\text{B.7})$$

Da Equação (B.7) é possível obter o módulo e a fase da função de resposta em frequência,

$$\left| \frac{V_O}{V_G} \right| = \sqrt{\Re(V_O/V_G)^2 + \Im(V_O/V_G)^2}, \quad (\text{B.8a})$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\Im(V_O/V_G)}{\Re(V_O/V_G)} \right]. \quad (\text{B.8b})$$

**APÊNDICE C - Determinação da curva característica de
resposta do sistema de medição**

C.1 CURVA CARACTERÍSTICA DE RESPOSTA

As Figuras C.1 a C.7 apresentam as CCRs obtidas para a pressão acústica P . A pressão acústica P foi obtida do NPS após realizar uma correção de dBA para dB.

$$P = P_o \cdot 10^{[NPS+C(f)]/20}. \quad (C.1)$$

A correção em bandas de 1/1 de oitava é obtida de Gerges (2000) e Bistafa (2011), conforme o Quadro C.1.

Quadro C.1: Correção de dB para dBA em bandas de frequência de 1/1 de oitava.

| Frequência [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|-----------------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|
| Correção [dB] | 16,1 | 8,6 | 3,2 | 0,0 | -1,2 | -1,0 | 1,1 |

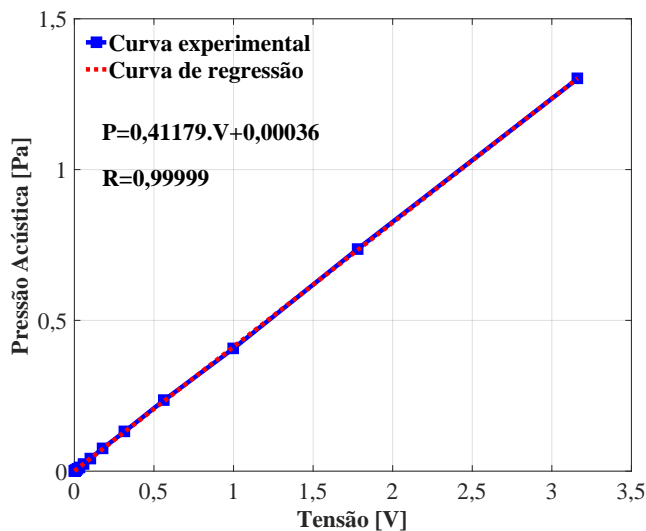


Figura C.1: Curva Característica de Resposta em 125 Hz.

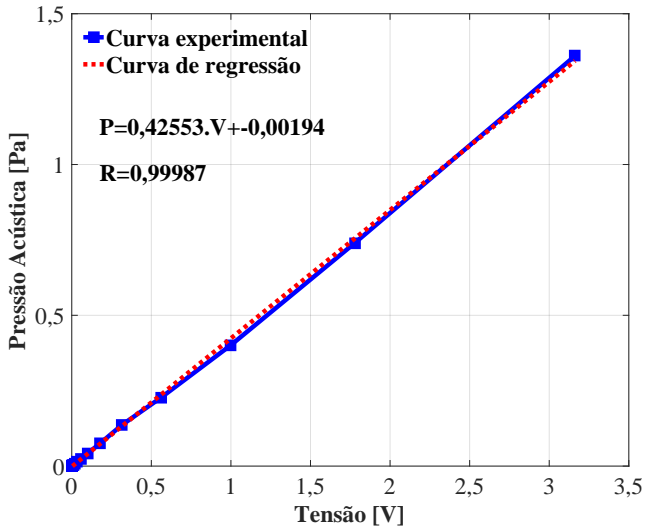


Figura C.2: Curva Característica de Resposta em 250 Hz.

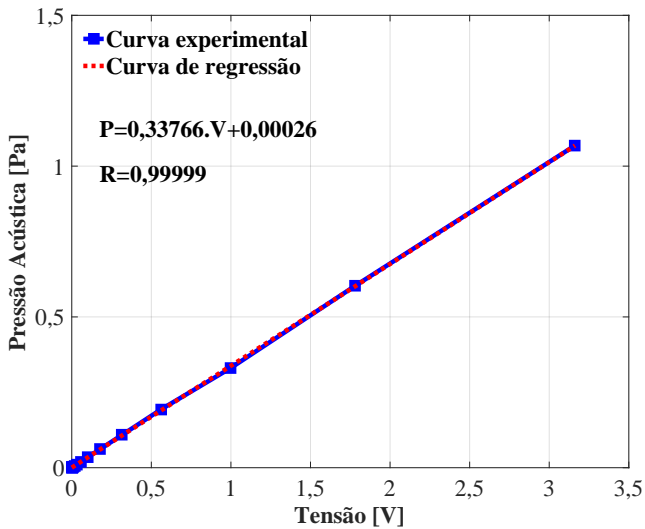


Figura C.3: Curva Característica de Resposta em 500 Hz.

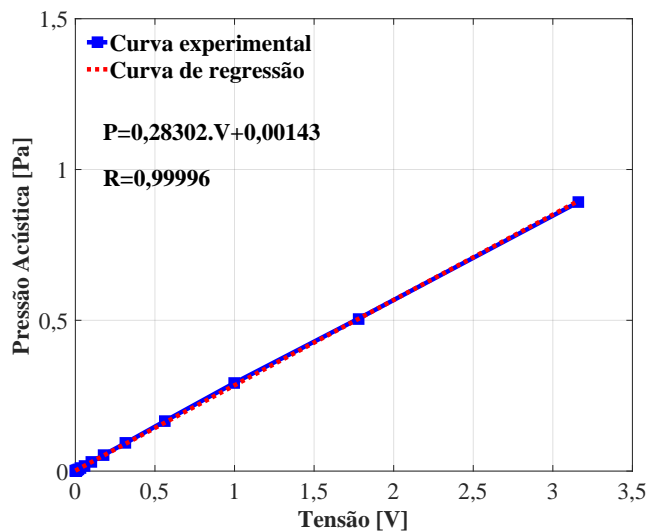


Figura C.4: Curva Característica de Resposta em 1000 Hz.

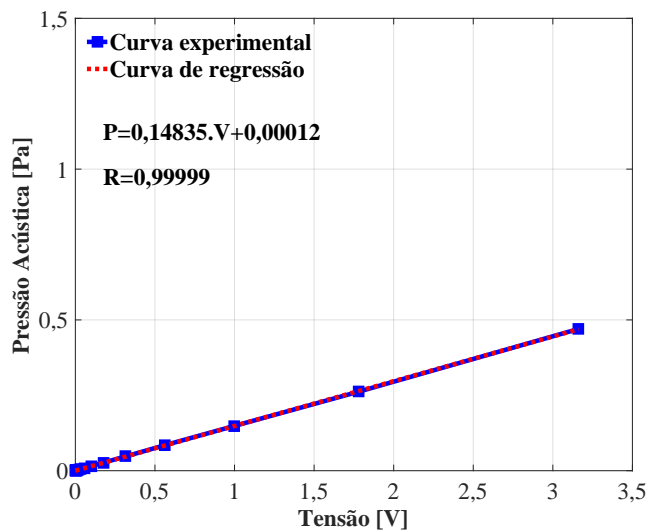


Figura C.5: Curva Característica de Resposta em 2000 Hz.

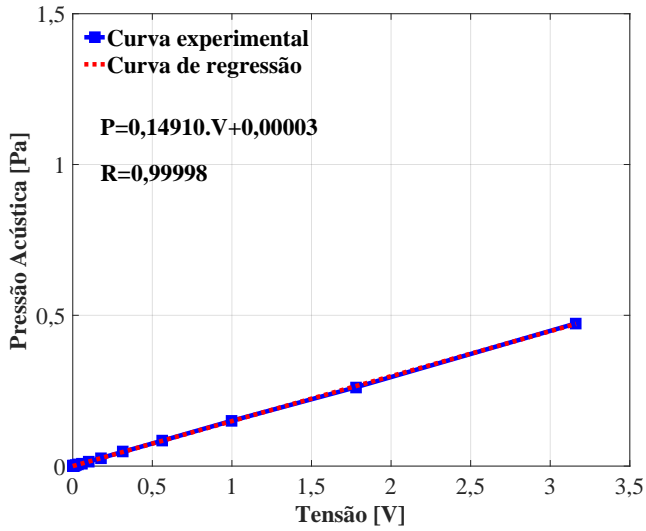


Figura C.6: Curva Característica de Resposta em 4000 Hz.

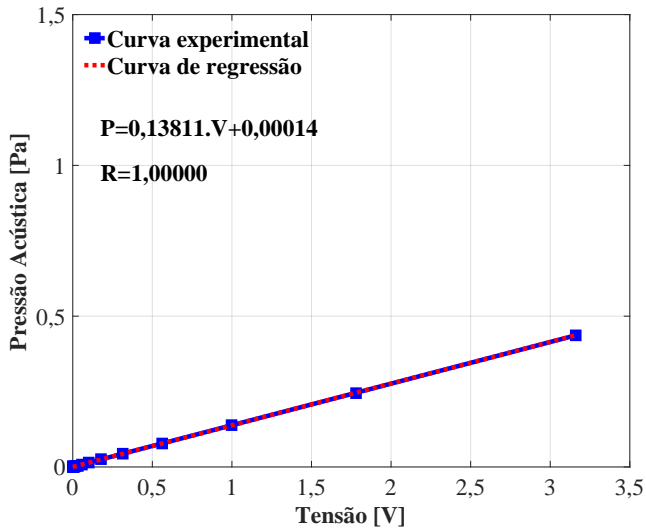


Figura C.7: Curva Característica de Resposta em 8000 Hz.

Os Quadros C.2 a C.8 apresentam os NPSs medidos com o sistema de referência, a média e o desvio padrão para cada nível de tensão para cada banda de frequência de ensaio.

Quadro C.2: NPS medidos em 125 Hz.

| Ponto | Tensão (V) | Medida (dBA) | | | | | Média (dBA) | s (dB) |
|-------|------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | 0,00010 | -4,38 | 0,2 | -3,70 | -2,88 | -0,74 | -2,30 | 1,96 |
| 2 | 0,00018 | -0,76 | -0,11 | -0,10 | -2,57 | -1,64 | -1,04 | 1,06 |
| 3 | 0,00032 | 1,56 | 2,28 | 2,82 | 0,29 | 0,46 | 1,48 | 1,11 |
| 4 | 0,00056 | 6,26 | 4,76 | 7,12 | 3,73 | 4,40 | 5,25 | 1,40 |
| 5 | 0,00100 | 11,18 | 9,27 | 11,76 | 9,50 | 9,87 | 10,32 | 1,10 |
| 6 | 0,00178 | 16,38 | 13,67 | 16,49 | 13,97 | 13,96 | 14,89 | 1,41 |
| 7 | 0,00316 | 21,22 | 19,08 | 21,85 | 19,41 | 19,30 | 20,17 | 1,27 |
| 8 | 0,00562 | 26,6 | 24,27 | 26,73 | 24,32 | 24,56 | 25,30 | 1,25 |
| 9 | 0,01000 | 31,68 | 29,33 | 32,13 | 30,10 | 29,70 | 30,59 | 1,24 |
| 10 | 0,01778 | 36,57 | 33,95 | 36,96 | 34,13 | 34,19 | 35,16 | 1,48 |
| 11 | 0,03162 | 41,37 | 39,05 | 41,61 | 39,34 | 39,47 | 40,17 | 1,22 |
| 12 | 0,05623 | 46,8 | 44,62 | 47,16 | 44,57 | 44,19 | 45,47 | 1,40 |
| 13 | 0,10000 | 51,19 | 48,97 | 52,05 | 49,51 | 49,92 | 50,33 | 1,26 |
| 14 | 0,17783 | 56,6 | 54,41 | 57,00 | 54,70 | 54,38 | 55,42 | 1,28 |
| 15 | 0,31623 | 61,5 | 58,88 | 61,91 | 59,47 | 59,52 | 60,26 | 1,35 |
| 16 | 0,56234 | 66,26 | 63,87 | 66,96 | 64,60 | 64,78 | 65,29 | 1,27 |
| 17 | 1,00000 | 71,61 | 67,98 | 71,86 | 69,28 | 69,63 | 70,07 | 1,64 |
| 18 | 1,77828 | 76,13 | 74,71 | 76,75 | 74,25 | 74,24 | 75,22 | 1,16 |
| 19 | 3,16228 | 81,44 | 79,24 | 81,36 | 79,54 | 79,26 | 80,17 | 1,13 |

Quadro C.3: NPS medidos em 250 Hz.

| Ponto | Tensão (V) | Medida (dBA) | | | | | Média (dBA) | s (dB) |
|-------|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | 0,00010 | 4,71 | 4,94 | 5,06 | 4,43 | 4,59 | 4,75 | 0,26 |
| 2 | 0,00018 | 8,79 | 8,54 | 8,52 | 7,91 | 8,34 | 8,42 | 0,33 |
| 3 | 0,00032 | 12,5 | 13,21 | 13,41 | 12,82 | 13,12 | 13,01 | 0,36 |
| 4 | 0,00056 | 17,84 | 18,36 | 18,70 | 17,95 | 18,23 | 18,22 | 0,34 |
| 5 | 0,00100 | 23,06 | 23,6 | 23,88 | 23,08 | 23,47 | 23,42 | 0,35 |
| 6 | 0,00178 | 28,01 | 28,6 | 29,00 | 28,30 | 28,74 | 28,53 | 0,38 |
| 7 | 0,00316 | 33,15 | 33,71 | 34,01 | 33,42 | 33,68 | 33,59 | 0,33 |
| 8 | 0,00562 | 38,19 | 38,83 | 39,05 | 38,37 | 38,72 | 38,63 | 0,35 |
| 9 | 0,01000 | 43,17 | 43,87 | 44,21 | 43,42 | 43,99 | 43,73 | 0,43 |
| 10 | 0,01778 | 48,28 | 48,89 | 49,14 | 48,52 | 49,03 | 48,77 | 0,36 |
| 11 | 0,03162 | 53,08 | 53,99 | 54,16 | 53,45 | 53,82 | 53,70 | 0,43 |
| 12 | 0,05623 | 58,22 | 58,65 | 59,15 | 58,44 | 58,75 | 58,64 | 0,35 |
| 13 | 0,10000 | 63,19 | 63,66 | 63,93 | 63,59 | 63,82 | 63,64 | 0,28 |
| 14 | 0,17783 | 67,99 | 68,66 | 68,93 | 68,57 | 68,48 | 68,53 | 0,34 |
| 15 | 0,31623 | 73,02 | 73,39 | 73,90 | 73,08 | 73,48 | 73,37 | 0,35 |
| 16 | 0,56234 | 77,89 | 78,54 | 78,90 | 78,08 | 78,43 | 78,37 | 0,40 |
| 17 | 1,00000 | 82,82 | 83,44 | 83,61 | 83,19 | 83,44 | 83,30 | 0,31 |
| 18 | 1,77828 | 87,7 | 87,92 | 88,45 | 87,91 | 88,27 | 88,05 | 0,30 |
| 19 | 3,16228 | 92,85 | 92,92 | 93,34 | 92,74 | 93,10 | 92,99 | 0,24 |

Quadro C.4: NPS medidos em 500 Hz.

| Ponto | Tensão (V) | Medida (dBA) | | | | | Média (dBA) | s (dB) |
|-------|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | 0,00010 | 4,71 | 4,94 | 5,06 | 4,43 | 4,59 | 4,75 | 0,26 |
| 2 | 0,00018 | 8,79 | 8,54 | 8,52 | 7,91 | 8,34 | 8,42 | 0,33 |
| 3 | 0,00032 | 12,5 | 13,21 | 13,41 | 12,82 | 13,12 | 13,01 | 0,36 |
| 4 | 0,00056 | 17,84 | 18,36 | 18,70 | 17,95 | 18,23 | 18,22 | 0,34 |
| 5 | 0,00100 | 23,06 | 23,6 | 23,88 | 23,08 | 23,47 | 23,42 | 0,35 |
| 6 | 0,00178 | 28,01 | 28,6 | 29,00 | 28,30 | 28,74 | 28,53 | 0,38 |
| 7 | 0,00316 | 33,15 | 33,71 | 34,01 | 33,42 | 33,68 | 33,59 | 0,33 |
| 8 | 0,00562 | 38,19 | 38,83 | 39,05 | 38,37 | 38,72 | 38,63 | 0,35 |
| 9 | 0,01000 | 43,17 | 43,87 | 44,21 | 43,42 | 43,99 | 43,73 | 0,43 |
| 10 | 0,01778 | 48,28 | 48,89 | 49,14 | 48,52 | 49,03 | 48,77 | 0,36 |
| 11 | 0,03162 | 53,08 | 53,99 | 54,16 | 53,45 | 53,82 | 53,70 | 0,43 |
| 12 | 0,05623 | 58,22 | 58,65 | 59,15 | 58,44 | 58,75 | 58,64 | 0,35 |
| 13 | 0,10000 | 63,19 | 63,66 | 63,93 | 63,59 | 63,82 | 63,64 | 0,28 |
| 14 | 0,17783 | 67,99 | 68,66 | 68,93 | 68,57 | 68,48 | 68,53 | 0,34 |
| 15 | 0,31623 | 73,02 | 73,39 | 73,90 | 73,08 | 73,48 | 73,37 | 0,35 |
| 16 | 0,56234 | 77,89 | 78,54 | 78,90 | 78,08 | 78,43 | 78,37 | 0,40 |
| 17 | 1,00000 | 82,82 | 83,44 | 83,61 | 83,19 | 83,44 | 83,30 | 0,31 |
| 18 | 1,77828 | 87,7 | 87,92 | 88,45 | 87,91 | 88,27 | 88,05 | 0,30 |
| 19 | 3,16228 | 92,85 | 92,92 | 93,34 | 92,74 | 93,10 | 92,99 | 0,24 |

Quadro C.5: NPS medidos em 1000 Hz.

| Ponto | Tensão (V) | Medida (dBA) | | | | | Média (dBA) | s (dB) |
|-------|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | 0,00010 | 4,71 | 4,94 | 5,06 | 4,43 | 4,59 | 4,75 | 0,26 |
| 2 | 0,00018 | 8,79 | 8,54 | 8,52 | 7,91 | 8,34 | 8,42 | 0,33 |
| 3 | 0,00032 | 12,5 | 13,21 | 13,41 | 12,82 | 13,12 | 13,01 | 0,36 |
| 4 | 0,00056 | 17,84 | 18,36 | 18,70 | 17,95 | 18,23 | 18,22 | 0,34 |
| 5 | 0,00100 | 23,06 | 23,6 | 23,88 | 23,08 | 23,47 | 23,42 | 0,35 |
| 6 | 0,00178 | 28,01 | 28,6 | 29,00 | 28,30 | 28,74 | 28,53 | 0,38 |
| 7 | 0,00316 | 33,15 | 33,71 | 34,01 | 33,42 | 33,68 | 33,59 | 0,33 |
| 8 | 0,00562 | 38,19 | 38,83 | 39,05 | 38,37 | 38,72 | 38,63 | 0,35 |
| 9 | 0,01000 | 43,17 | 43,87 | 44,21 | 43,42 | 43,99 | 43,73 | 0,43 |
| 10 | 0,01778 | 48,28 | 48,89 | 49,14 | 48,52 | 49,03 | 48,77 | 0,36 |
| 11 | 0,03162 | 53,08 | 53,99 | 54,16 | 53,45 | 53,82 | 53,70 | 0,43 |
| 12 | 0,05623 | 58,22 | 58,65 | 59,15 | 58,44 | 58,75 | 58,64 | 0,35 |
| 13 | 0,10000 | 63,19 | 63,66 | 63,93 | 63,59 | 63,82 | 63,64 | 0,28 |
| 14 | 0,17783 | 67,99 | 68,66 | 68,93 | 68,57 | 68,48 | 68,53 | 0,34 |
| 15 | 0,31623 | 73,02 | 73,39 | 73,90 | 73,08 | 73,48 | 73,37 | 0,35 |
| 16 | 0,56234 | 77,89 | 78,54 | 78,90 | 78,08 | 78,43 | 78,37 | 0,40 |
| 17 | 1,00000 | 82,82 | 83,44 | 83,61 | 83,19 | 83,44 | 83,30 | 0,31 |
| 18 | 1,77828 | 87,7 | 87,92 | 88,45 | 87,91 | 88,27 | 88,05 | 0,30 |
| 19 | 3,16228 | 92,85 | 92,92 | 93,34 | 92,74 | 93,10 | 92,99 | 0,24 |

Quadro C.6: NPS medidos em 2000 Hz.

| Ponto | Tensão (V) | Medida (dBA) | | | | | Média (dBA) | s (dB) |
|-------|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | 0,00010 | 2,09 | 2,16 | 4,80 | 1,84 | 2,11 | 2,60 | 1,24 |
| 2 | 0,00018 | 4,57 | 4,31 | 6,71 | 4,00 | 4,48 | 4,81 | 1,08 |
| 3 | 0,00032 | 8,51 | 8,06 | 10,81 | 7,85 | 8,22 | 8,69 | 1,21 |
| 4 | 0,00056 | 13,42 | 12,72 | 15,77 | 12,53 | 13,05 | 13,50 | 1,31 |
| 5 | 0,00100 | 18,59 | 17,87 | 20,93 | 17,73 | 18,08 | 18,64 | 1,32 |
| 6 | 0,00178 | 23,51 | 22,81 | 26,00 | 22,69 | 23,18 | 23,64 | 1,36 |
| 7 | 0,00316 | 28,58 | 27,97 | 30,99 | 27,66 | 28,29 | 28,70 | 1,33 |
| 8 | 0,00562 | 33,71 | 33,08 | 36,06 | 32,76 | 33,40 | 33,80 | 1,31 |
| 9 | 0,01000 | 38,81 | 38 | 41,10 | 37,84 | 38,25 | 38,80 | 1,34 |
| 10 | 0,01778 | 43,72 | 43,03 | 46,13 | 43,02 | 43,22 | 43,82 | 1,32 |
| 11 | 0,03162 | 48,62 | 48 | 51,10 | 47,86 | 48,27 | 48,77 | 1,34 |
| 12 | 0,05623 | 53,73 | 53,04 | 56,07 | 52,81 | 53,34 | 53,80 | 1,31 |
| 13 | 0,10000 | 58,75 | 57,92 | 61,04 | 57,90 | 58,24 | 58,77 | 1,32 |
| 14 | 0,17783 | 63,62 | 63,08 | 66,19 | 62,93 | 63,23 | 63,81 | 1,35 |
| 15 | 0,31623 | 68,43 | 68,05 | 71,03 | 67,84 | 68,11 | 68,69 | 1,32 |
| 16 | 0,56234 | 73,55 | 73,01 | 76,05 | 72,83 | 73,20 | 73,73 | 1,33 |
| 17 | 1,00000 | 78,23 | 78,12 | 80,87 | 77,83 | 78,05 | 78,62 | 1,27 |
| 18 | 1,77828 | 83,32 | 82,73 | 85,88 | 82,74 | 83,02 | 83,54 | 1,33 |
| 19 | 3,16228 | 88,91 | 87,62 | 90,81 | 87,74 | 88,04 | 88,62 | 1,32 |

Quadro C.7: NPS medidos em 4000 Hz.

| Ponto | Tensão (V) | Medida (dBA) | | | | | Média (dBA) | s (dB) |
|-------|------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | 0,00010 | 1,99 | 1,56 | 2,00 | 1,19 | 1,17 | 1,58 | 0,41 |
| 2 | 0,00018 | 4,87 | 3,88 | 3,97 | 3,66 | 3,61 | 4,00 | 0,51 |
| 3 | 0,00032 | 9,16 | 8,14 | 8,24 | 7,88 | 7,86 | 8,26 | 0,53 |
| 4 | 0,00056 | 14,17 | 13,05 | 13,34 | 12,83 | 12,81 | 13,24 | 0,56 |
| 5 | 0,00100 | 19,33 | 18,07 | 18,45 | 17,86 | 17,95 | 18,33 | 0,60 |
| 6 | 0,00178 | 24,44 | 23,17 | 23,51 | 23,00 | 22,85 | 23,39 | 0,63 |
| 7 | 0,00316 | 29,58 | 28,28 | 28,58 | 28,03 | 28,08 | 28,51 | 0,64 |
| 8 | 0,00562 | 34,5 | 33,29 | 33,59 | 33,02 | 33,10 | 33,50 | 0,60 |
| 9 | 0,01000 | 39,49 | 38,38 | 38,54 | 38,09 | 38,03 | 38,51 | 0,59 |
| 10 | 0,01778 | 44,55 | 43,28 | 43,70 | 43,14 | 43,08 | 43,55 | 0,61 |
| 11 | 0,03162 | 49,47 | 48,43 | 48,58 | 48,19 | 48,10 | 48,55 | 0,55 |
| 12 | 0,05623 | 54,99 | 53,27 | 53,63 | 53,05 | 53,09 | 53,61 | 0,81 |
| 13 | 0,10000 | 59,58 | 58,28 | 58,74 | 58,07 | 58,11 | 58,56 | 0,63 |
| 14 | 0,17783 | 64,59 | 63,36 | 63,59 | 63,14 | 63,07 | 63,55 | 0,62 |
| 15 | 0,31623 | 69,65 | 68,24 | 68,51 | 68,04 | 68,08 | 68,50 | 0,67 |
| 16 | 0,56234 | 74,41 | 73,3 | 73,65 | 73,10 | 73,02 | 73,50 | 0,57 |
| 17 | 1,00000 | 79,46 | 78,36 | 78,66 | 78,07 | 78,06 | 78,52 | 0,58 |
| 18 | 1,77828 | 84,28 | 83,31 | 83,64 | 82,26 | 83,12 | 83,32 | 0,74 |
| 19 | 3,16228 | 89,55 | 88,39 | 88,53 | 88,01 | 87,92 | 88,48 | 0,65 |

Quadro C.8: NPS medidos em 8000 Hz.

| Ponto | Tensão (V) | Medida (dBA) | | | | | Média (dBA) | s (dB) |
|-------|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 1 | 0,00010 | 0,02 | -0,95 | 0,00 | -0,59 | 0,04 | -0,30 | 0,45 |
| 2 | 0,00018 | 2,27 | 1,33 | 1,81 | 1,72 | 2,08 | 1,84 | 0,36 |
| 3 | 0,00032 | 6,09 | 5,3 | 6,06 | 5,76 | 5,89 | 5,82 | 0,32 |
| 4 | 0,00056 | 10,88 | 10,18 | 11,07 | 10,61 | 10,65 | 10,68 | 0,34 |
| 5 | 0,00100 | 15,92 | 15,31 | 16,22 | 15,69 | 15,76 | 15,78 | 0,33 |
| 6 | 0,00178 | 21,05 | 20,32 | 21,23 | 20,80 | 20,73 | 20,83 | 0,34 |
| 7 | 0,00316 | 26,07 | 25,4 | 26,34 | 25,79 | 25,85 | 25,89 | 0,35 |
| 8 | 0,00562 | 31,13 | 30,42 | 31,41 | 30,90 | 30,85 | 30,94 | 0,37 |
| 9 | 0,01000 | 36,14 | 35,48 | 36,46 | 35,81 | 35,13 | 35,80 | 0,53 |
| 10 | 0,01778 | 41,12 | 40,38 | 41,31 | 40,87 | 40,36 | 40,81 | 0,43 |
| 11 | 0,03162 | 46,17 | 45,46 | 46,35 | 45,89 | 45,38 | 45,85 | 0,43 |
| 12 | 0,05623 | 51,15 | 50,48 | 51,37 | 50,95 | 50,37 | 50,86 | 0,43 |
| 13 | 0,10000 | 56,18 | 55,44 | 56,42 | 55,85 | 55,41 | 55,86 | 0,45 |
| 14 | 0,17783 | 61,13 | 60,44 | 61,41 | 60,91 | 60,33 | 60,84 | 0,46 |
| 15 | 0,31623 | 66,04 | 65,49 | 66,34 | 65,88 | 65,39 | 65,83 | 0,39 |
| 16 | 0,56234 | 70,99 | 70,35 | 71,41 | 70,81 | 70,11 | 70,73 | 0,52 |
| 17 | 1,00000 | 75,95 | 75,21 | 76,37 | 75,68 | 75,29 | 75,70 | 0,48 |
| 18 | 1,77828 | 80,99 | 79,99 | 81,26 | 80,62 | 80,58 | 80,69 | 0,48 |
| 19 | 3,16228 | 85,88 | 85,2 | 86,11 | 85,65 | 85,58 | 85,68 | 0,34 |

APÊNDICE D - Incerteza padrão do sistema de referência

D.1 SISTEMA DE REFERÊNCIA

O sistema de referência é composto pelo calibrador acústico, microfone e analisador portátil.

D.2 CALIBRADOR ACÚSTICO

As fontes de informação referentes a estimativa de incerteza do calibrador acústico 4321 da Brüel & Kjaer são o catálogo e manuais do fabricante e o certificado de calibração mais recente. As seguintes fontes de incerteza foram consideradas:

- Nível de pressão sonora (NPS);
- Distorção (D);
- Deriva temporal ($Tempo$);
- Deriva térmica ($Temp.$);
- Pressão atmosférica (P);
- Umidade relativa (UR).

Nos próximos itens serão apresentadas as estimativas da incerteza padrão de cada fonte de incerteza.

D.2.1 Nível de pressão sonora

O calibrador acústico gera NPS de **94** e **114** dB na frequência de **1** kHz (tom puro), somente a incerteza devido a geração de ruído em **94** dB será avaliada, pois somente esta é utilizada. A estimativa da incerteza padrão herdada do certificado de calibração do NPS é obtida através de

$$u_{NPS} = \frac{U_{NPS}}{t}. \quad (D.1)$$

Sendo u_{NPS} a estimativa da incerteza padrão do NPS gerada pelo calibrador, U_{NPS} a incerteza expandida e t o coeficiente t de *Student* fornecidos no certificado de calibração, ou caso não existir, no manual de funcionamento do equipamento. De acordo com o certificado de calibração a incerteza expandida é **0,12** dB com um coeficiente t de *Student* de **2**, logo

$$u_{NPS} = \frac{0,12}{2} = 0,06000 \text{ dB.} \quad (\text{D.2})$$

D.2.2 Distorção

O gerador de sinais do calibrador acústico gera distorções no NPS emitido. Essa distorção pode ser expressa em percentual em relação a tensão gerada pelo circuito do calibrador acústico. A estimativa da incerteza padrão é calculada por

$$u_D = \frac{U_D}{t}. \quad (\text{D.3})$$

Sendo u_D a estimativa da incerteza padrão da distorção, U_D a incerteza expandida e t o coeficiente t de *Student* fornecidos no certificado de calibração, ou caso não existir, no manual de funcionamento do equipamento. De acordo com o certificado de calibração, a estimativa da incerteza padrão distorção é **0,12 %** em relação a tensão, com um coeficiente t de *Student* de **2**, logo,

$$u_D = \frac{20}{2} \log_{10} \left(\frac{V + 0,0012 \cdot V}{V} \right) = 0,04322 \text{ dB.} \quad (\text{D.4})$$

D.2.3 Deriva temporal

De acordo com Pedroso (2002), a deriva temporal do calibrador acústico, que reflete a estabilidade em função do tempo, não é perfeita. Este efeito deve ser considerado para estimar a incerteza padrão do calibrador acústico. É possível estimar essa incerteza padrão comparando o resultado de três ou mais certificados de calibração e confeccionar um gráfico ao longo do tempo. Caso não seja possível, deve-se buscar essa informação no catálogo ou manual do calibrador acústico. A estimativa da incerteza padrão devido a deriva temporal pode ser calculada considerando uma distribuição de probabilidade uniforme,

$$u_{Tempo} = \frac{c_{Tempo} \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \quad (\text{D.5})$$

Sendo c o coeficiente de sensibilidade em dB/ano e Δt o tempo. De acordo com o catálogo do calibrador acústico a deriva temporal é

0,05 dB/ano. O calibrador acústico é calibrado a cada **2** anos, desta forma, no pior caso, a estimativa da incerteza padrão é

$$u_{Tempo} = \frac{0,05 \cdot 2}{\sqrt{3}} = 0,05774 \text{ dB.} \quad (\text{D.6})$$

D.2.4 Deriva térmica

O NPS dentro da cavidade do calibrador acústico pode variar dependendo da temperatura do ambiente onde ele está sendo utilizado. Essa incerteza padrão pode ser estimada através do coeficiente de sensibilidade da temperatura e a temperatura do ambiente em que é utilizado o calibrador acústico e considerando uma distribuição de probabilidade uniforme, desta forma,

$$u_{Temp.} = \frac{c_{Temp.} \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}. \quad (\text{D.7})$$

Sendo c o coeficiente de sensibilidade em dB/°C e ΔT a diferença entre a temperatura ambiente do local de utilização do calibrador acústico e a temperatura de referência. De acordo com o catálogo do calibrador acústico, o coeficiente de sensibilidade é **0,0015** dB/°C e a temperatura de referência é **25** °C. Considera-se uma faixa de operação de **10** °C a **30** °C, desta forma, a estimativa da incerteza padrão devido a deriva térmica é

$$u_{Temp.} = \frac{0,0015 \cdot 20}{\sqrt{3}} = 0,01732 \text{ dB.} \quad (\text{D.8})$$

D.2.5 Pressão atmosférica

A variação da pressão atmosférica pode influenciar o NPS dentro da cavidade do calibrador acústico. Essa incerteza padrão pode ser estimada através do coeficiente de sensibilidade da pressão atmosférica e a variação da pressão atmosférica do local onde o calibrador acústico é utilizado e considerando uma distribuição de probabilidade uniforme, desta forma,

$$u_P = \frac{c_P \cdot \Delta P}{\sqrt{3}}. \quad (\text{D.9})$$

Sendo c o coeficiente de sensibilidade em dB/Pa e ΔP a diferença entre a pressão atmosférica ambiente do local de utilização do calibrador acústico e a pressão atmosférica de referência. De acordo com o catálogo do calibrador acústico, o coeficiente de sensibilidade é 8.10^{-4} dB/kPa e a pressão atmosférica de referência é **101** kPa. De acordo com Pedroso (2002), a variação da pressão atmosférica ao longo do tempo em Florianópolis-SC é de aproximadamente **2** kPa, desta forma, a estimativa de incerteza padrão devido a pressão atmosférica é

$$u_P = \frac{8.10^{-4}.2}{\sqrt{3}} = 0,00093 \text{ dB.} \quad (\text{D.10})$$

D.2.6 Umidade relativa

A variação da umidade relativa do ar pode influenciar o NPS dentro da cavidade do calibrador acústico. Essa incerteza padrão pode ser estimada através do coeficiente de sensibilidade da umidade relativa e a variação da umidade relativa do local onde o calibrador acústico é utilizado e considerando uma distribuição de probabilidade uniforme, desta forma,

$$u_{UR} = \frac{c_{UR} \cdot \Delta \%UR}{\sqrt{3}}. \quad (\text{D.11})$$

Sendo c o coeficiente de sensibilidade em dB/%UR e $\Delta \%UR$ a diferença entre a umidade relativa ambiente do local de utilização do calibrador acústico e a umidade relativa de referência. De acordo com o catálogo do calibrador acústico, o coeficiente de sensibilidade é **0,001** dB/%UR e a umidade relativa de referência é **50** %UR. Considera-se uma faixa de operação de **10** %UR a **90** %UR, desta forma, a estimativa da incerteza padrão devido a umidade relativa é

$$u_{UR} = \frac{0,001.80}{\sqrt{3}} = 0,04619 \text{ dB.} \quad (\text{D.12})$$

D.2.7 Incerteza padrão do calibrador acústico

A estimativa padrão do calibrador acústico é composta pelas fontes de incertezas apresentadas da seção D.2.1 à D.2.6. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes, a Equação (2.19) é utilizada para obter

a estimativa da incerteza combinada do calibrador acústico,

$$u_{\text{Calibrador}}^2 = u_{\text{NPS}}^2 + u_{\text{D}}^2 + u_{\text{Tempo}}^2 + u_{\text{Temp.}}^2 + u_{\text{P}}^2 + u_{\text{UR}}^2. \quad (\text{D.13})$$

O número de graus de liberdade da fonte de incerteza do NPS e da distorção é considerado infinito, uma vez que no catálogo foi informado um coeficiente t de *Student* de **2** para uma distribuição de probabilidade normal com faixa de abrangência de **95** %. Nada foi informado quanto ao número de graus de liberdade. O número de graus de liberdade da deriva temporal, deriva térmica, pressão atmosférica e umidade relativa foi considerado infinito, pois estas fontes de incerteza são consideradas do tipo B. O número de graus de liberdade é obtido através da Equação (2.20).

Utilizando os valores obtidos da seção D.2.1 à D.2.6, têm-se,

$$u_{\text{Calibrador}}^2 = 0,06000^2 + 0,00521^2 + 0,05774^2 + \dots \\ \dots + 0,01732^2 + 0,00092^2 + 0,04619^2, \quad (\text{D.14})$$

$$u_{\text{Calibrador}} = 0,09693 \text{ dB}, \quad (\text{D.15a})$$

$$\nu_{\text{Calibrador}} = \infty. \quad (\text{D.15b})$$

D.3 MICROFONE

As fontes de informação referentes a estimativa de incerteza do microfone 4955 da Brüel & Kjaer são o catálogo e manuais do fabricante. As seguintes fontes de incerteza foram consideradas:

- Resposta em frequência (**RF**);
- Distorção (**D**);
- Deriva temporal (**Tempo**);
- Deriva térmica (**Temp**);
- Pressão atmosférica (**P**);
- Umidade relativa (**UR**).

Nos próximos itens serão apresentadas as estimativas da incerteza padrão de cada fonte de incerteza.

D.3.1 Resposta em frequência

A resposta em frequência do microfone não é perfeitamente plana devido as não idealidades do transdutor e circuito elétrico. Esse microfone nunca foi calibrado, desta forma, não há como estimar a incerteza padrão da resposta em frequência desse microfone. Apesar disso, o catálogo do microfone e manuais do fabricante fornecem o erro aleatório máximo do microfone (considerando o pré-amplificador) e essas informações serão utilizadas para estimar a incerteza padrão da resposta em frequência. É considerada uma distribuição de probabilidade uniforme dessa fonte de incerteza, desta forma,

$$u_{RF} = \frac{\pm \mathbf{Erro}_{RF}}{\sqrt{3}}. \quad (\text{D.16})$$

Sendo u_{RF} a incerteza padrão e \mathbf{Erro}_{RF} o erro aleatório da resposta em frequência. De acordo com o catálogo e manuais do fabricante, o erro aleatório máximo é $\pm 0,5$ dB, logo

$$u_{RF} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = \mathbf{0,28868} \text{ dB}. \quad (\text{D.17})$$

D.3.2 Distorção

O circuito elétrico do microfone gera distorções elétricas. Essa distorção pode ser expressa em percentual em relação a tensão de saída do microfone com uma distribuição de probabilidade uniforme,

$$u_D = \frac{\pm \mathbf{Erro}_D}{\sqrt{3}}. \quad (\text{D.18})$$

Sendo u_D a estimativa da incerteza padrão da distorção, \mathbf{Erro}_D o erro aleatório da distorção fornecido no certificado de calibração, ou caso não existir, no manual de funcionamento do equipamento. De acordo com o catálogo do microfone, o erro máximo da distorção é $\mathbf{0,003}$ % em relação a tensão, logo,

$$u_D = \frac{20 \log_{10} \left(\frac{V + 0,00003.V}{V} \right)}{\sqrt{3}} = \mathbf{0,00015} \text{ dB}. \quad (\text{D.19})$$

D.3.3 Deriva temporal

A deriva temporal do microfone acústico, que reflete a estabilidade em função do tempo, não é perfeita. Este efeito deve ser considerado para estimar a incerteza padrão do microfone. É possível estimar essa incerteza padrão comparando o resultado de três ou mais certificados de calibração e confeccionar um gráfico ao longo do tempo. Caso não seja possível, deve-se buscar essa informação no catálogo ou manual do calibrador acústico. A estimativa da incerteza padrão devido a deriva temporal pode ser calculada por, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme,

$$u_{Tempo} = \frac{c_{Tempo} \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \quad (D.20)$$

Sendo c o coeficiente de sensibilidade em dB/ano e Δt o tempo. De acordo com os dados do fabricante e o catálogo do microfone, a deriva temporal é **0,003** dB/ano. O microfone possui **3** anos, desta forma, no pior caso, a estimativa da incerteza padrão é

$$u_{Tempo} = \frac{0,003 \cdot 3}{\sqrt{3}} = 0,00520 \text{ dB}. \quad (D.21)$$

D.3.4 Deriva térmica

A leitura do NPS pelo microfone pode variar dependendo da temperatura do ambiente onde ele está sendo utilizado, devido a sensibilidade do transdutor e do circuito elétrico. Essa incerteza padrão pode ser estimada através do coeficiente de sensibilidade da temperatura e a temperatura do ambiente em que é utilizado o microfone e considerando uma distribuição de probabilidade uniforme, desta forma,

$$u_{Temp.} = \frac{c_{Temp.} \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}. \quad (D.22)$$

Sendo c o coeficiente de sensibilidade em dB/°C e ΔT a diferença entre a temperatura ambiente do local de utilização do calibrador acústico e a temperatura de referência. De acordo com o catálogo do calibrador acústico, o coeficiente de sensibilidade é **0,01** dB/°C e a temperatura de referência é **25** °C. Considera-se uma faixa de operação de **10** °C a **30** °C, desta forma, a estimativa da incerteza padrão devido a deriva térmica é

$$u_{Temp.} = \frac{0,01.20}{\sqrt{3}} = 0,11547 \text{ dB.} \quad (\text{D.23})$$

D.3.5 Pressão atmosférica

A leitura do NPS pelo microfone pode variar dependendo da pressão atmosférica do ambiente onde ele está sendo utilizado, devido a sensibilidade do transdutor e do circuito elétrico. Essa incerteza padrão pode ser estimada através do coeficiente de sensibilidade da pressão atmosférica e a pressão atmosférica do ambiente em que é utilizado o microfone e considerando uma distribuição de probabilidade uniforme, desta forma,

$$u_P = \frac{c_P \cdot \Delta P}{\sqrt{3}}. \quad (\text{D.24})$$

Sendo c o coeficiente de sensibilidade em dB/Pa e ΔP a diferença entre a pressão atmosférica ambiente do local de utilização do microfone e a pressão atmosférica de referência. De acordo com o catálogo do microfone, o coeficiente de sensibilidade é **0,03** dB/kPa e a pressão atmosférica de referência é **101** kPa. De acordo com Pedroso (2002), a variação da pressão atmosférica ao longo do tempo em Florianópolis-SC é de aproximadamente **2** kPa, desta forma, a estimativa de incerteza padrão devido a pressão atmosférica é

$$u_P = \frac{0,03.2}{\sqrt{3}} = 0,03464 \text{ dB.} \quad (\text{D.25})$$

D.3.6 Umidade relativa

A leitura do NPS pelo microfone pode variar dependendo da umidade relativa do ambiente onde ele está sendo utilizado, devido a sensibilidade do transdutor e do circuito elétrico. A estimativa da incerteza padrão da umidade relativa pode ser obtida através do erro, considerando uma distribuição de probabilidade uniforme,

$$u_{UR} = \frac{\pm \text{Erro}\%_{UR}}{\sqrt{3}}. \quad (\text{D.26})$$

De acordo com o catálogo do microfone o erro devido a umidade relativa do ar é inferior a **0,1** dB, desta forma, a estimativa da incerteza

padrão da umidade relativa é

$$u_{UR} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,05774 \text{ dB.} \quad (\text{D.27})$$

D.3.7 Incerteza padrão do microfone

A estimativa padrão do microfone é composta pelas fontes de incertezas apresentadas da seção D.3.1 à D.3.6. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada do microfone,

$$u_{Microfone}^2 = u_{RF}^2 + u_D^2 + u_{Tempo}^2 + u_{Temp.}^2 + u_P^2 + u_{UR}^2. \quad (\text{D.28})$$

O número de graus de liberdade da resposta em frequência, distorção, deriva temporal, deriva térmica, pressão atmosférica e umidade relativa é considerado infinito, pois, estas fontes de incerteza são consideradas do tipo B. O número de graus de liberdade é obtido através da Equação (2.20).

Utilizando os valores obtidos da seção D.3.1 à D.3.6, têm-se,

$$u_{Microfone}^2 = 0,28868^2 + 0,00015^2 + 0,00520^2 + \dots \\ \dots + 0,11547^2 + 0,03464^2 + 0,05774^2, \quad (\text{D.29})$$

$$u_{Microfone} = 0,31816 \text{ dB,} \quad (\text{D.30a})$$

$$\nu_{Microfone} = \infty. \quad (\text{D.30b})$$

D.4 ANALISADOR PORTÁTIL

As fontes de informação referentes a estimativa de incerteza do analisador portátil 2250 da Brüel & Kjaer são o catálogo e manuais do fabricante e o certificado de calibração mais recente. As seguintes fontes de incerteza foram consideradas:

- Resposta em frequência (**RF**);

- Linearidade (L);
- Detector RMS¹ (RMS);
- Média temporal para Leq (Leq);
- Resolução (R);

Nos próximos itens serão apresentadas as estimativas da incerteza padrão de cada fonte de incerteza.

D.4.1 Resposta em frequência

A resposta em frequência do analisador portátil não é perfeitamente plana devido as não idealidades do circuito elétrico e processamento do sinal. A calibração desse equipamento contempla um ensaio para determinar o desvio da resposta em frequência com ponderação A, o certificado de calibração fornece a estimativa da incerteza expandida deste ensaio. A estimativa da incerteza padrão herdada do certificado de calibração é obtida através de

$$u_{RF} = \frac{U_{RF}}{t}. \quad (D.31)$$

Sendo u_{RF} a incerteza padrão da resposta em frequência, U_{RF} a incerteza expandida e t o coeficiente t de *Student* fornecidos no certificado de calibração. De acordo com o certificado de calibração a incerteza expandida é **0,2** dB com um coeficiente t de *Student* de **2**.

$$u_{RF} = \frac{0,2}{2} = 0,10000 \text{ dB}. \quad (D.32)$$

D.4.2 Linearidade

A resposta do analisador portátil ao sinais elétricos provenientes do microfone não é perfeitamente linear devido as não idealidades dos circuitos elétricos e processamento do sinal. A calibração desse equipamento contempla um ensaio para determinar o desvio da linearidade em função da tensão, o certificado de calibração fornece a estimativa da incerteza expandida desse ensaio. A estimativa da incerteza padrão herdada do certificado de calibração é obtida através de

$$u_L = \frac{U_L}{t}. \quad (D.33)$$

¹Root Mean Square

Sendo u_L a incerteza padrão da linearidade, U_L a incerteza expandida e t o coeficiente t de *Student* fornecidos no certificado de calibração. De acordo com o certificado de calibração a incerteza expandida é de **0,3** dB, para NPS abaixo de **42** dB com um coeficiente t de *Student* de **2**.

$$u_L = \frac{0,3}{2} = 0,15000 \text{ dB.} \quad (\text{D.34})$$

D.4.3 Detector RMS

O analisador portátil possui um dispositivo detector RMS que, segundo Gerges (2000) e Bistafa (2011), é utilizado para obter o valor eficaz (RMS) da forma de onda incidente no microfone. Esse dispositivo não é ideal e contém erros. A calibração desse equipamento contempla um ensaio para determinar o desvio do detector RMS para diferentes tipos de estímulos elétricos, o certificado de calibração fornece uma estimativa da incerteza expandida desse ensaio. A estimativa de incerteza padrão herdada do certificado de calibração é obtida através de

$$u_{RMS} = \frac{U_{RMS}}{t}. \quad (\text{D.35})$$

Sendo u_{RMS} a incerteza padrão do detector RMS, U_{RMS} a incerteza expandida e t o coeficiente t de *Student* fornecidos no certificado de calibração. De acordo com o certificado de calibração a incerteza expandida é **0,2** dB com um coeficiente t de *Student* de **2**.

$$u_{RMS} = \frac{0,2}{2} = 0,10000 \text{ dB.} \quad (\text{D.36})$$

D.4.4 Média temporal

O analisador portátil possui um dispositivo que processa a média do sinal que é utilizado para obter o valor do Leq^2 da forma de onda. Esse dispositivo não é ideal e contém erros. A calibração desse equipamento contempla um ensaio para determinar o desvio do dispositivo que processa a média, o certificado de calibração fornece uma estimativa da incerteza expandida desse ensaio. A estimativa de incerteza padrão herdada do certificado de calibração é obtida através de

²Nível sonoro equivalente, Gerges (2000).

$$u_{Leq} = \frac{U_{Leq}}{t}. \quad (D.37)$$

Sendo u_{Leq} a incerteza padrão do dispositivo, U_{Leq} a incerteza expandida e t o coeficiente t de *Student* fornecidos no certificado de calibração. De acordo com o certificado de calibração a incerteza expandida é **0,2** dB com um coeficiente t de *Student* de **2**.

$$u_{Leq} = \frac{0,2}{2} = 0,10000 \text{ dB}. \quad (D.38)$$

D.4.5 Resolução

O analisador portátil possui um dispositivo indicador com interface de leitura digital. De acordo com Albertazzi e Sousa (2008), “a resolução é a menor diferença entre as indicações que pode ser significativamente percebida”. Em mostradores digitais, a resolução é o incremento digital do mostrador. Para estimar a incerteza padrão da resolução considera-se uma distribuição de probabilidade uniforme, desta forma,

$$u_R = \frac{R/2}{\sqrt{3}}. \quad (D.39)$$

Sendo u_R a incerteza padrão da resolução e R a resolução do mostrador digital. O analisador portátil apresenta no display os valores de NPS com uma resolução de **0,1** dB mas armazena esses valores com uma resolução de **0,01** dB. Os valores utilizados para as análises são os armazenados, desta forma, a estimativa da incerteza padrão da resolução é

$$u_R = \frac{0,01}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00289 \text{ dB}. \quad (D.40)$$

D.4.6 Incerteza padrão do analisador portátil

A estimativa padrão do analisador portátil é composta pelas fontes de incertezas apresentadas da seção D.4.1 à D.4.5. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada do microfone,

$$u_{\text{Analisador}}^2 = u_{RF}^2 + u_L^2 + u_{RMS}^2 + u_{Leq}^2 + u_R^2. \quad (\text{D.41})$$

O número de graus de liberdade da fonte de incerteza da resposta em frequência, linearidade, detector RMS e Leq é considerado infinito, uma vez que, no certificado de calibração foi informado um coeficiente t de *Student* de **2** para uma distribuição de probabilidade normal com faixa de abrangência de **95** %. Nada foi informado quanto ao número de graus de liberdade. O número de grau de liberdade da resolução foi considerado infinito, pois, esta fonte de incerteza é considerada do tipo B. O número de graus de liberdade é obtido através da Equação (2.20).

Utilizando os valores obtidos da seção D.3.1 à D.3.6, têm-se,

$$u_{\text{Analisador}}^2 = 0,10000^2 + 0,15000^2 + \dots \\ \dots + 0,10000^2 + 0,10000^2 + 0,00289^2, \quad (\text{D.42})$$

$$u_{\text{Analisador}} = 0,22913 \text{ dB}, \quad (\text{D.43a})$$

$$\nu_{\text{Analisador}} = \infty. \quad (\text{D.43b})$$

D.5 INCERTEZA PADRÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA

A estimativa padrão do sistema de referência é composta pelo calibrador acústico, microfone e analisador portátil, apresentados da seção D.2 à D.4. Considera-se que estas estimativas de incerteza não são correlacionadas, ou seja, são estatisticamente independentes. A Equação (2.19) é utilizada para obter a estimativa da incerteza combinada do sistema de referência,

$$u_{SR}^2 = u_{\text{Calibrador}}^2 + u_{\text{Microfone}}^2 + u_{\text{Analisador}}^2. \quad (\text{D.44})$$

O número de graus de liberdade da fonte de incerteza do calibrador acústico, microfone e analisador portátil é considerado infinito, conforme apresentado na seção D.2 à D.4. O número de graus de liberdade é obtido através da Equação (2.20). Utilizando os valores obtidos da seção D.2.7, D.3.7 e D.4.6, têm-se,

$$u_{SR}^2 = 0,09693^2 + 0,31816^2 + 0,22913^2, \quad (\text{D.45})$$

$$u_{SR} = 0,40389 \text{ dB}, \quad (\text{D.46a})$$

$$\nu_{SR} = \infty. \quad (\text{D.46b})$$

APÊNDICE E – Resultado das medições do campo acústico

E.1 RESULTADO DAS MEDIÇÕES DO CAMPO ACÚSTICO

O Quadro E.1 apresenta o erro de cada banda de frequência do ensaio. Os Quadros E.2 a E.8 apresentam a diferença do NPS das posições em relação ao NPS do ponto de referência.

Quadro E.1: Erro máximo de cada banda de frequência do ensaio.

| Frequência (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Erro Máximo (dB) | 3,78 | 2,10 | 2,01 | 1,58 | 1,32 | 2,39 | 2,02 |

Quadro E.2: NPS relativo ao ponto de referência em 125 Hz.

| Posição | Medição (dB) | | | | |
|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $+x$ | 0,17 | 0,08 | 2,02 | 0,11 | -0,23 |
| $-x$ | -0,13 | -0,28 | 1,72 | -0,44 | 0,50 |
| $+y$ | -0,53 | 0,09 | 1,22 | -0,48 | -0,04 |
| $-y$ | 0,87 | -0,37 | -2,28 | -0,35 | 0,21 |
| $+z$ | -2,23 | -1,21 | -3,78 | -1,53 | -2,18 |
| $-z$ | 1,87 | 1,70 | 1,12 | 2,67 | 1,74 |

Quadro E.3: NPS relativo ao ponto de referência em 250 Hz.

| Posição | Medição (dB) | | | | |
|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $+x$ | -0,22 | 0,17 | 0,87 | -1,07 | -0,34 |
| $-x$ | 1,78 | 1,61 | 1,37 | 0,45 | 0,16 |
| $+y$ | -0,32 | -0,34 | -0,03 | -0,89 | -0,39 |
| $-y$ | -0,92 | -0,64 | -0,33 | 0,55 | 1,02 |
| $+z$ | -1,62 | -1,02 | -1,33 | -1,11 | -0,68 |
| $-z$ | 1,28 | 0,22 | -0,53 | 2,10 | 0,23 |

Quadro E.4: NPS relativo ao ponto de referência em 500 Hz.

| Posição | Medição (dB) | | | | |
|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $+x$ | 0,45 | 0,59 | 1,62 | 1,42 | 0,23 |
| $-x$ | 1,55 | 2,01 | 0,72 | -0,43 | 0,75 |
| $+y$ | 0,35 | -1,21 | 0,12 | -0,72 | -0,48 |
| $-y$ | -1,75 | -0,44 | -1,18 | -0,17 | 0,94 |
| $+z$ | 0,25 | -0,99 | -0,78 | 0,49 | -0,17 |
| $-z$ | -0,85 | 0,02 | -0,48 | -0,60 | -1,26 |

Quadro E.5: NPS relativo ao ponto de referência em 1000 Hz.

| Posição | Medição (dB) | | | | |
|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $+x$ | -0,22 | -0,83 | -0,83 | -0,13 | -0,58 |
| $-x$ | -0,02 | 0,48 | 0,48 | -0,23 | 1,16 |
| $+y$ | -0,22 | -1,04 | -1,04 | -0,34 | -0,78 |
| $-y$ | 0,48 | 0,05 | 0,05 | -0,13 | -1,58 |
| $+z$ | -0,12 | 0,91 | 0,91 | 0,66 | 1,18 |
| $-z$ | 0,08 | 0,44 | 0,44 | 0,15 | 0,61 |

Quadro E.6: NPS relativo ao ponto de referência em 2000 Hz.

| Posição | Medição (dB) | | | | |
|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $+x$ | 0,35 | -0,13 | 0,08 | 0,30 | -0,58 |
| $-x$ | -0,55 | -0,04 | 0,28 | 0,11 | -0,13 |
| $+y$ | -0,25 | 0,37 | 0,58 | -0,29 | -1,32 |
| $-y$ | 0,05 | -0,12 | 0,18 | -0,20 | 0,67 |
| $+z$ | 0,05 | 0,19 | 0,08 | -0,03 | 0,86 |
| $-z$ | 0,35 | -0,29 | -1,22 | 0,08 | 0,52 |

Quadro E.7: NPS relativo ao ponto de referência em 4000 Hz.

| Posição | Medição (dB) | | | | |
|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $+x$ | 0,00 | 0,33 | 0,65 | -0,08 | 0,55 |
| $-x$ | -0,70 | -0,07 | 0,05 | 0,66 | 0,29 |
| $+y$ | 0,70 | -0,51 | 0,65 | 0,68 | -1,37 |
| $-y$ | 0,30 | 0,57 | 0,45 | 0,56 | 0,26 |
| $+z$ | 0,70 | -0,04 | 0,05 | 0,57 | 0,47 |
| $-z$ | -1,00 | -0,28 | -1,85 | -2,39 | -0,19 |

Quadro E.8: NPS relativo ao ponto de referência em 8000 Hz.

| Posição | Medição (dB) | | | | |
|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $+x$ | -0,23 | -0,04 | -0,38 | -0,09 | 0,43 |
| $-x$ | -0,33 | 0,09 | -0,18 | 0,52 | -0,16 |
| $+y$ | -0,53 | 0,22 | 0,02 | 0,76 | -0,86 |
| $-y$ | 0,17 | 0,57 | -0,08 | 0,21 | 0,37 |
| $+z$ | 0,77 | 0,09 | 1,22 | 0,60 | -0,30 |
| $-z$ | 0,17 | -0,94 | -0,58 | -2,02 | 0,53 |

ANEXO A - Coeficiente t de Student

A.1 COEFICIENTE T DE STUDENT

O Quadro A.1 apresenta os coeficientes t de *Student* para diferentes faixa de abrangência (probabilidade).

Quadro A.1: Coeficiente t de *Student*.

| Graus de liberdade | 1σ 68,27% | $1,96\sigma$ 95,00% | $2,00\sigma$ 95,45% | $2,58\sigma$ 99,00% | $3,00\sigma$ 99,73% |
|--------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 1,837 | 12,706 | 13,968 | 63,656 | 235,811 |
| 2 | 1,321 | 4,303 | 4,527 | 9,925 | 19,206 |
| 3 | 1,197 | 3,182 | 3,307 | 5,841 | 9,219 |
| 4 | 1,142 | 2,776 | 2,869 | 4,604 | 6,620 |
| 5 | 1,111 | 2,571 | 2,649 | 4,032 | 5,070 |
| 6 | 1,091 | 2,447 | 2,517 | 3,707 | 4,904 |
| 7 | 1,077 | 2,365 | 2,429 | 3,499 | 4,530 |
| 8 | 1,067 | 2,306 | 2,366 | 3,355 | 4,277 |
| 9 | 1,059 | 2,262 | 2,320 | 3,250 | 4,094 |
| 10 | 1,053 | 2,228 | 2,284 | 3,169 | 3,957 |
| 11 | 1,048 | 2,201 | 2,255 | 3,106 | 3,850 |
| 12 | 1,043 | 2,179 | 2,231 | 3,055 | 3,764 |
| 13 | 1,040 | 2,160 | 2,212 | 3,012 | 3,694 |
| 14 | 1,037 | 2,145 | 2,195 | 2,977 | 3,636 |
| 15 | 1,034 | 2,131 | 2,181 | 2,947 | 3,586 |
| 16 | 1,032 | 2,120 | 2,169 | 2,921 | 3,544 |
| 17 | 1,030 | 2,110 | 2,158 | 2,898 | 3,507 |
| 18 | 1,029 | 2,101 | 2,149 | 2,878 | 3,475 |
| 19 | 1,027 | 2,093 | 2,140 | 2,861 | 3,447 |
| 20 | 1,026 | 2,086 | 2,133 | 2,845 | 3,422 |
| 30 | 1,017 | 2,042 | 2,087 | 2,750 | 3,270 |
| 40 | 1,013 | 2,021 | 2,064 | 2,704 | 3,199 |
| 50 | 1,010 | 2,009 | 2,051 | 2,678 | 3,157 |
| 60 | 1,008 | 2,000 | 2,043 | 2,660 | 3,130 |
| 70 | 1,007 | 1,944 | 2,036 | 2,648 | 3,111 |
| 80 | 1,006 | 1,990 | 2,032 | 2,639 | 3,097 |
| 90 | 1,006 | 1,987 | 2,028 | 2,632 | 3,086 |
| 100 | 1,005 | 1,984 | 2,025 | 2,626 | 3,077 |
| 200 | 1,003 | 1,972 | 2,013 | 2,601 | 3,038 |
| 1.000 | 1,000 | 1,962 | 2,003 | 2,581 | 3,008 |
| ∞ | 1,000 | 1,960 | 2,000 | 2,576 | 3,001 |