

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SONDA DE
INTENSIDADE SONORA DE BAIXO CUSTO**

Daniel Henrique Nunes Peixoto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SONDA DE
INTENSIDADE SONORA DE BAIXO CUSTO"**

Daniel Henrique Nunes Peixoto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Max de Castro Magalhães
DEES - UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Guilherme de Souza Papini
DEMEC (Coorientador)

Prof. Dr. Lázaro Valentim Donadon
DEMEC

Profª. Dra. Rosely Maria Velloso Campos
PUC-MG

Belo Horizonte, 31 de agosto de 2018

P379d

Peixoto, Daniel Henrique Nunes.

Desenvolvimento de um protótipo de sonda de intensidade sonora de baixo custo [manuscrito] / Daniel Henrique Nunes Peixoto. – 2018. 232 f., enc.: il.

Orientador: Max de Castro Magalhães.

Coorientador: Guilherme de Souza Papini.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 154-228.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Engenharia acústica - Teses. I. Magalhães, Max de Castro. II. Papini, Guilherme de Souza. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Elmar Alves Peixoto e Mariza Inez Nunes Peixoto, pelo suporte financeiro, exemplo de busca pelo conhecimento, amor incondicional e cuidados a mim dedicados durante toda minha vida.

Agradeço aos meus irmãos, Eliza Inez Nunes Peixoto e Anderson Alves Peixoto, pelo exemplo de dedicação aos estudos, amizade e conversas sobre a vida que a tornam mais agradável.

Agradeço a minha namorada, Emanuelle Brenda Lopes Perpétuo, pelo apoio fundamental dado na reta final deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos pelo apoio e bons momentos compartilhados. Em especial, agradeço ao Henrique de Almeida Galvão, que compartilhou comigo as mesas do Restaurante Universitário Setorial I durante todo o mestrado.

Agradeço aos meus colegas de pós-graduação pelo companheirismo, em especial: Antônio Ribeiro, Daniel Vasconcellos, Gabriel Rosalem, Hugo Sampaio, Dâmia Carina e Plínio Santos.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Max de Castro Magalhães, pelo suporte e ajuda durante o período de elaboração desse projeto, pela oportunidade de estudos e pela confiança em mim depositada.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Guilherme de Souza Papini, por sempre se colocar à disposição para ajudar, além de sempre expressar palavras positivas e de apoio que foram fundamentais para mim.

Agradeço ao CNPq pelo suporte financeiro concedido através de uma bolsa durante um ano do meu mestrado.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas pelos conhecimentos a mim passados através das disciplinas cursadas e aos funcionários do DEES pelo suporte técnico.

RESUMO

Dentre as quantidades básicas da engenharia acústica aplicada, a grandeza vetorial intensidade sonora coloca-se como a segunda mais relevante, atrás apenas da pressão sonora eficaz, sendo utilizada, principalmente, para identificação e caracterização de fontes sonoras. Os instrumentos capazes de medir essa quantidade são chamados de sondas de intensidade sonora, sendo que as do tipo p-p usam dois transdutores de pressão sonora, instalados muito próximos um do outro, de modo a obter a velocidade de partícula empregando uma aproximação do gradiente espacial local de pressão pela diferença finita. Este trabalho apresenta a fase inicial do processo de desenvolvimento de uma sonda de intensidade sonora p-p de baixo custo, tendo como motivação principal contribuir para a diminuição da dependência de sondas comerciais. O protótipo de sonda foi construído com auxílio de impressão 3D e equipamentos de medição disponíveis na UFMG, a saber: dois microfones pré-amplificados e uma placa de aquisição da *National Instruments*. Utilizou-se também o software MATLAB, no qual foi implementado o processamento de sinais capaz de: i) calcular a intensidade sonora através do método p-p; ii) aplicar a correção da diferença de fase entre canais de aquisição; iii) gerar as respostas dos experimentos realizados. Tais experimentos foram concebidos com a intenção de validar o protótipo de sonda desenvolvido, baseados em bibliografias pertinentes ao tema. Os resultados experimentais mostraram-se bastante coerentes com a teoria estudada, permitindo assim a validação do algoritmo de processamento de sinais desenvolvido para medição de intensidade sonora com baixo custo. Por fim, esta pesquisa evidencia a possibilidade de realização de medições de intensidade sonora utilizando o protótipo de baixo custo e, mais importante, produziu-se uma investigação base sobre sondas de baixo custo que pode ser reproduzida e melhorada de maneira livre.

Palavras-Chave: sonda de intensidade sonora, baixo custo, intensidade sonora

ABSTRACT

Among the basic quantities of applied acoustic engineering, the sound intensity vector is the second most relevant, behind only root mean squared sound pressure, and is mainly used for identification and characterization of sound sources. The instruments capable of measuring this quantity are called sound intensity probes, whereas the ones of the pp type use two sound pressure transducers, installed very close to each other, to obtain the particle velocity using a finite-difference approximation to the spatial sound pressure gradient. This work presents the initial phase of the development of a low-cost p-p sound intensity probe, having as main motivation to contribute to the decrease of the dependence of commercial probes. The probe prototype was built with 3D printing aid and measuring equipment available at UFMG, namely: two preamplified microphones and a National Instruments acquisition board. MATLAB software was also used, in which it was implemented a signal processing capable of: i) calculating the sound intensity through the p-p method, ii) applying the phase-mismatch correction; iii) generate the responses of the performed experiments. Such experiments were designed with the intention of validating the developed probe prototype, based on relevant bibliographies. The experimental results proved to be quite consistent with the studied theory, thus allowing the validation of the signal processing algorithm developed for measurement of sound intensity with low cost. Finally, this research evidences the possibility of performing sound intensity measurements using the low-cost prototype and, more importantly, a base investigation on low cost probes has been produced which can be reproduced and improved freely.

Keywords: sound intensity probe, low-cost, sound intensity

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Forma de onda de um ruído.	38	
Figura 2.2: Ilustração das relações não-linearizadas e linearizadas entre pressão acústica e densidade.	Fonte: Frank Fahy, 1995, p.14.	40
Figura 2.3: Tubo infinito com um pistão oscilando em movimento harmônico simples.	Fonte: Adaptado de Eric Brandão, 2009, p. 63.	42
Figura 2.4: Representação vetorial da posição r , velocidade u e deslocamento ξ de partícula.	Fonte: Adaptado de Frank Fahy, 1995, p.16.	43
Figura 2.5: Exemplo de posicionamento de microfones do tipo <i>pressure-field</i>		47
Figura 2.6: Pequeno volume de gás hipotético enclausurado.	Fonte: Adaptado de Beranek & Mellow, 2012, p. 22.	48
Figura 2.7: Um pequeno elemento de volume de ar.	Fonte: Adaptado de Fundamentals of Acoustics, Kinsler et. al., 2000, p. 117.	51
Figura 2.8: Seção transversal de um tubo que possui o mesmo valor de pressão e velocidade de partícula em todos os pontos.		54
Figura 2.9: Deslocamento de uma partícula de A até B sob a atuação da força variável F . Fonte: Adaptado de Física 1, Halliday et. al., 1996.		56
Figura 2.10: Fluxo de energia sonora que atravessa um volume de controle planar.	Fonte: Adaptado de Frank Fahy, 1995, p.41.	60
Figura 2.11: Amostragem periódica de um sinal analógico.	Fonte: Modificado de Proakis & Manolakis, 2007, p. 21.	65
Figura 2.12: Exemplo de dois sinais analógicos representados pelo mesmo sinal digital.		66

Figura 2.13: : (a) Sinal aperiódico $x(t)$ e (b) sinal periódico x_{pT} construído através da repetição de $x(t)$ com um período T_p . Fonte: Modificado de Proakis & Manolakis, 2007, p. 235.....	68
Figura 2.14: a) Sinal original de duração T . b) Como o processo da DFT supõe que o sinal é.	73
Figura 2.15: Ilustração qualitativa do fenômeno de truncamento para um sinal periódico no domínio da frequência.	74
Figura 2.16: Janelas retangular e de Hanning.	75
Figura 2.17: Como o uso da janela de Hanning suaviza a descontinuidade de um sinal.	75
Figura 2.18: a) Janelamento sem overlapping. b) Janelamento com overlapping de 50%.	76
Figura 2.19: Sistema de entrada única e saída única.	78
Figura 2.20: Ilustração esquemática de possíveis configurações para sondas do tipo ‘p-p’. Fonte: Frank Fahy, 1995, p. 91.....	79
Figura 2.21: Aproximação do gradiente de pressão pela diferença finita de pressão.	80
Figura 2.22: Efeitos da difração da configuração side-by-side p-p. Fonte: Frank Fahy, 1995, p. 110.....	86
Figura 2.23: Diagrama de processamento de sinais para determinação da intensidade sonora. Fonte: Frank Fahy, 1995, p. 132.....	90
Figura 3.1: Representação de funções de transferência.....	93
Figura 3.2: a), b) e g) Peças de madeiras com função de suporte. c) Alto falante. d) Cano. e) Microfone. f) Peça feita por impressora 3D. g) Peça de madeira envolvida com borracha.	94
Figura 3.3. Ilustração de um passo a passo sequencial para montagem do experimento. Nas figuras e) e f) o cano foi representado de maneira transparente para facilitar o entendimento.	95
Figura 3.4: Planta experimental que objetiva gerar um campo sonoro em que a propagação de ondas se dê somente através de ondas planas “puramente” progressivas.	98

Figura 3.5: Peça de impressão 3D que possui a função de posicionar os microfones.....	98
Figura 3.6: Em detalhe a extremidade do tubo onde fica o alto-falante e a 50 [mm] de distância os microfones para medição da intensidade sonora.....	98
Figura 4.1: Exemplo ilustrativo de criação de uma seção de aquisição de sinais no MATLAB.	102
Figura 4.2: Passagem dos sinais elétricos para unidade de engenharia.	102
Figura 4.3: Ilustração da conversão dos sinais analógicos para sinais digitais.	103
Figura 4.4: Fluxograma da Medição de Calibração do ensaio baseado no método de Krishnappa.	104
Figura 4.5: Fluxograma da Medição Corrigida.	104
Figura 4.6: Fluxograma da Medição de Calibração do ensaio apresentado na subseção 3.2.	105
Figura 4.7: Fluxograma da Medição de Intensidades.....	105
Figura 4.8: Diagrama do cálculo do espectro de potência de um lado. Medição de Calibração.	108
Figura 4.9: Diagrama do cálculo do espectro de potência cruzada de um lado. Calibração.	109
Figura 4.10: Cálculo do nível de pressão sonora da banda de um terço de oitava de 50 [Hz] representado por um diagrama.	112
Figura 4.11 Diagrama do cálculo do espectro de potência cruzada com correção de fase.	115
Figura 5.1: Valores do NPS: canal 0 (Mic 1) em azul e canal 1 (Mic 2) em vermelho. Dupla 1.	118
Figura 5.2: Mesmo gráfico da Fig. 5.1 com zoom na região da frequência de corte.	118
Figura 5.3: Diferença de fase analisada a partir dos dados da densidade espectral de potência cruzada na Medição de Calibração. Dupla 1.	119
Figura 5.4: Mesmo gráfico da Fig. 5.3, porém com foco nas cinco primeiras bandas de um terço de oitava.....	120

Figura 5.5: Gráfico comparativo entre os valores dos CPIR's da Medição de Calibração com os preconizados pela norma IEC 1043 para instrumentos classe 2. Dupla 1.....	121
Figura 5.6: Comparação entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais na Medição Corrigida. Dupla 1.....	121
Figura 5.7: Comparação do <i>phase-mismatch</i> nas Medições de Calibração e Corrigida, ou seja, antes e depois da correção. Dupla 1.....	123
Figura 5.8: Mesmo gráfico da Fig. 5.7, com foco na faixa que contém as quatro primeiras bandas de um terço de oitava de interesse.....	124
Figura 5.9: Comparação entre os valores de CPIR da Medição Corrigida com os preconizados pela norma IEC 1043 para instrumentos classe 1 e 2. Dupla 1.....	124
Figura 5.10: Valores do nível de pressão sonora medidos pelos dois canais de aquisição: canal 0 (Mic 3) em azul e canal 1 (Mic 2) em vermelho. Dupla 2.....	129
Figura 5.11: Mesmo gráfico da Fig. 5.10 com zoom na região da frequência de corte.....	129
Figura 5.12: Diferença de fase analisada a partir dos dados da densidade espectral de potência cruzada na Medição de Calibração. Dupla 2.....	130
Figura 5.13: Mesmo gráfico da Fig. 5.12, porém com foco nas quatro primeiras bandas de um terço de oitava.....	131
Figura 5.14: Gráfico comparativo entre os valores dos CPIR's da Medição de Calibração com os preconizados pela norma IEC 1043 para instrumentos classe 2 e classe 1. Dupla 2.....	132
Figura 5.15: Comparação entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais na Medição Corrigida. Dupla 2.....	132
Figura 5.16: Comparação do <i>phase-mismatch</i> nas Medições de Calibração e Corrigida, ou seja, antes e depois da correção. Dupla 2.....	133
Figura 5.17: Mesmo gráfico da Fig. 5.16, com foco na faixa que contém as quatro primeiras bandas de um terço de oitava de interesse.....	134
Figura 5.18: Gráfico comparativo entre os valores dos coeficientes de pressão intensidade residual da Medição Corrigida com os preconizados pela norma IEC 1043. Dupla 2.....	135

Figura 5.19: Comparação entre o Método p-p com correção e o Método Analítico. Dupla 1.	138
Figura 5.20: Comparação entre o Método p-p sem correção e o Método Analítico. Dupla 1.	138
Figura 5.21: Comparação entre o Método p-p com e sem correção. Dupla 1.	139
Figura 5.22: Comparação em bandas de um terço de oitava entre os métodos. Dupla 1.	140
Figura 5.23: Comparação entre os erros do Método p-p com e sem correção. Dupla 1.	140
Figura 5.24: Comparação entre o Método p-p com correção e o Método Analítico. Dupla 2.	142
Figura 5.25: Comparação entre o Método p-p sem correção e o Método Analítico. Dupla 2.	142
Figura 5.26: Comparação entre o Método p-p com e sem correção. Dupla 2.	143
Figura 5.27: Comparação em bandas de um terço de oitava entre os métodos. Dupla 2.	144
Figura 5.28: Comparação entre os erros do Método p-p com e sem correção. Dupla 2.	144
Figura 6.1: Peças, desenvolvidas em <i>SolidWork</i> , da estrutura suporte do protótipo de sonda.	148
Figura 6.2: Mesmas peças da Fig. 6.1 materializadas através de impressão 3D.	148
Figura 6.3: Protótipo de sonda montado no arranjo <i>side-by-side</i> e $d = 50$ [mm]. Visão frontal.	149
Figura 6.4 Protótipo de sonda montado no arranjo <i>side-by-side</i> e $d = 50$ [mm]. Visão lateral.	149
Figura 6.5: Protótipo de sonda montado no arranjo <i>side-by-side</i> e $d = 15$ [mm]. Visão frontal.	150
Figura 6.6: Protótipo de sonda montado no arranjo <i>side-by-side</i> e $d = 15$ [mm]. Visão lateral.	150
Figura 6.7: Protótipo de sonda montado no arranjo <i>face-to-face</i> . Visão frontal.	151

Figura A.1: R.1; M.1; dupla 1; dia 1.	156
Figura A.2: R.1; M.1; dupla 1; dia 1.	156
Figura A.3: R.1; M.3; dupla 1; dia 1.	156
Figura A.4: R.1; M.4; dupla 1; dia 1.	156
Figura A.5: R.1; M.5; dupla 1; dia 1.	156
Figura A.6: R.1; M.6; dupla 1; dia 1.	156
Figura A.7: R.1; M.7; dupla 1; dia 1.	157
Figura A.8: R.1; M.8; dupla 1; dia 1.	157
Figura A.9: R.1; M.9; dupla 1; dia 1.	157
Figura A.10: R.1; M.10; dupla 1; dia 1.	157
Figura A.11: R.2; M.1; dupla 1; dia 1.	158
Figura A.12: R.2; M.2; dupla 1; dia 1.	158
Figura A.13: R.2; M.3; dupla 1; dia 1.	158
Figura A.14: R.2; M.4; dupla 1; dia 1.	158
Figura A.15: R.2; M.5; dupla 1; dia 1.	158
Figura A.16: R.2; M.6; dupla 1; dia 1.	158
Figura A.17: R.2; M.7; dupla 1; dia 1.	159
Figura A.18: R.2; M.8; dupla 1; dia 1.	159
Figura A.19: R.2; M.9; dupla 1; dia 1.	159
Figura A.20: R.2; M.10; dupla 1; dia 1.	159
Figura A.21: R.3; M.1; dupla 1; dia 1.	160
Figura A.22: R.3; M.2; dupla 1; dia 1.	160
Figura A.23: R.3; M.3; dupla 1; dia 1.	160

Figura A.24: R.3; M.4; dupla 1; dia 1.	160
Figura A.25: R.3; Medição 5; dupla 1; dia 1.....	160
Figura A.26: R.3; Medição 6; dupla 1; dia 1.....	160
Figura A.27: R.3; M.7; dupla 1; dia 1.	161
Figura A.28: R.3; M.8; dupla 1; dia 1.	161
Figura A.29: R.3; M.9; dupla 1; dia 1.	161
Figura A.30: R.3; M.10; dupla 1; dia 1.	161
Figura A.31: Resultado 4; Medição 1; dupla 1; dia 1.....	162
Figura A.32: Resultado 4; Medição 2; dupla 1; dia 1.....	162
Figura A.33: Resultado 4; Medição 3; dupla 1; dia 1.....	162
Figura A.34: Resultado 4; Medição 4; dupla 1; dia 1.....	162
Figura A.35: Resultado 4; Medição 5; dupla 1; dia 1.....	163
Figura A.36: Resultado 4; Medição 6; dupla 1; dia 1.....	163
Figura A.37: Resultado 4; Medição 7; dupla 1; dia 1.....	163
Figura A.38: Resultado 4; Medição 8; dupla 1; dia 1.....	163
Figura A.39: Resultado 4; Medição 9; dupla 1; dia 1.....	164
Figura A.40: Resultado 4; Medição 10; dupla 1; dia 1.....	164
Figura A.41: R.5; M.1; dupla 1; dia 1.	165
Figura A.42: R.5; M.2; dupla 1; dia 1.	165
Figura A.43: R.5; M.3; dupla 1; dia 1.	165
Figura A.44: R.5; M.4; dupla 1; dia 1.	165
Figura A.45: R.5; M.5; dupla 1; dia 1.	165
Figura A.46: R.5; M.6; dupla 1; dia 1.	165

Figura A.47: R.5; M.7; dupla 1; dia 1.	166
Figura A.48: R.5; M.8; dupla 1; dia 1.	166
Figura A.49: R.5; M.9; dupla 1; dia 1.	166
Figura A.50: R.5; M.10; dupla 1; dia 1.	166
Figura A.51: R.6; M.1; dupla 1; dia 1.	167
Figura A.52: R.6; M.2; dupla 1; dia 1.	167
Figura A.53: R.6; M.3; dupla 1; dia 1.	167
Figura A.54: R.6; M.4; dupla 1; dia 1.	167
Figura A.55: R.6; M.5; dupla 1; dia 1.	167
Figura A.56: R.6; M.6; dupla 1; dia 1.	167
Figura A.57: R.6; M.7; dupla 1; dia 1.	168
Figura A.58: R.6; M.8; dupla 1; dia 1.	168
Figura A.59: R.6; M.9; dupla 1; dia 1.	168
Figura A.60: R.6; M.10; dupla 1; dia 1.	168
Figura A.61: Resultado 7; Medição 1; dupla 1; dia 1.....	169
Figura A.62: Resultado 7; Medição 2; dupla 1; dia 1.....	169
Figura A.63: Resultado 7; Medição 3; dupla 1; dia 1.....	169
Figura A.64: Resultado 7; Medição 4; dupla 1; dia 1.....	169
Figura A.65: Resultado 7; Medição 5; dupla 1; dia 1.....	170
Figura A.66: Resultado 6; Medição 6; dupla 1; dia 1.....	170
Figura A.67: Resultado 7; Medição 7; dupla 1; dia 1.....	170
Figura A.68: Resultado 7; Medição 8; dupla 1; dia 1.....	170
Figura A.69: Resultado 7; Medição 9; dupla 1; dia 1.....	171

Figura A.70: Resultado 7; Medição 10; dupla 1; dia 1.....	171
Figura A.71: R.1; M.1; dupla 1; dia 2.	172
Figura A.72: R.1; M.2; dupla 1; dia 2.	172
Figura A.73: R.1; Medição 3; dupla 1; dia 2.....	172
Figura A.74: R.1; M.4; dupla 1; dia 2.	172
Figura A.75: R.1; M.5; dupla 1; dia 2.	172
Figura A.76: R.1; M.6; dupla 1; dia 2.	172
Figura A.77: R.1; M.7; dupla 1; dia 2.	173
Figura A.78: R.1; M.8; dupla 1; dia 2.	173
Figura A.79: R.1; M.9; dupla 1; dia 2.	173
Figura A.80: R.1; M.10; dupla 1; dia 2.	173
Figura A.81: R.2; M.1; dupla 1; dia 2.	174
Figura A.82: R.2; M.2; dupla 1; dia 2.	174
Figura A.83: R.2; M.3; dupla 1; dia 2.	174
Figura A.84: R.2; M.4; dupla 1; dia 2.	174
Figura A.85: R.2; M.5; dupla 1; dia 2.	174
Figura A.86: R.2; M.6; dupla 1; dia 2.	174
Figura A.87: R.2; M.7; dupla 1; dia 2.	175
Figura A.88: R.2; M.8; dupla 1; dia 2.	175
Figura A.89: R.2; M.9; dupla 1; dia 2.	175
Figura A.90: R.2; M.10; dupla 1; dia 2.	175
Figura A.91: R.3; M.1; dupla 1; dia 2.	176
Figura A.92: R.3; M.2; dupla 1; dia 2.	176

Figura A.93: R.3; M.3; dupla 1; dia 2.	176
Figura A.94: R.3; M.4; dupla 1; dia 2.	176
Figura A.95: R.3; M.5; dupla 1; dia 2.	176
Figura A.96: R.3; M.6; dupla 1; dia 2.	176
Figura A.97: R.3; M.7; dupla 1; dia 2.	177
Figura A.98: R.3; M.8; dupla 1; dia 2.	177
Figura A.99: R.3; M.9; dupla 1; dia 2.	177
Figura A.100: R.3; M.10; dupla 1; dia 2.	177
Figura A.101: Resultado 4; Medição 1; dupla 1; dia 2.....	178
Figura A.102: Resultado 4; Medição 2; dupla 1; dia 2.....	178
Figura A.103: Resultado 4; Medição 3; dupla 1; dia 2.....	178
Figura A.104: Resultado 4; Medição 4; dupla 1; dia 2.....	178
Figura A.105: Resultado 4; Medição 5; dupla 1; dia 2.....	179
Figura A.106: Resultado 4; Medição 6; dupla 1; dia 2.....	179
Figura A.107: Resultado 4; Medição 7; dupla 1; dia 2.....	179
Figura A.108: Resultado 4; Medição 8; dupla 1; dia 2.....	179
Figura A.109: Resultado 4; Medição 9; dupla 1; dia 2.....	180
Figura A.110: Resultado 4; Medição 10; dupla 1; dia 2.....	180
Figura A.111: R.5; M.1; dupla 1; dia 2.	181
Figura A.112: R.5; M.2; dupla 1; dia 2.	181
Figura A.113: R.5; M.3; dupla 1; dia 2.	181
Figura A.114: R.5; M.4; dupla 1; dia 2.	181
Figura A.115: R.5; M.5; dupla 1; dia 2.	181

Figura A.116: R.5; M.6; dupla 1; dia 2.	181
Figura A.117: R.5; M.7; dupla 1; dia 2.	182
Figura A.118: R.5; M.8; dupla 1; dia 2.	182
Figura A.119: R.5; M.9; dupla 1; dia 2.	182
Figura A.120: R.5; M.10; dupla 1; dia 2.	182
Figura A.121: R.6; M.1; dupla 1; dia 2.	183
Figura A.122: R.6; M.2; dupla 1; dia 2.	183
Figura A.123: R.6; M.3; dupla 1; dia 2.	183
Figura A.124: R.6; M.4; dupla 1; dia 2.	183
Figura A.125: R.6; M.5; dupla 1; dia 2.	183
Figura A.126: R.6; M.6; dupla 1; dia 2.	183
Figura A.127: R.6; M.7; dupla 1; dia 2.	184
Figura A.128: R.6; M.8; dupla 1; dia 2.	184
Figura A.129: R.6; M.9; dupla 1; dia 2.	184
Figura A.130: R.6; M.10; dupla 1; dia 2.	184
Figura A.131: Resultado 7; Medição 1; dupla 1; dia 2.....	185
Figura A.132: Resultado 7; Medição 2; dupla 1; dia 2.....	185
Figura A.133: Resultado 7; Medição 3; dupla 1; dia 2.....	185
Figura A.134: Resultado 7; Medição 4; dupla 1; dia 2.....	185
Figura A.135: Resultado 7; Medição 5; dupla 1; dia 2.....	186
Figura A.136: Resultado 7; Medição 6; dupla 1; dia 2.....	186
Figura A.137: Resultado 7; Medição 7; dupla 1; dia 2.....	186
Figura A.138: Resultado 7; Medição 8; dupla 1; dia 2.....	186

Figura A.139: Resultado 7; Medição 9; dupla 1; dia 2.....	187
Figura A.140: Resultado 7; Medição 10; dupla 1; dia 2.....	187
Figura A.141: R.1; M.1; dupla 2.	188
Figura A.142: R.1; M.2; dupla 2.	188
Figura A.143: R.1; M.3; dupla 2.	188
Figura A.144: R.1; M.4; dupla 2.	188
Figura A.145: R.1; M.5; dupla 2.	188
Figura A.146: R.1; M.6; dupla 2.	188
Figura A.147: R.1; M.7; dupla 2.	189
Figura A.148: R.1; M.8; dupla 2.	189
Figura A.149: R.1; M.9; dupla 2.	189
Figura A.150: R.1; M.10; dupla 2.	189
Figura A.151: R.2; M.1; dupla 2.	190
Figura A.152: R.2; M.2; dupla 2.	190
Figura A.153: R.2; M.3; dupla 2.	190
Figura A.154: R.2; M.4; dupla 2.	190
Figura A.155: R.2; M.5; dupla 2.	190
Figura A.156: R.2; M.6; dupla 2.	190
Figura A.157: R.2; M.7; dupla 2.	191
Figura A.158: R.2; M.8; dupla 2.	191
Figura A.159: R.2; M.9; dupla 2.	191
Figura A.160: R.2; M.10; dupla 2.	191
Figura A.161: R.3; M.1; dupla 2.	192

Figura A.162: R.3; M.2; dupla 2.	192
Figura A.163: R.3; M.3; dupla 2.	192
Figura A.164: R.3; M.4; dupla 2.	192
Figura A.165: R.3; M.5; dupla 2.	192
Figura A.166: R.3; M.6; dupla 2.	192
Figura A.167: R.3; M.7; dupla 2.	193
Figura A.168: R.3; M.8; dupla 2.	193
Figura A.169: R.3; M.9; dupla 2.	193
Figura A.170: R.3; M.10; dupla 2.	193
Figura A.171: Resultado 4; Medição 1; dupla 2.....	194
Figura A.172: Resultado 4; Medição 2; dupla 2.....	194
Figura A.173: Resultado 4; Medição 3; dupla 2.....	194
Figura A.174: Resultado 4; Medição 4; dupla 2.....	194
Figura A.175: Resultado 4; Medição 5; dupla 2.....	195
Figura A.176: Resultado 4; Medição 6; dupla 2.....	195
Figura A.177: Resultado 4; Medição 7; dupla 2.....	195
Figura A.178: Resultado 4; Medição 8; dupla 2.....	195
Figura A.179: Resultado 4; Medição 9; dupla 2.....	196
Figura A.180: Resultado 4; Medição 10; dupla 2.....	196
Figura A.181: R.5; M.1; dupla 2.	197
Figura A.182: R.5; M.2; dupla 2.	197
Figura A.183: R.5; M.3; dupla 2.	197
Figura A.184: R.5; M.4; dupla 2.	197

Figura A.185: R.5; M.5; dupla 2.	197
Figura A.186: R.5; M.6; dupla 2.	197
Figura A.187: R.5; M.7; dupla 2.	198
Figura A.188: R.5; M.8; dupla 2.	198
Figura A.189: R.5; M.9; dupla 2.	198
Figura A.190: R.5; M.10; dupla 2.	198
Figura A.191: R.6; M.1; dupla 2.	199
Figura A.192: R.6; M.2; dupla 2.	199
Figura A.193: R.6; M.3; dupla 2.	199
Figura A.194: R.6; M.4; dupla 2.	199
Figura A.195: R.6; M.5; dupla 2.	199
Figura A.196: R.6; M.6; dupla 2.	199
Figura A.197: R.6; M.7; dupla 2.	200
Figura A.198: R.6; M.8; dupla 2.	200
Figura A.199: R.6; M.9; dupla 2.	200
Figura A.200: R.6; M.10; dupla 2.	200
Figura A.201: Resultado 7; Medição 1; dupla 2.....	201
Figura A.202: Resultado 7; Medição 2; dupla 2.....	201
Figura A.203: Resultado 7; Medição 3; dupla 2.....	201
Figura A.204: Resultado 7; Medição 4; dupla 2.....	201
Figura A.205: Resultado 7; Medição 5; dupla 2.....	202
Figura A.206: Resultado 7; Medição 6; dupla 2.....	202
Figura A.207: Resultado 7; Medição 7; dupla 2.....	202

Figura A.208: Resultado 7; Medição 8; dupla 2.....	202
Figura A.209: Resultado 7; Medição 9; dupla 2.....	203
Figura A.210: Resultado 7; Medição 10; dupla 2.....	203
Figura B.1: Resultado 8; Ruído rosa; dupla 1.	205
Figura B.2: Resultado 9; Ruído rosa; dupla 1.	205
Figura B.3: Resultado 10; Ruído rosa; dupla 1.	206
Figura B.4: Resultado 11; Ruído rosa; dupla 1.	206
Figura B.5: Resultado 12; Ruído rosa; dupla 1.	206
Figura B.6: Resultado 8; Ruído branco; dupla 1.	207
Figura B.7: Resultado 9; Ruído branco; dupla 1.	207
Figura B.8: Resultado 10; Ruído branco; dupla 1.	208
Figura B.9: Resultado 11; Ruído branco; dupla 1.	208
Figura B.10: Resultado 12; Ruído branco; dupla 1.	208
Figura B.11: Resultado 8; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.	209
Figura B.12: Resultado 9; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.	209
Figura B.13: Resultado 10; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.	210
Figura B.14: Resultado 11; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.	210
Figura B.15: Resultado 12; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.	210
Figura B.16: Resultado 8; Ruído Industrial 1; dupla 1.....	211
Figura B.17: Resultado 9; Ruído Industrial 1; dupla 1.....	211
Figura B.18: Resultado 10; Ruído Industrial 1; dupla 1.....	212
Figura B.19: Resultado 11; Ruído Industrial 1; dupla 1.....	212
Figura B.20: Resultado 12; Ruído Industrial 1; dupla 1.....	212

Figura B.21: Resultado 8; Ruído Industrial 2; dupla 1.....	213
Figura B.22: Resultado 9; Ruído Industrial 2; dupla 1.....	213
Figura B.23: Resultado 10; Ruído Industrial 2; dupla 1.....	214
Figura B.24: Resultado 11; Ruído Industrial 2; dupla 1.....	214
Figura B.25: Resultado 12; Ruído Industrial 2; dupla 1.....	214
Figura B.26: Resultado 8; Ruído rosa; dupla 2.	215
Figura B.27: Resultado 9; Ruído rosa; dupla 2.	215
Figura B.28: Resultado 10; Ruído rosa; dupla 2.	216
Figura B.29: Resultado 11; Ruído rosa; dupla 2.	216
Figura B.30: Resultado 12; Ruído rosa; dupla 2.	216
Figura B.31: Resultado 8; Ruído branco; dupla 2.	217
Figura B.32: Resultado 9; Ruído branco; dupla 2.	217
Figura B.33: Resultado 10; Ruído branco; dupla 2.	218
Figura B.34: Resultado 11; Ruído branco; dupla 2.	218
Figura B.35: Resultado 12; Ruído branco; dupla 2.	218
Figura B.36: Resultado 8; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.	219
Figura B.37: Resultado 9; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.	219
Figura B.38: Resultado 10; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.	220
Figura B.39: Resultado 11; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.	220
Figura B.40: Resultado 12; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.	220
Figura B.41: Resultado 8; Ruído Industrial 1; dupla 2.....	221
Figura B.42: Resultado 9; Ruído Industrial 1; dupla 2.....	221
Figura B.43: Resultado 10; Ruído Industrial 1; dupla 2.....	222

Figura B.44: Resultado 11; Ruído Industrial 1; dupla 2.....	222
Figura B.45: Resultado 12; Ruído Industrial 1; dupla 2.....	222
Figura B.46: Resultado 8; Ruído Industrial 2; dupla 2.....	223
Figura B.47: Resultado 9; Ruído Industrial 2; dupla 2.....	223
Figura B.48: Resultado 10; Ruído Industrial 2; dupla 2.....	224
Figura B.49: Resultado 11; Ruído Industrial 2; dupla 2.....	224
Figura B.50: Resultado 12; Ruído Industrial 2; dupla 2.....	224

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Requerimentos mínimos para o Coeficiente de Pressão-Intensidade Residual em decibéis no caso de sondas, processadores e instrumentos. Valores para uma distância $d = 25$ [mm] entre os microfones. Fonte: IEC 1043.....	88
Tabela 3.1: Convenção de nomenclatura para os microfones utilizados.....	96
Tabela 5.1: Diferença média absoluta em [dB] entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais, antes e depois da correção. Dia 1, dupla 1.....	122
Tabela 5.2: A diferença média absoluta em [dB] entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais, antes e depois da correção. Dia 2, dupla 1.	122
Tabela 5.3: Tabela que resume os resultados da Dupla 1 no dia 1 de medição.	126
Tabela 5.4: Tabela que resume os resultados da Dupla 1 no dia 2 de medição.	127
Tabela 5.5: A diferença média absoluta em [dB] entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais, antes e depois da correção. Dupla 2.	133
Tabela 5.6: Tabela que resume os resultados da medição com a Dupla 2.	136
Tabela C.1: Especificações do microfone modelo 378B20 Piezotronics.....	225
Tabela C.2: Especificações do microfone modelo MP 201 da BSWA Tech.	226
Tabela C.3: Especificações da placa de aquisição NI 9234.	227
Tabela C.4: Coeficientes de absorção sonora em bandas de oitava da lã de rocha Biolã.	228

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três dimensões, tridimensional
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
ISO	Organização Internacional de Normalização
NPS	Nível de pressão sonora
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
NIS	Nível de intensidade sonora
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
NI	<i>National Instruments</i>
PVC	Policloreto de polivinila
BNC	Conector Bayonet Neill Concelman
CPIR	Coeficiente de pressão-intensidade residual
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
DEP	Densidade espectral de potência
DECP	Densidade espectral cruzada de potência

LISTA DE SÍMBOLOS

$p(t)$	Pressão sonora instantânea
p_a	Pressão ambiente
t	Variável temporal
p_{max}	Pressão sonora instantânea máxima
p_{min}	Pressão sonora instantânea mínima
A	Amplitude máxima de deslocamento
f	Frequência em [Hz]; função arbitrária
ϕ	Fase em [rad]
p_{eficaz}	Pressão sonora eficaz
p_{rms}	Valor médio quadrático (root mean square)
N	Número de amostras de pressão sonora instantânea
p_i	i -ésimo valor de pressão sonora instantânea
P	Pressão do fluido
P_0	Pressão estática
p	Pressão acústica
ρ	Densidade do ar
ρ_0	Densidade média do ar
γ	Razão de calor específico
s	Condensação
B	Módulo de bulk adiabático
$\vec{u}(\vec{r}, t)$	Velocidade de partícula
u	Componente da velocidade de partícula no eixo x
v	Componente da velocidade de partícula no eixo y
w	Componente da velocidade de partícula no eixo z
\vec{r}	Posição de partícula
$\vec{\xi}$	Deslocamento de partícula
ξ	Componente do deslocamento de partícula no eixo x
η	Componente do deslocamento de partícula no eixo y
ζ	Componente do deslocamento de partícula no eixo z
Z_c	Impedância acústica característica
c_0	Velocidade do som
α	Coefficiente de absorção sonora
x	Eixo horizontal de coordenadas cartesianas
y	Eixo vertical de coordenadas cartesianas
z	Eixo de profundidade no espaço
ΔF	Diferença entre as forças agindo em duas faces de um cubo de ar

V	Volume
p'	Média espacial da densidade instantânea
∇	Divergente
k	Número de onda
f_c	Frequência de corte
g	Função arbitrária
\vec{F}	Força variável tanto em sentido como em módulo
W	Trabalho
E_k	Energia cinética
m	Massa
E_p	Energia potencial
E_t	Energia total
ϵ_T	Densidade de energia sonora
ϵ_c	Densidade de energia cinética
ϵ_p	Densidade de energia potencial
δS	Área de uma superfície
$\delta \vec{S}$	Vetor de área
\vec{n}	Vetor unitário normal à superfície
$\vec{I}(t)$	Intensidade sonora instantânea
$I_n(t)$	Intensidade sonora instantânea na direção \vec{n}
$\langle \vec{I}(t) \rangle_t$	Média temporal da intensidade sonora ativa
\vec{J}	Média temporal da intensidade sonora reativa
T	Duração de uma medição
Δt	Intervalo de amostragem
$x_a(t)$	Função contínua no tempo (analógico)
$x(n)$	Representação discreta de uma função contínua
N_t	Número total de amostras
f_s	Taxa amostral
f_{max}	Frequência máxima de um sinal
f_N	Frequência de Nyquist
T_p	Período de medição que se torna o período de repetição de um sinal
$X(f)$	Transformada de Fourier do sinal $x(t)$
$x_k(t)$	Registro de amostras
$y_k(t)$	Registro de amostras
$\{x_k(t)\}$	Processo estacionário randômico
$\{y_k(t)\}$	Processo estacionário randômico
$S_{xy}(f)$	<i>Two-sided cross power spectral density</i>
$G_{xy}(f)$	<i>One-sided cross power spectral density function</i>
$S_{xx}(f)$	<i>Two-sided autospectral density functions</i> do sinal $x_k(t)$
$S_{yy}(f)$	<i>Two-sided autospectral density functions</i> do sinal $y_k(t)$
$G_{xx}(f)$	<i>One-sided autospectral density functions</i> do sinal $x_k(t)$

$G_{yy}(f)$	<i>One-sided autospectral density functions</i> do sinal $y_k(t)$
$G_{xy}(f_k)$	<i>One-sided cross power spectral density function</i> , versão discreta
$G_{xx}(f_k)$	<i>One-sided autospectral density functions</i> do sinal $x_k(t)$, versão discreta
$G_{yy}(f_k)$	<i>One-sided autospectral density functions</i> do sinal $y_k(t)$, versão discreta
$\tilde{G}_{xy}(f_k)$	Espectro de potência cruzada
$\tilde{G}_{xx}(f_k)$	Espectro de potência do sinal $x_k(t)$
$\tilde{G}_{yy}(f_k)$	Espectro de potência do sinal $y_k(t)$
Δf	Resolução no domínio da frequência
$w(t)$	Janela retangular
$w_h(t)$	Janela de Hanning
E	Fator de correção devido ao uso da janela de Hanning
T_r	Tempo total de medição
n_d	Número de segmentos de sinal sem <i>overlapping</i>
q	Fator de <i>overlapping</i>
M	Número de segmentos de sinal com <i>overlapping</i>
$NFFT$	Número de amostras por janela
$h(t)$	Resposta impulsiva
d	Distância entre microfones
$p_1(t)$	Pressão medida pelo microfone 1
$p_2(t)$	Pressão medida pelo microfone 2
I_n	Média temporal da intensidade sonora ativa na direção \vec{n}
ϕ_0	Diferença de fase de referência: ondas planas
ϕ_f	Diferença de fase real entre os pontos de medição
ϕ_s	Diferença de fase inerente aos canais de aquisição: <i>phase-mismatch</i>
δ_{pl}	<i>Pressure-intensity index</i> ou coeficiente de pressão-intensidade
δ_{pI0}	<i>Pressure-residual intensity index</i> ou coeficiente de pressão-intensidade residual
τ	Coeficiente de transmissão de potência sonora
$P(f)$	Pressão sonora à qual dois microfones são submetidos
$P_x(f)$	Pressão sonora registrada pelo canal ligado ao microfone x
$P_y(f)$	Pressão sonora registrada pelo canal ligado ao microfone y
$H_{xy}(f)$	Função de transferência
w_C	<i>Session object</i>
fS_C	Taxa amostral do <i>script</i>
H_x	Sensibilidade do microfone x
H_y	Sensibilidade do microfone y
$NPS_{médio}$	Nível de pressão sonora médio entre os dois sinais de microfones
NPS_x	Nível de pressão sonora medido pelo microfone x
NPS_y	Nível de pressão sonora medido pelo microfone y
w_p	Fator de correção de energia, igual ao inverso de E

$x_C(t)$	Sinal do microfone ligado ao canal 0, no domínio do tempo, em uma Medição de Calibração e em [Pa]
$y_C(t)$	Sinal do microfone ligado ao canal 1, no domínio do tempo, em uma Medição de Calibração e em [Pa]
$x_M(t)$	Sinal do microfone ligado ao canal 0, no domínio do tempo, em uma medição na qual aplica-se correção e em [Pa]
$y_M(t)$	Sinal do microfone ligado ao canal 1, no domínio do tempo, em uma medição na qual aplica-se correção e em [Pa]
$X_{Ch}(f)_i$	FFT de $x_C(t) \times \text{hanning}(NFFT)$ do i-ésimo segmento de sinal
$M1C$	Matriz de armazenamento referente ao sinal do microfone x
$M2C$	Matriz de armazenamento referente ao sinal do microfone y
HXY	Matriz que armazena segmentos de função de transferência
$Y_{Ch}(f)_i$	FFT de $y_C(t) \times \text{hanning}(NFFT)$ do i-ésimo segmento de sinal
H_{XY}	Função de transferência para correção da amplitude

SUMÁRIO

1	Introdução.....	33
1.1	Objetivos.....	35
1.1.1	Objetivo Geral	35
1.1.2	Objetivos Específicos	35
1.1.3	Organização do Texto.....	36
2	Base Teórica	37
2.1	Conceitos fundamentais de acústica.....	37
2.1.1	Som, pressão sonora e nível de pressão sonora.....	37
2.1.2	Propriedades do ar	39
2.1.3	Deslocamento, velocidade e aceleração de partículas	42
2.1.4	Absorção Sonora	44
2.1.5	Microfones.....	46
2.2	Campos de pressão sonora.....	48
2.2.1	Equação de <i>momentum</i>	48
2.2.2	Equação de conservação da massa	50
2.2.3	Equação da onda sonora	52
2.2.4	Solução da equação para ondas planas e estudo da propagação de ondas planas em dutos	53
2.3	Intensidade sonora	56
2.3.1	Trabalho e energia sonora	56
2.3.2	Propagação de energia sonora: intensidade sonora	59

2.3.3	Intensidade sonora em ondas planas.....	62
2.4	Análise de sinais	64
2.4.1	Aquisição de sinais acústicos	64
2.4.2	Processamento de sinais	67
2.5	Sonda de intensidade sonora do tipo 'p-p'	78
2.5.1	Princípio de medição do método 'p-p'	79
2.5.2	Erro causado pela aproximação do gradiente de pressão pela diferença finita	84
2.5.3	Erro causado por difração e dispersão sonora	84
2.5.4	Erro causado pela diferença de fase	86
2.5.5	Processamento de sinais	89
2.5.6	Aplicações práticas	90
3	Ensaio experimentais	93
3.1	Experimento para correção da diferença entre as fases dos microfones	93
3.2	Experimento para comparação de métodos de medição de intensidade sonora	97
4	Implementação do processamento de sinais.....	101
4.1	Aquisição e pré-processamento	101
4.2	Visão geral do processamento digital de sinais implementado	103
4.3	Espectro de potência e espectro de potência cruzada	105
4.4	Nível de pressão sonora, intensidade sonora e diferença de fase	110
4.5	Coefficiente de pressão-intensidade residual.....	111
4.6	Correção a partir da função de transferência	113
5	Resultados e Discussões	117
5.1	Resultados do experimento para correção da diferença entre as fases dos microfones	117

5.1.1 Dupla 1: Mic 1 e Mic 2.....	117
5.1.2 Dupla 2: Mic 2 e Mic 3.....	128
5.2 Resultados do experimento para comparação de métodos de medição de intensidade sonora	137
5.2.1 Dupla: Mic 1 e Mic 2.....	137
5.2.2 Dupla 2: Mic 2 e Mic 3.....	141
6 Estrutura Suporte do protótipo de sonda	146
7 Considerações finais.....	152
7.1 Contribuições deste trabalho	152
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	153
Apêndice A - Resultados da subseção 5.1	154
Apêndice B - Resultados da subseção 5.2	204
Apêndice C - Equipamentos e materiais utilizados	225
Referências Bibliográficas.....	229

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de equipamentos de medição dentro de universidades permite reduzir a dependência de equipamentos caros, criar soluções personalizadas, o surgimento de soluções inovadoras e a consolidação de conhecimentos teóricos. O presente estudo trata-se do desenvolvimento de uma sonda de intensidade sonora de baixo custo na sua fase inicial, e visa contribuir para o alcance dos benefícios supracitados.

A ideia do tema partiu da necessidade de se possuir uma sonda de intensidade sonora para a realização do projeto inicialmente idealizado pelo autor em conjunto com os seus orientadores. Na proposta inicial, seria necessário obter a intensidade sonora irradiada pelas superfícies de uma fonte sonora complexa e de grandes dimensões, para que esses dados servissem de entrada em um *software* de simulações acústicas.

Depois de realizar uma pesquisa de possíveis soluções, concluiu-se que não seria possível utilizar normas da série ISO 3740, que determinam a potência sonora a partir de medições de nível de pressão sonora, e que seria necessário usar a ISO 9614, que prescreve o uso de uma sonda de intensidade sonora. A ausência do equipamento no Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, a impossibilidade de aluguel e o custo muito elevado da sonda acabaram induzindo para uma pesquisa de soluções alternativas, durante a qual decidiu-se pelo desenvolvimento de um protótipo de sonda de intensidade sonora utilizando equipamentos disponíveis na universidade.

A partir dessa decisão, iniciou-se uma pesquisa aprofundada sobre a intensidade sonora como grandeza física e sobre os equipamentos capazes de medi-la experimentalmente: as sondas de intensidade sonora.

O trabalho “The theory of sound” realizado por John William Strutt Rayleigh em 1877-1878 é por muitos considerado o mais influente no estudo da teoria do som, e a grandeza chamada por ele de intensidade sonora teve grande importância sobre o mesmo (BRÜEL & KJÆR PUBLICATION, 1993). Naturalmente, devido ao destaque dessa grandeza física na teoria, ocorreu uma busca por um equipamento capaz de medi-la experimentalmente. Em 1932, Harry

Olson submeteu um pedido de patente para um sistema capaz de medir o fluxo de energia de ondas sonoras, mas apesar de ser considerado um marco inicial na busca por um equipamento capaz de medir a intensidade sonora, o equipamento não conseguiu utilização prática, como conta Frank Fahy (1995).

Do marco inicial de Harry Olson até a década de 1970, tentativas esporádicas de se medir intensidade sonora foram realizadas, todas elas sem atingir o objetivo final. Porém, vale ressaltar que mesmo pesquisas sem resultados práticos palpáveis foram de fundamental importância como base para trabalhos futuros bem-sucedidos.

O ano de 1977 foi fundamental no desenvolvimento da sonda de intensidade sonora que utiliza dois microfones alocados próximos um do outro: a sonda do tipo 'p-p'. No referido ano destacaram-se os artigos do J. Y. Chung e do F. J. Fahy, que aplicaram técnicas de processamento digital de sinais à teoria de intensidade sonora de maneira independente.

A partir da década de 1980, sondas de intensidade sonora do tipo p-p começaram a ser comercializadas. Os fabricantes tiveram participação ativa em melhorias, principalmente nas configurações dos transdutores de pressão sonora e no desenvolvimento de uma norma para a construção do equipamento (FRANK FAHY, 1995).

Atualmente, a sonda de intensidade sonora p-p é considerada uma tecnologia madura, com equipamentos comerciais consolidados, norma própria para construção deste tipo de instrumento e normas que preconizam a utilização do mesmo, além do fato da teoria base por trás da medição ser bem consolidada.

Apesar de ser uma tecnologia consolidada e de ter várias aplicações importantes na engenharia acústica, no Brasil, o preço destes instrumentos de medição restringe o uso dos mesmos, apenas poucas grandes universidades e empresas especializadas possuem o equipamento. Esse entrave faz com que o potencial de impacto causado pelo uso do equipamento não seja plenamente alcançado. Este trabalho almeja contribuir para uma mudança nessa realidade, desenvolvendo um protótipo de sonda de intensidade sonora que torne essa tecnologia mais acessível, capaz de atender algumas das aplicações em que se necessitaria de uma sonda comercial e, o mais importante, passível de ser reproduzido e melhorado de maneira livre.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo de sonda de intensidade sonora do tipo p-p de baixo custo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar uma revisão bibliográfica sólida sobre o tema, abordando toda a teoria e os procedimentos práticos necessários à construção de um protótipo de sonda de intensidade sonora.
- Desenvolver e implementar um processamento digital de sinais capaz de realizar os cálculos necessários para a obtenção do valor da intensidade sonora, seguindo o princípio de medição p-p.
- Validar a implementação da correção da diferença entre as respostas dos dois canais de aquisição, seguindo o método de Krishnappa (1981).
- Construir uma planta experimental capaz de submeter dois microfones a mesma pressão sonora, permitindo avaliar as respostas dos dois canais de aquisição antes e depois da correção aplicada.
- Desenvolver uma planta experimental na qual se obtenha uma propagação de ondas planas “puramente” progressivas, ou seja, ondas progressivas sem reflexão.
- Avaliar o sistema de medição de intensidade sonora comparando os resultados obtidos pelo protótipo proposto com os obtidos de maneira analítica para o caso de ondas planas progressivas.
- Disponibilizar de maneira aberta e sistematizada todo o processo de construção da sonda (desenhos das peças 3D, *software*, procedimentos experimentais, e etc.) para que, caso

se disponha de dois microfones de medição e uma placa de aquisição, seja possível reproduzir o protótipo desenvolvido.

1.1.3. Organização do Texto

Na seção Base Teórica fez-se uma revisão bibliográfica dos conceitos teóricos aplicados ao longo do projeto de pesquisa. Tal revisão contém: conceitos fundamentais de acústica; conceitos de processamento de sinais acústicos; a teoria da intensidade sonora e das sondas de intensidade sonora.

A seção Ensaio Experimentais apresenta os experimentos concebidos e executados, explicando as teorias nas quais se embasaram e as justificativas para a realização dos mesmos, além de esclarecer o processo de montagem e execução.

Em Implementação do Processamento de Sinais, a elaboração e implementação do *script* feito em MATLAB para aquisição e processamento de sinais é exposto, sendo utilizados fluxogramas e diagramas que simplificam o entendimento e facilitam a possível implementação em outras linguagens de programação.

A seção Resultados e Discussões mostra os resultados dos ensaios experimentais através de gráficos e tabelas, além de avaliar e analisar todos os dados obtidos.

A seção chamada Design da Sonda expõe o design, elaborado computacionalmente, de uma “estrutura suporte” para o protótipo de sonda de intensidade sonora e, em seguida, mostra-se as peças materializadas após impressão 3D.

A seção chamada Considerações Finais fecha a dissertação fazendo um balanço dos resultados alcançados e sugere estudos para trabalhos futuros.

2 BASE TEÓRICA

2.1 Conceitos fundamentais de acústica

2.1.1 Som, pressão sonora e nível de pressão sonora

Para Beranek & Mellow (2012), diz-se existir som caso um distúrbio, propagado através de um material elástico, provoque uma interação na pressão ou no deslocamento das partículas do material que possa ser detectado por uma pessoa ou por um instrumento.

Uma outra definição pertinente de som é dada por Frank Fahy (1995): o fenômeno físico conhecido como "som" em um fluido, ou seja, um gás ou um líquido, envolve essencialmente distúrbios variáveis no tempo da densidade do meio em torno do seu valor de equilíbrio.

A pressão sonora instantânea $p(t)$ é definida como a diferença entre a pressão local de um ponto e a pressão ambiente p_a , também chamada de pressão estática, em um determinado instante t , sendo esse desvio causado pela passagem de uma onda sonora (BARRON, 2003). A unidade de pressão sonora é Pascal [Pa], que é igual a Newton por metro quadrado [N/m^2] no Sistema Internacional.

Para o caso de um tom puro, ou seja, uma oscilação de pressão sonora com uma única frequência, a pressão sonora instantânea varia entre p_{max} e p_{min} ao longo do tempo e representa-se tal oscilação por uma função senoidal ou cossenoidal. A Eq. 2.1 representa variações de pressão de um sinal tonal em um determinado ponto, sendo A a amplitude máxima de deslocamento, t a variável temporal [segundos], f a frequência do movimento em [Hz] e ϕ a fase em [rad].

$$p(t) = A \cos(2\pi ft + \phi) \quad (2.1)$$

Na descrição de sinais que possuem diversas componentes de frequência, as funções senoidais e cossenoidais também se fazem extremamente úteis, já que, em geral, pode-se descrever

qualquer sinal deste tipo através do somatório, possivelmente infinito, de senos e cossenos, como explica Brandão (2009). Essa propriedade dos senos e cossenos é abordada com maiores detalhes na teoria da transformada de Fourier, apresentada no item 2.4.2.1.

Na acústica, a análise do som sempre parte de um conjunto de valores de pressão sonora instantânea, nunca de um valor individual. Bistafa (2006) explica que o comportamento temporal da pressão sonora é a informação que se extrai de um registrador gráfico acoplado a um microfone, que capta a pressão sonora em um determinado ponto do espaço durante um intervalo de tempo. Esse registro, ao qual se dá o nome de forma de onda, contém uma série de valores de pressão instantânea. A Fig. 2.1 mostra a forma de onda de um ruído.



Figura 2.1: Forma de onda de um ruído.

Observando a forma de onda da Fig. 2.1, por se tratar de um sinal com diversas componentes de frequências, percebe-se que a análise no domínio do tempo é complexa e que é inviável retirar informações importantes, como amplitudes, frequências presentes e fases com uma análise gráfica simples, sem recorrer a uma mudança para o domínio da frequência. Porém, ainda no domínio do tempo, existem valores únicos importantes, Bistafa (2006) afirma que o valor de pressão sonora eficaz p_{eficaz} , também chamada de valor médio quadrático p_{rms} , é o valor único que melhor representa uma forma de onda, já que se relaciona diretamente com a energia transportada pela onda sonora.

$$p_{eficaz} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N p_i^2}{N}} \quad (2.2)$$

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |p(t)|^2 dt} \quad (2.3)$$

A Eq. 2.2 mostra o cálculo do valor de p_{eficaz} no caso de uma medição discreta com N valores de pressão instantânea p_i , já a Eq. 2.3 mostra o cálculo usado para um sinal contínuo $p(t)$. Brandão (2009) explica que o valor p_{rms}^2 expressa a energia do sinal calculada no domínio do tempo.

A audição humana abrange uma variação muito ampla de energia acústica, mais do que de um até dez trilhões do mais baixo som que podemos detectar até um som ensurdecador. A magnitude tão grande dessa variação torna difícil o manejo de números para problemas acústicos comuns (IRVINE & RICHARDS, 1998). Além disso, o ser humano percebe volume sonoro de maneira logarítmica e tende a integrar sons cujos intervalos são muito próximos (BRANDÃO, 2016). Tais fatos levaram à definição do nível de pressão sonora (NPS), uma grandeza logarítmica que leva em conta o valor médio quadrático da pressão sonora e utiliza o valor do limiar da audição, que é de $0,00002$ [Pa] em 1000 [Hz], como pressão de referência (BRANDÃO, 2016). A Eq. 2.4 define o valor de NPS.

$$NPS = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{2 \times 10^{-5}} \right)^2 [dB][Pa \text{ ref. } 20\mu Pa] \quad (2.4)$$

2.1.2 Propriedades do ar

Tendo em vista que o presente estudo trata somente da propagação de som pelo ar, faz-se pertinente uma pequena revisão das propriedades deste gás, principalmente daquelas diretamente ligadas à propagação do som.

O ar possui densidade de massa e elasticidade volumétrica. A elasticidade faz o ar resistir ao ser comprimido, tendendo a voltar ao seu estado original, e a inércia da densidade de massa faz com que o movimento se propague, proporcionando assim os dois requisitos do movimento de ondas (MORSE & INGARD, 1986). A natureza elástica estática do ar em sua resposta a deformações volumétricas pode ser demonstrada fechando o furo de uma bomba de encher pneu de bicicleta e pressionando-a, ao soltar o pistão, percebe-se que o mesmo retorna praticamente para sua posição inicial, como exemplificam Beranek & Mellow (2012).

Pelo fato de fenômenos acústicos normalmente possuírem pequena amplitude, a análise que acompanha a maior parte das aplicações de acústica é feita em cima de uma teoria linearizada (ALAN D. PIERCE, 2007), já que não-linearidade acústica no ar começa a se tornar significativa quando se atinge níveis de pressão sonora acima de 135 [dB].

O coeficiente que relaciona pequenas variações de pressão com pequenas deformações volumétricas é o módulo de bulk (FRANK FAHY, 1995). Para se aprofundar na relação de pressão x densidade, é preciso antes esclarecer que, como frisa Lawrence E. Kinsler (2000), processos acústicos são praticamente isentrópicos (adiabáticos e reversíveis), isso porque a condutividade térmica do ar e os gradientes de temperatura do distúrbio são pequenos o suficiente para que não ocorra transferência de energia térmica considerável entre elementos adjacentes de ar.

A expressão para o módulo de bulk adiabático de um gás pode ser derivada através da análise do gráfico de variação de pressão por densidade apresentado por Frank Fahy (1995), reproduzido na Fig. 2.2. Nessa figura, P representa a pressão do fluido, P_0 a pressão de equilíbrio (média, estática), p a pressão acústica, ρ a densidade, ρ_0 a densidade média e γ a razão de calor específico.

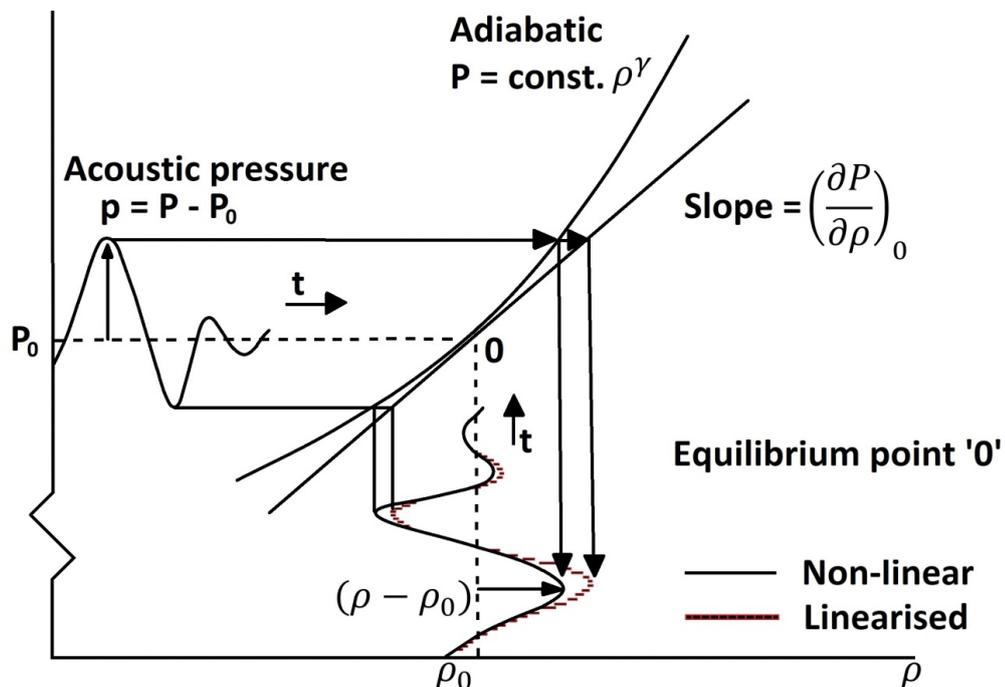


Figura 2.2: Ilustração das relações não-linearizadas e linearizadas entre pressão acústica e densidade.

Fonte: Frank Fahy, 1995, p.14.

A Fig. 2.2 ilustra como p varia com ρ . Percebe-se que para grandes variações do ponto de equilíbrio a relação é não-linear, porém a mesma é assintoticamente linear à medida que a mudança fracional de pressão tende a zero (FRANK FAHY, 1995). Respeitando a premissa de que o processo acústico é adiabático, o comportamento acústico de um gás perfeito é representado pela Eq. 2.5.

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma \quad (2.5)$$

Lawrence Kinsler (2000), no entanto, explica que para o ar a equação adiabática é mais complexa e que, nesse caso, é melhor utilizar uma expansão de Taylor (Eq. 2.6), na qual as derivadas parciais são determinadas para compressões e expansões do ar em relação a densidade de equilíbrio.

$$P = P_0 + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0)^2 + \dots \quad (2.6)$$

Para pequenos valores de condensação (s), definida como $s = (\rho - \rho_0)/\rho_0$, é possível fazer uma aproximação de primeira ordem, retendo somente o primeiro termo em $(\rho - \rho_0)$, afim de gerar a relação linear entre variação de pressão e variação de densidade que é representada pela Eq. 2.7, sendo $B = \rho_0(\partial P/\partial \rho)_{\rho_0}$ o módulo de bulk adiabático.

$$P - P_0 \approx B (\rho - \rho_0)/\rho_0 \quad (2.7)$$

Essa aproximação é válida para uma condensação pequena. Para um nível de pressão sonora de 100 [dB] tem-se uma pressão sonora de 2 [Pa] e, portanto, uma razão p/P_0 de 0,00002, sabendo-se que a condensação é da mesma ordem de grandeza dessa razão, fica clara a validade da aproximação na maior parte dos eventos acústicos recorrentes.

Ainda sobre propriedades do ar, Frank Fahy (1995) explica que o mesmo, por ser isotrópico e homogêneo, possui as mesmas propriedades em todas as direções, dessa forma, o efeito de um distúrbio local e isolado de densidade se espalha de maneira uniforme em todas as direções.

Por fim, ressalta-se que a pressão no ar é um escalar, *i.e.*, uma quantidade não direcional. Uma força aplicada em um pequeno cubo de ar hipotético causará um incremento de pressão uniforme ao longo desse pequeno volume (BERANEK & MELLOW, 2012).

2.1.3 Deslocamento, velocidade e aceleração de partículas

A Fig. 2.3 mostra o exemplo clássico do pistão criando oscilações de densidade através de um movimento harmônico simples dentro de um tubo infinito, nela tem-se a representação estática de uma onda sonora. Caso se acompanhe essa situação hipotética ao longo do tempo e se observe um pequeno volume de ar, nota-se que o mesmo possui um movimento semelhante ao do pistão, ou seja, ele parte de uma velocidade zero, sofre uma aceleração que faz sua velocidade variar até um ponto de velocidade máxima, desacelera até uma mudança de sentido onde a sua velocidade será novamente zero, novamente sofre uma aceleração... e assim por diante. Eric Brandão (2009) explica que essa velocidade local é chamada de velocidade de partícula $\vec{u}(\vec{r}, t)$, com unidade em [m/s], e que suas variações junto com as variações de pressão formam as duas principais variáveis que descrevem o comportamento da onda sonora.

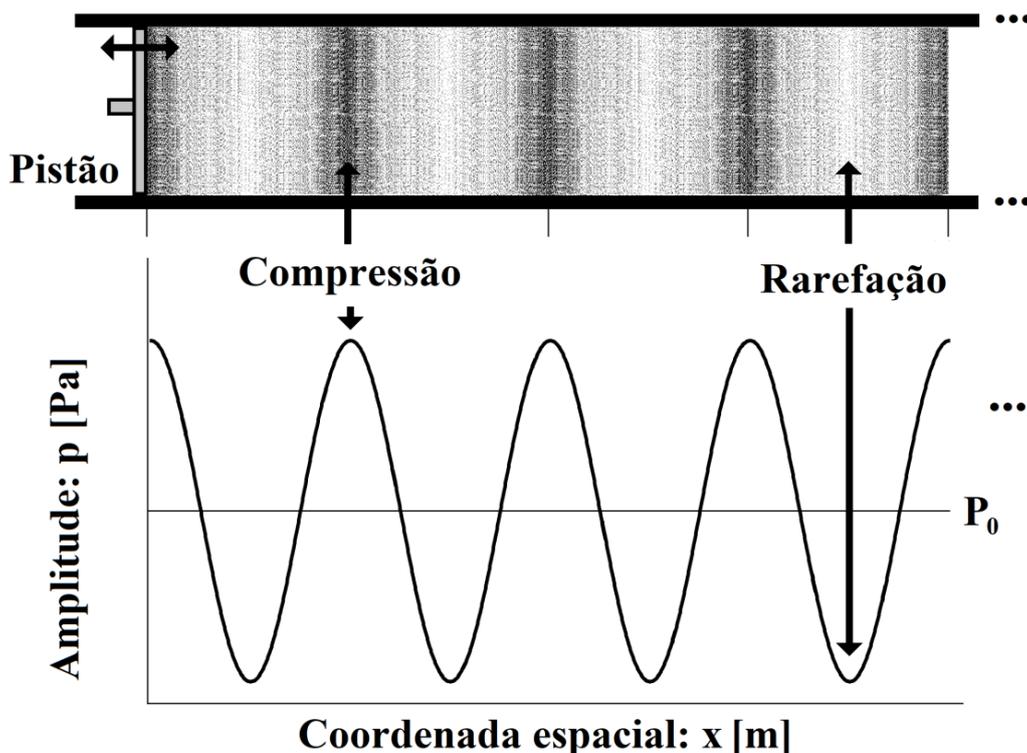


Figura 2.3: Tubo infinito com um pistão oscilando em movimento harmônico simples.

Fonte: Adaptado de Eric Brandão, 2009, p. 63.

Finn Jacobsen (2001) declara que, apesar da pressão sonora ser a quantidade acústica mais importante, saber a velocidade de partícula, e conseqüentemente conhecer o comportamento do fluxo de energia acústica, é essencial em várias áreas da acústica, principalmente nos estudos de acústica geométrica e de acústica por energia.

Uma característica importante que difere a velocidade de partícula da pressão sonora é que a primeira é uma quantidade vetorial enquanto a segunda é um escalar. Na Fig. 2.4 tem-se a representação vetorial: da posição de partícula \vec{r} e suas componentes (x, y, z) ; da velocidade de partícula \vec{u} , definida por $\vec{u} = \partial\vec{\xi}/\partial t$, e suas componentes (u, v, w) ; e do deslocamento de partícula $\vec{\xi}$ e suas componentes (ξ, η, ζ) .

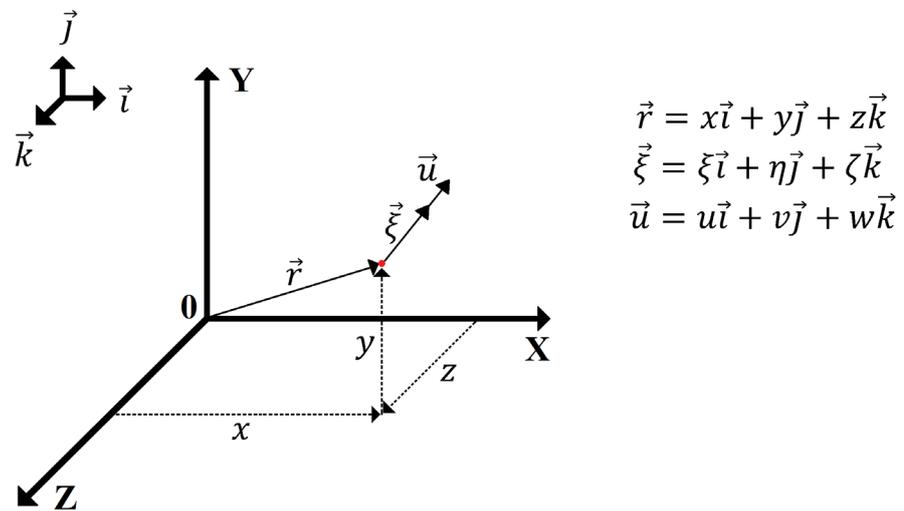


Figura 2.4: Representação vetorial da posição \vec{r} , velocidade \vec{u} e deslocamento $\vec{\xi}$ de partícula.
Fonte: Adaptado de Frank Fahy, 1995, p.16.

A derivação da aceleração de partícula no ar é mais complexa do que nos sólidos, isso porque as partículas podem se envolver em padrões de fluxo complexos. Frank Fahy (1995) explica que, em um fluxo constante, a velocidade de partícula muda com a mudança de posição e que, em um fluxo instável, a velocidade de partícula em cada posição fixa do espaço muda em virtude do progresso do tempo. A Eq. 2.8 expressa uma pequena mudança na velocidade de partícula e a Eq. 2.9 a aceleração total.

$$\delta\vec{u} = \left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial t}\right)\delta t + \left[\left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right) + \left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right) + \left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)\right]\delta t \quad (2.8)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + u \left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial y} \right) + w \left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

Pode-se aproximar os três últimos termos à direita da Eq. 2.9 a zero para a maioria das situações corriqueiras em acústica, com exceção de campos sonoros muito fortes, como em dutos exaustores de motores de combustão interna e dutos de ventilação, por exemplo. Isso porque, como explica Frank Fahy (1995), em geral, estas derivadas convectivas são muito pequenas em relação ao primeiro termo ($\partial\vec{u}/\partial t$), que é referente à aceleração devido a variação no tempo do movimento do fluido em um determinado ponto fixo no espaço.

2.1.4 Absorção Sonora

O estudo da absorção sonora pode ser muito complexo dependendo do contexto acústico no qual esse fenômeno físico se faz presente. Para um entendimento conceitual e matemático aprofundado, Lawrence Kinsler (2000) é uma ótima fonte bibliográfica, pois apresenta detalhadamente o processo pelo qual a absorção sonora se dá. É de interesse do presente estudo discutir apenas a absorção sonora que ocorre nos contornos de um meio e que é resultado, majoritariamente, da fricção gerada pelo movimento das partículas de ar dentro dos poros de materiais absorventes. Essa restrição é pertinente porque o conceito de absorção sonora é aplicado na montagem de uma terminação anecóica de um tubo, na qual se utiliza materiais absorvedores de som de natureza esponjosa e fibrosa.

Irvine & Richards (1998) explicam que a absorção sonora é definida como toda energia sonora que incide em uma superfície e não é refletida de volta. Isso inclui tanto o som que teve sua energia sonora de fato dissipada em forma de calor pelo material, como o som que foi transmitido através dele.

A absorção sonora de um material é expressa através do coeficiente de absorção sonora (α), um parâmetro adimensional que varia de zero (refletor perfeito) até um (absorvedor perfeito) (IRVINE & RICHARDS, 1998). Devido ao fato do coeficiente de absorção sonora variar com a frequência na grande maioria dos casos, um material absorvente é descrito por coeficientes em bandas de oitava ou de um terço de oitava.

Bistafa (2009) apresenta a Eq. 2.10 que define α , sendo: $I_{absorvida}$ a intensidade sonora do som absorvida, $I_{refletida}$ a intensidade sonora do som refletido e $I_{incidente}$ a intensidade sonora do som incidente.

$$\alpha = \frac{I_{absorvida}}{I_{incidente}} = \frac{I_{incidente} - I_{refletida}}{I_{incidente}} \quad (2.10)$$

Em um tubo, uma terminação anecóica ideal é aquela em que zero por cento da energia sonora incidente é refletida. Atingir esse valor utilizando materiais absorventes significaria um coeficiente α igual a um para todas as frequências, o que é impossível de se conseguir na prática, principalmente nas baixas frequências. Na bibliografia do assunto não se encontrou descrição detalhada da construção de uma terminação anecóica para tubos utilizando materiais absorvedores, porém destaca-se alguns princípios importantes e úteis:

- A reflexão sonora está ligada à diferença de impedância entre meios, materiais com valores de impedância próximos ao do ar geram menor reflexão sonora (KYLE MYERS, 2012).
- Geralmente, coeficientes de reflexão diminuem com o aumento da espessura do material (DUNN & DAVERN, 1986).
- O aumento da espessura de materiais porosos e fibrosos aumenta a absorção sonora, principalmente nas baixas frequências (COX & D'ANTONIO, 2004). Caio Sabido (2014) abordou o efeito da duplicação da espessura de materiais absorvedores em sua dissertação, seus resultados mostram um aumento significativo da absorção sonora até mesmo nas baixas frequências.
- Em caso do uso de camadas de materiais diferentes, Dunn & Davern, (1986) explicam que é preferível utilizar materiais com menor resistividade ao fluxo e menos reflexivos na frente, de maneira a atenuar a reflexão frontal e “encorajar” a frente de onda a entrar na estrutura do material, deixando para camadas posteriores materiais mais reflexivos, que possuem maior absorção sonora.

2.1.5 Microfones

Chama-se de transdutor todo dispositivo que transforma um tipo de energia em outro. Microfones são transdutores eletroacústicos, pois convertem energia acústica em energia elétrica (GLEN BALLOU, 2008). Esta subseção trata somente do grupo de microfones que respondem às mudanças de pressão sonora, chamados em inglês de *pressure microphones*, e que são do tipo eletrostático, também conhecidos como microfones capacitivos ou microfones a condensador.

Beranek & Mellow (2012) explicam que em princípio o microfone eletrostático consiste em um fino diafragma situado a uma pequena distância de uma placa traseira, sendo que ambos estão eletricamente isolados um do outro e formam um capacitor, antigamente chamado de condensador. A carga desse capacitor é gerada por uma tensão de polarização externa ou pelas propriedades do próprio material, como no caso dos microfones pré-polarizados.

A grande maioria dos microfones utilizados em medições são do tipo capacitivo e podem ser de campo livre, campo de pressão e incidência aleatória. Estes três tipos de microfones operam de maneira similar nas frequências mais baixas, mas conforme a frequência medida se torna maior, torna-se crítico selecionar o tipo adequado para se obter resultados de teste mais precisos (PCB PIEZOELECTRONICS, 2013).

O tipo de microfone mais comum é o de campo livre. Ele é mais preciso ao medir o som que irradia de uma única direção e fonte, sendo este som apontado diretamente (ângulo de incidência 0°) ao diafragma do microfone, que costuma ser operado em uma área que minimiza o som de reflexões (PCB Piezoelectronics, 2013). A correção pela influência do corpo do microfone no campo de som pode ser feita por pós-processamento de espectro de som medido, na calibração e através do design do microfone (BRÜEL & KJÆR PUBLICATION, 1996).

Um segundo tipo é o microfone de pressão (*pressure microphone*), tipicamente colocado em um duto ou cavidade para medir a pressão acústica. Em geral fica localizado em paredes ou painéis, como mostra a Fig. 2.5, e mede a pressão sonora que existe na frente do diafragma, sem a necessidade de corrigir a sua própria presença (PCB Piezoelectronics, 2013). Testes de pressão sonora exercida sobre paredes e asas de avião e testes dentro de estruturas como tubos, caixas ou cavidades são exemplos de utilização deste tipo de microfone.

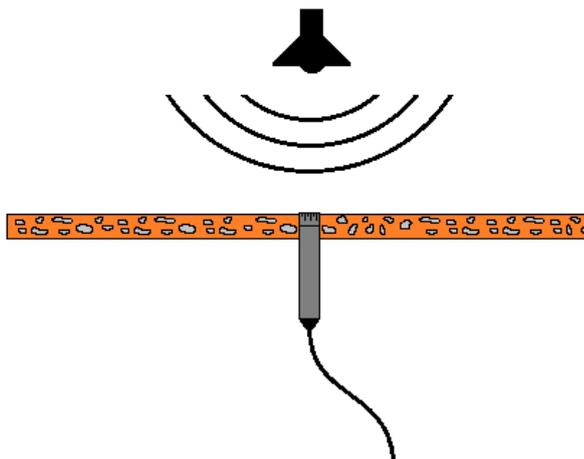


Figura 2.5: Exemplo de posicionamento de microfones do tipo *pressure-field*.

A pressão sonora de um certo ponto em um campo difuso é criada por ondas que, ao longo de um determinado tempo, chegam a esse ponto vindas de todas as direções (BRÜEL & KJÆR Publication, 1996). Tendo em vista que microfones não são igualmente sensíveis às ondas sonoras provenientes de diferentes direções, à medida que a pressão é diferente para diferentes ângulos, os microfones de campo difuso são feitos para ter respostas uniformes para sinais chegando simultaneamente de todos os ângulos. No *Microphone Handbook* da PCB Piezotronics (2013) é explicado que o microfone de incidência aleatória, terceiro tipo aqui descrito, irá compensar a sua própria presença no campo e que uma média do efeito de todos os ângulos de incidência calibrados é levada em consideração, a fim de produzir uma resposta precisa em um campo difuso. Isto é realizado através do design e da calibração pelo fabricante.

Além das características já mencionadas, existem outras que são importantes para a escolha do microfone a ser usado para uma dada finalidade: sensibilidade, resposta em frequência, diretividade, faixa dinâmica, capacitância, estabilidade, entre outras. Porém, como o presente estudo foi feito com o uso de microfones de medição de alta qualidade e parte-se do pressuposto que se tenha disponíveis instrumentos desse tipo para sua reprodução, as características supracitadas neste parágrafo são geralmente atendidas para a finalidade proposta.

O objetivo desta concisa revisão sobre microfones é acautelar o leitor, que possivelmente deseja seguir o presente trabalho para montar um protótipo de sonda de intensidade sonora de baixo custo, a respeito de algumas diferenças que existem entre os tipos de microfones de medição mais comuns, deixando-o atento para possíveis limitações que podem ser impostas dependendo dos instrumentos que se encontram a sua disposição.

2.2 Campos de pressão sonora

2.2.1 Equação de *momentum*

Partículas de fluidos, como qualquer outra matéria, obedecem às leis de movimento de Newton de acordo com o grau de adequação do quadro de referência escolhido (FRANK FAHY, 1995). Kinsler et. al. (2000) explica que a equação de conservação da quantidade de movimento pode ser obtida aplicando a segunda lei de Newton à um pequeno volume de gás localizado em um meio homogêneo.

Para fazer a dedução da equação de conservação da quantidade de movimento, imagina-se um pequeno volume de gás enclausurado em uma “caixa” de lados flexíveis e sem peso, como ilustrado na Fig. 2.6. É preciso assumir também, como sugerido por Beranek & Mellow (2012), que não existe atrito na interação das partículas de dentro com as de fora da caixa, assim as únicas forças agindo no gás enclausurado são causadas pela pressão nas faces da caixa.

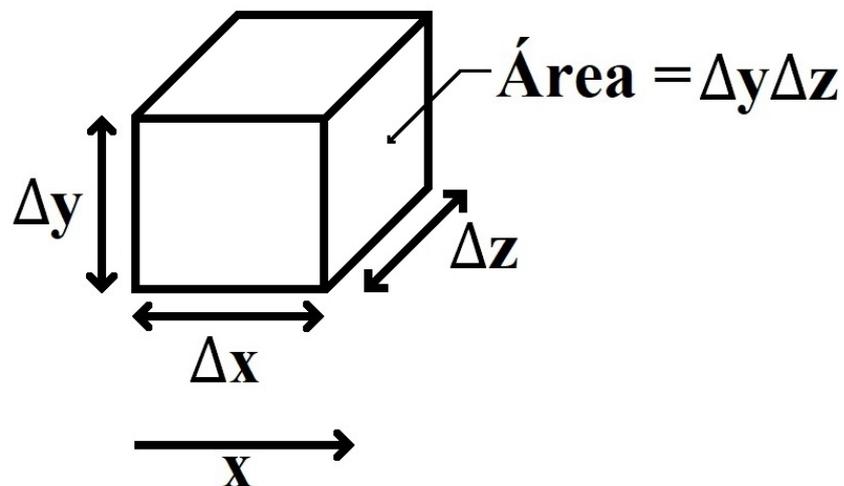


Figura 2.6: Pequeno volume de gás hipotético enclausurado.
Fonte: Adaptado de Beranek & Mellow, 2012, p. 22.

Supondo que existe um aumento de pressão sonora no sentido positivo de x e que tal aumento se dá a uma taxa espacial de $\partial p/\partial x$, a diferença ΔF entre as forças agindo nas duas faces é igual à taxa na qual a força muda ao longo da distância vezes o comprimento incremental da caixa, como mostra a Eq. 2.11, apresentada por Beranek & Mellow (2012). Percebe-se que um gradiente positivo causa uma aceleração negativa da caixa na direção de x .

$$\Delta F = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z \quad (2.11)$$

Levando em conta que o volume V é expresso por

$$V = \Delta x \Delta y \Delta z, \quad (2.12)$$

tem-se

$$\Delta F / V = - \partial p / \partial x. \quad (2.13)$$

Pela Lei de Newton, a força por unidade de volume ($\Delta F / V$) deve ser igual a taxa temporal de mudança de momento por unidade de volume da caixa (BERANEK & MELLOW, 2012). Para montar a Eq. 2.14, considera-se ainda que a massa de gás dentro da caixa é constante e representada por ρV e que u é a velocidade média na direção x do gás dentro da caixa.

$$\Delta F / V = - \partial p / \partial x = (\rho V / V) (\partial u / \partial t) = \rho (\partial u / \partial t) \quad (2.14)$$

Como já explicado, de maneira geral, pode-se assumir que, nas situações corriqueiras de engenharia acústica, a mudança na densidade do gás causada por uma onda sonora é pequena o suficiente, então a densidade instantânea ρ pode ser aproximada pela densidade média ρ_0 . Assim pode-se reescrever a equação da seguinte maneira:

$$- \frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (2.15)$$

Ao se utilizar a mesma metodologia descrita acima nas direções y e z , encontra-se:

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.16)$$

e

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} . \quad (2.17)$$

Por fim, sabendo que o divergente ∇ é definido como

$$\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z, \quad (2.18)$$

chega-se na Eq. 2.19, equação de *momentum* tridimensional.

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (2.19)$$

2.2.2 Equação de conservação da massa

Para conectar o movimento do fluido com a sua compressão ou rarefação, é preciso ter uma equação que relaciona a velocidade de partícula e a densidade instantânea (KINSLER et. al. 2000). Morse & Ingard (1986) explicam que tal equação é importante pois é preciso expressar, matematicamente, o fato de que um fluxo que atravessa uma superfície fechada no fluido produz uma mudança nas propriedades do fluido dentro da superfície. Na dedução dessa expressão será usado o exemplo de um pequeno volume ($\delta V = \delta x \delta y \delta z$) de ar pelo qual passa um fluxo de massa, como mostra a Fig. 2.7.

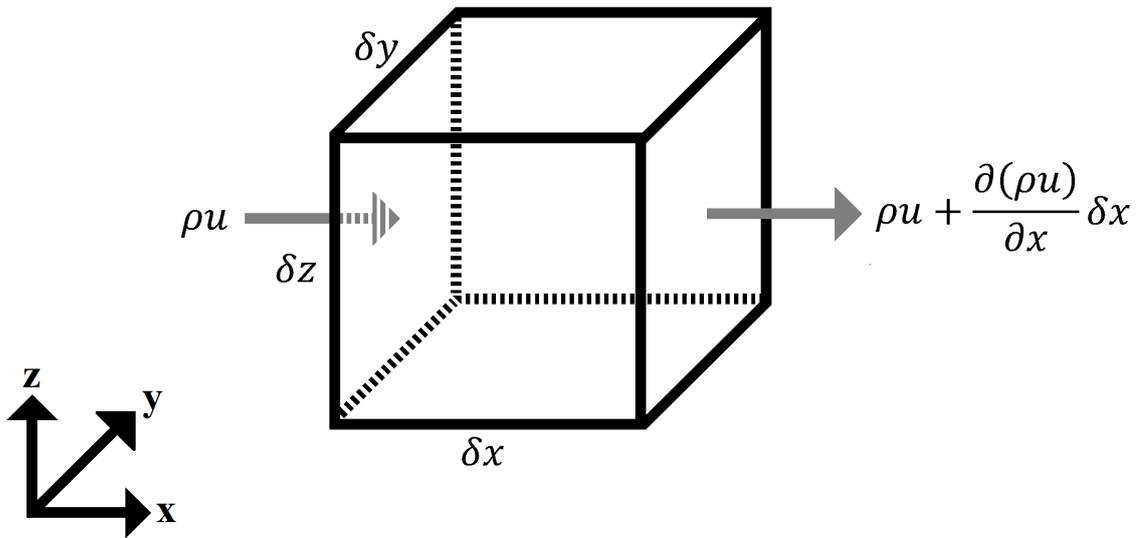


Figura 2.7: Um pequeno elemento de volume de ar.

Fonte: Adaptado de Fundamentals of Acoustics, Kinsler et. al., 2000, p. 117.

Inicia-se a dedução, que é baseada na apresentada por Frank Fahy (1995), escrevendo que a taxa de fluxo de massa que entra no volume de controle na direção x é

$$(\rho u) \delta y \delta z \quad (2.20)$$

e a taxa de massa que sai do volume de controle na direção x é

$$[\rho u + (\partial(\rho u)/\partial x) \delta x] \delta y \delta z . \quad (2.21)$$

Ao se reescrever as Eq. 2.20 e 2.21 levando em consideração as direções y e z , obtém-se as Eq. 2.22 e 2.23.

$$(\rho u) \delta y \delta z + (\rho v) \delta x \delta z + (\rho w) \delta x \delta y \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} & [\rho u + (\partial(\rho u)/\partial x) \delta x] \delta y \delta z + [\rho v + (\partial(\rho v)/\partial y) \delta y] \delta x \delta z + \dots \\ & + [\rho w + (\partial(\rho w)/\partial z) \delta z] \delta x \delta y \end{aligned} \quad (2.23)$$

Tendo em vista que um fluxo de saída de massa deve ser balanceado por uma diminuição da densidade do volume, escreve-se que:

$$[\partial(\rho u)/\partial x + \partial(\rho v)/\partial y + \partial(\rho w)/\partial z]\delta V = -[\partial(\rho u)/\partial t]\delta V . \quad (2.24)$$

Para o caso de pequenos distúrbios, uma análise de ordem de magnitude mostra que essa equação não-linear pode ser linearizada, gerando a Eq. 2.25.

$$\rho_0(\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z) + \partial\rho/\partial t = 0 \quad (2.25)$$

Considerando a representação mostrada pela Eq. 2.18, a Eq. 2.25 é reescrita da seguinte maneira:

$$\rho_0(\nabla\vec{u}) + \partial\rho/\partial t = 0 . \quad (2.26)$$

A Eq.2.26 é chamada de equação de conservação da massa ou equação de continuidade.

2.2.3 Equação da onda sonora

Relações entre variações de quantidades físicas no tempo e espaço são inerentes a propagação de distúrbios causados por fenômenos ondulatórios. Até então, foram derivadas: 1) as relações entre pressão acústica e densidade de fluido; 2) as variáveis cinemáticas deslocamento, velocidade e aceleração de partícula. Frank Fahy (1995) ressalta que essas variáveis supracitadas claramente não são independentes entre si e que é possível derivar equações com apenas uma variável dependente.

Kinsler et. al. (2000) sugere que a dedução da equação de onda, que apresenta apenas a pressão acústica como variável dependente, seja feita através de manipulações matemáticas das equações de conservação de massa e de continuidade, Eq. 2.26 e 2.19, respectivamente.

Primeiro aplica-se na Eq. 2.26 a derivada parcial no tempo, gerando a Eq. 2.27.

$$\rho_0 \frac{\partial(\nabla\vec{u})}{\partial t} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = 0 \quad (2.27)$$

Em seguida, aplica-se o operador divergente na Eq. 2.19, gerando a Eq. 2.28.

$$\rho_0 \nabla \frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + \nabla^2 p = 0 \quad (2.28)$$

Com essas duas novas equações, fica possível eliminar os termos referentes à velocidade da partícula para chegar na Eq. 2.29.

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} \quad (2.29)$$

Por fim, assumindo uma relação linear $p = c_0^2 \rho$, em que c_0 é a velocidade do som no meio, chega-se à equação de onda linearizada mostrada a seguir:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (2.30)$$

2.2.4 Solução da equação para ondas planas e estudo da propagação de ondas planas em dutos

A equação de onda apresentada no item anterior está na forma referente ao sistema de coordenadas retangulares, porém a mesma também pode ser apresentada na forma de coordenadas cilíndricas e polares. Essa escolha, de maneira geral, está fortemente ligada à forma geométrica do contorno do fluido e da distribuição de fontes. Mas, independentemente da escolha do sistema de coordenadas, o fato é que na maioria dos casos práticos de engenharia acústica não existe solução analítica exata para essa equação, porque fontes e condições físicas de contorno são geometricamente muito complexas.

No presente trabalho, a propagação sonora através de ondas planas é muito importante, primeiramente porque os ensaios experimentais serão montados com objetivo de atingir esse tipo de propagação, segundo porque na teoria base do princípio p-p de medição de intensidade sonora existem algumas aproximações que usam esse tipo de propagação como referência. Isso justifica: a escolha de apresentar a equação de onda no sistema de coordenadas retangulares, o fato de se abordar somente a solução da equação para ondas planas e o aprofundamento na teoria desse tipo de propagação de ondas sonoras.

Um exemplo de propagação de ondas planas ocorre em um tubo circular de paredes rígidas e com dimensões transversais pequenas, no qual ondas sonoras de pequenas amplitudes se propagam. Nesse caso, em todas as seções transversais do tubo, a pressão acústica p e a velocidade de partícula u são as mesmas em todos os pontos. Munjal (1987) explica que a frente de onda, também chamada de superfície de fase, definida como a superfície em que todos os pontos possuem a mesma amplitude e fase para p e u , é um plano normal à direção de propagação, que no caso de um tubo, é o eixo longitudinal (Fig. 2.8).

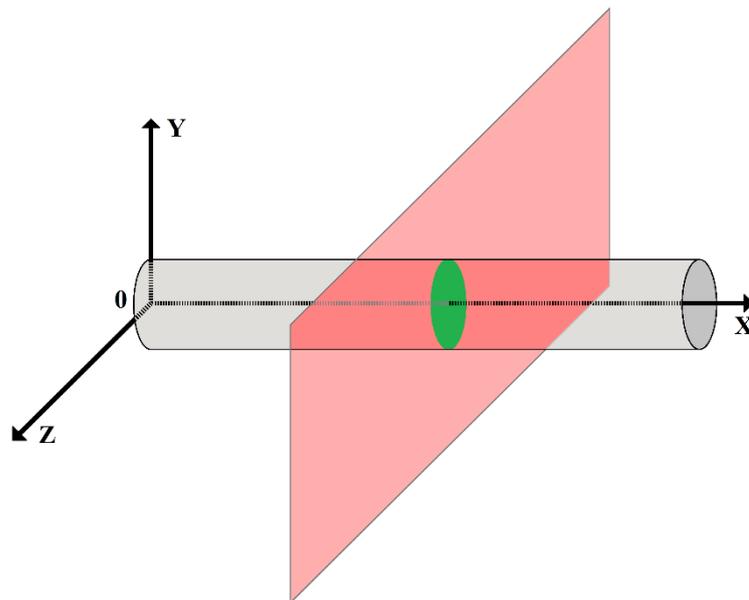


Figura 2.8: Seção transversal de um tubo que possui o mesmo valor de pressão e velocidade de partícula em todos os pontos.

No parágrafo acima, ao se mencionar dimensões pequenas, fica implícito que existem limitações para que a propagação sonora se dê através de ondas planas. Munjal (1986) afirma que existe uma frequência de corte (f_c), para cada tubo circular, abaixo da qual se garante que a propagação de som se dá por ondas planas e apresenta a Eq. 2.31.

$$f_c = \frac{1,84}{\pi D} c_0 \quad (2.31)$$

A equação de onda homogênea e linearizada (Eq. 2.30) para o caso de ondas planas se propagando na direção x se torna

$$\frac{\partial p}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial p}{\partial t^2}, \quad (2.32)$$

cuja solução geral é dada por

$$p(x, t) = f(c_0 t - x) + g(c_0 t + x), \quad (2.33)$$

sendo f e g funções arbitrárias que dependem das condições de contorno temporal e espacial para serem obtidas para um caso particular e que, segundo Beranek & Mellow (2012), devem possuir derivadas contínuas de primeira e segunda ordem.

O primeiro e o segundo termos do lado direito da Eq. 2.33 representam distúrbios sendo propagados nos sentidos positivo e negativo de x , respectivamente.

A velocidade de partícula pode ser encontrada combinando a equação de *momentum* (Eq. 2.19) com a solução geral (Eq. 2.33), dando origem a Eq. 2.34. Sabendo-se que a impedância acústica característica é dada por $Z_c = \rho_0 c_0$, percebe-se que tal grandeza se encontra nesta equação.

$$u(x, t) = \left(\frac{1}{\rho_0 c_0} \right) f(c_0 t - x) - \left(\frac{1}{\rho_0 c_0} \right) g(c_0 t + x) \quad (2.34)$$

2.3 Intensidade sonora

2.3.1 Trabalho e energia sonora

Aqui será apresentada uma revisão dos conceitos e formulações da área da física referente ao estudo de energia e trabalho, para em seguida apresentar alguns conceitos e formulações específicas da energia sonora. Fez-se isso porque o estudo da propagação de energia acústica é preliminar ao estudo da intensidade sonora.

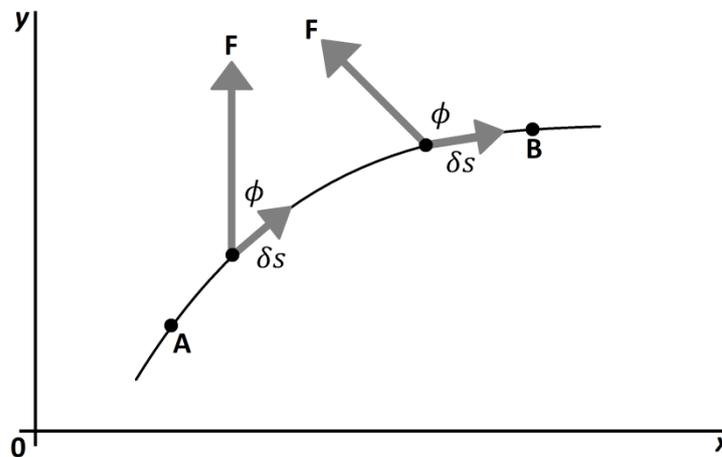


Figura 2.9: Deslocamento de uma partícula de A até B sob a atuação da força variável \vec{F} .
Fonte: Adaptado de Física 1, Halliday et. al., 1996.

Halliday et. al. (1996) explica que considerando uma força \vec{F} , variável tanto em sentido como em módulo, atuando sobre uma partícula que percorre uma trajetória curvilínea \vec{s} , que começa no ponto A e termina no ponto B (Fig. 2.9), pode-se calcular o trabalho realizado sobre essa partícula através da Eq. 2.35.

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (2.35)$$

Young et. al. (2008) define potência como a taxa temporal da realização de um trabalho e apresenta a Eq. 2.36 para determinar o valor instantâneo desta taxa, sendo \vec{u} o vetor de velocidade de partícula.

$$\frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{u} \quad (2.36)$$

Os produtos escalares das quantidades vetoriais nas equações acima indicam que o trabalho é feito somente pela componente da força na direção do deslocamento de partícula, que é a mesma que a direção da velocidade de partícula.

A substituição da segunda lei de Newton na Eq. 2.36 mostra que o trabalho realizado sobre uma partícula é igual a mudança na quantidade definida como energia cinética da partícula; isso se aplica independente da natureza física ou origem da força (FRANK FAHY, 1995). Young et. al. (2008) define a energia cinética E_k através da Eq. 2.37, em que m é a massa. Considerando uma massa de ar com densidade e volume de equilíbrio igual a ρ_0 e V_0 , respectivamente, a Eq. 2.37 se transforma na Eq. 2.38.

$$E_k = \frac{1}{2} m u^2 \quad (2.37)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 u^2 \quad (2.38)$$

Devido à elasticidade do fluido, existe também uma energia potencial associada à compressão e rarefação do fluido (BRANDÃO, 2009). Para a dedução da energia potencial, Frank Fahy (1995) sugere assumir que o som é um fenômeno adiabático, utilizar o modelo de gás inviscido e trabalhar dentro da acústica linear, com o módulo de Bulk correspondente representando um processo elástico conservativo.

Kinsler et. al. (2000) apresenta a Eq. 2.39 da energia potencial E_p associada com uma mudança volumétrica de V_0 para V e explica que o sinal negativo indica que a energia potencial aumenta, ou seja, trabalho é feito sobre o elemento, quando o volume é diminuído por causa de uma pressão acústica p .

$$E_p = - \int_{V_0}^V p dV \quad (2.39)$$

Utilizando a equação de conservação da massa

$$\rho V = \rho_0 V_0, \quad (2.40)$$

obtem-se que

$$dV = -\left(\frac{V}{\rho}\right) d\rho, \quad (2.41)$$

sabendo que

$$\frac{dp}{d\rho} = c_0^2, \quad (2.42)$$

e portanto

$$dV = \left(\frac{V}{\rho c^2}\right) dp, \quad (2.43)$$

através de substituição na Eq. 2.41 e integração da pressão acústica de zero até p , chega-se na fórmula da energia potencial a seguir:

$$E_p = \frac{1}{2} \left(\frac{p^2}{\rho_0 c^2} \right) V_0. \quad (2.44)$$

A energia total E_t é representada através da soma das energias cinética e potencial, como mostra a Eq. 2.45. A densidade de energia, definida por Frank Fahy (1995) como a energia mecânica total por unidade de volume associada com um distúrbio acústico, chamada de densidade de energia sonora ϵ_T , é representada pela Eq. 2.46.

$$E_t = E_c + E_p = \frac{1}{2}\rho_0 V_0 u^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{p^2}{\rho_0 c^2}\right) V_0 \quad (2.45)$$

$$\epsilon_T = \epsilon_c + \epsilon_p = \frac{1}{2}\rho_0 u^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{p^2}{\rho_0 c^2}\right) \quad (2.46)$$

2.3.2 Propagação de energia sonora: intensidade sonora

Brandão (2009) define intensidade sonora da seguinte maneira:

“A pressão sonora é um escalar e a velocidade de partícula um vetor definido no espaço 3D com direções \hat{x} , \hat{y} e \hat{z} (em coordenadas cartesianas). A velocidade de partícula carrega a informação da direção em que a energia sonora se propaga. O produto da pressão sonora pela velocidade de partícula resulta na intensidade acústica (ou intensidade sonora), que descreve o fluxo de energia sonora através de uma área δS em metros quadrados [m²]”.

A definição de intensidade sonora como sendo o fluxo de energia sonora que atravessa uma área explica a preocupação prévia em apresentar os conceitos de trabalho e energia sonora, pois, com eles bem sedimentados, pode-se derivar as formulações e entender os conceitos da intensidade sonora de maneira mais consciente. Para tal, será feito o balanço energético de uma pequena região de ar em um campo sonoro.

O balanço energético de um elemento de ar deve ser feito em cima de algumas premissas, Frank Fahy (1995) sugere negligenciar forças dissipativas e assumir não haver trabalho sendo feito por forças externas. Dessa forma, qualquer mudança de energia e temperatura interna é produzida somente por trabalho feito no elemento pelo ar ao redor durante a deformação volumétrica. É possível então calcular a taxa de variação energética de um pequeno volume através da diferença entre o fluxo de entrada e saída de energia mecânica.

A Eq. 2.36, apresentada anteriormente, indica a taxa de trabalho por unidade de área realizada por um elemento de fluido em um elemento adjacente, supondo-se uma superfície δS tem-se uma taxa igual a

$$\frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{u} = p \delta \vec{S} \cdot \vec{u}, \quad (2.47)$$

sendo $\delta \vec{S}$ o vetor de área direcionado para dentro do fluido sobre o qual é realizado trabalho. O valor da taxa de trabalho por unidade de área é apresentado pela Eq. 2.48, na qual se usa a notação $u_n = \vec{u} \cdot \vec{n}$ para indicar a componente de velocidade de partícula normal a superfície. O valor instantâneo desta taxa é a intensidade sonora instantânea $\vec{I}(t)$, que para qualquer superfície escolhida, de vetor normal unitário \vec{n} , se torna $I_n(t) = \vec{I}(t) \cdot \vec{n}$, como definido por Kinsler et. al. (2000).

$$I_n(t) = \left(\frac{dW}{dt} \right) \frac{1}{\delta S} = p u_n, \quad (2.48)$$

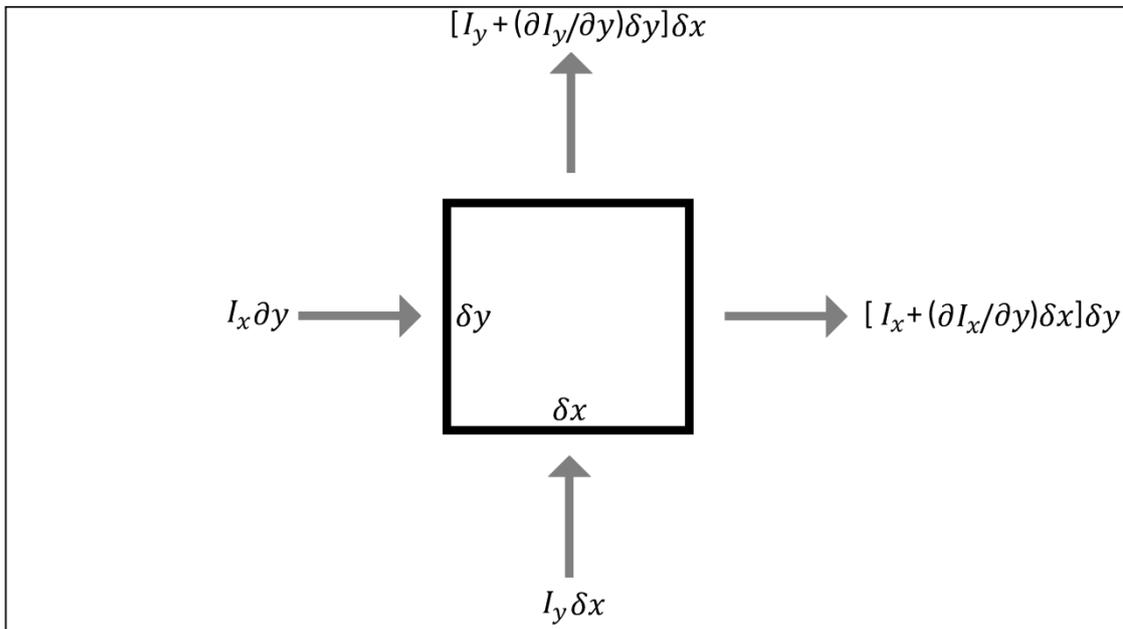


Figura 2.10: Fluxo de energia sonora que atravessa um volume de controle planar.
Fonte: Adaptado de Frank Fahy, 1995, p.41.

Faz-se agora o balanço de energia de um volume de fluido, para facilitar serão usadas apenas duas dimensões. A dedução usará o balanço do fluxo de entrada e saída de energia como mostra a Fig. 2.10, utilizando como base a dedução feita por Frank Fahy (1995). A Eq. 2.49 representa a taxa de fluxo de entrada de energia por unidade de profundidade e a Eq. 2.50 a taxa de fluxo

de saída, em que u e v são as componentes da velocidade de partícula nas direções x e y , respectivamente.

$$[pu]\delta y + [pv]\delta x \quad (2.49)$$

$$\left[p + \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \delta x \right] \left[u + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \delta x \right] \delta y + \left[p + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \delta y \right] \left[v + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \delta y \right] \delta x \quad (2.50)$$

Desconsiderando os termos de ordem maior que dois a Eq. 2.50 se transforma na Eq. 2.51.

$$\frac{\partial(pu)}{\partial x} + \frac{\partial(pv)}{\partial y} \quad (2.51)$$

Usando as Eq. 2.46, 2.19 e 2.26 (densidade de energia acústica, conservação de *momentum* e conservação de massa), encontra-se a taxa de mudança de densidade de energia:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial(pu)}{\partial x} + \frac{\partial(pv)}{\partial y}, \quad (2.52)$$

que se transforma na Eq. 2.53 através de uma expansão para um espaço tridimensional representado em coordenadas retangulares:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{I}(t) = -\frac{\partial \epsilon}{\partial t}, \quad (2.53)$$

em que

$$\vec{\nabla} = (\partial/\partial x)\vec{i} + (\partial/\partial y)\vec{j} + (\partial/\partial z)\vec{k}. \quad (2.54)$$

Em todos os campos sonoros estacionários com relação ao tempo, com exceção do caso específico de ondas planas progressivas, a intensidade sonora instantânea pode ser dividida em

duas componentes: ativa e reativa (FRANK FAHY, 1995). A intensidade sonora ativa corresponde a um transporte local de energia sonora e está associada com a componente de velocidade de partícula em fase com a pressão sonora (FINN JACOBSEN, 1991). A média temporal desta componente da intensidade sonora é diferente de zero e é a quantidade mais comumente medida na prática, inclusive, trata-se da quantidade que se objetiva medir com as sondas p-p de intensidade sonora. Finn Jacobseon (2007) afirma que, na prática, preocupa-se mais com campos sonoros estacionários e com a média temporal da intensidade sonora ativa $\langle \vec{I}(t) \rangle_t$ ao invés da intensidade sonora instantânea. As Eq. 2.55 e 2.56 mostram a representação matemática desta quantidade, sendo que a Eq. 2.56 leva em consideração um campo harmônico com frequência angular $\omega = 2\pi f$ e faz uso da representação complexa de p e \vec{u} .

$$\langle \vec{I}(t) \rangle_t = \langle p(t)\vec{u}(t) \rangle_t \quad (2.55)$$

$$\langle \vec{I}(t) \rangle_t = \frac{1}{2} \text{Re}\{p\vec{u}^*\} \quad (2.56)$$

No cotidiano de um engenheiro de acústica, quando se faz menção a medições de intensidade sonora, é a essa quantidade representada pelas Eq. 2.55 e 2.56, média da intensidade sonora ativa, que se faz referência.

2.3.3 Intensidade sonora em ondas planas

De acordo com as Eq. 2.33 e 2.34 apresentadas no item 2.2.4, a relação entre pressão sonora e velocidade de partícula em um campo sonoro de ondas planas não-progressivo é dado pelas Eq. 2.57 e 2.58, em que índices + e - fazem referência aos sentidos positivo e negativo de propagação de uma onda sonora ao longo de uma direção.

$$u^+ = \frac{p^+}{\rho_0 c} \quad (2.57)$$

$$u^- = \frac{p^-}{\rho_0 c} \quad (2.58)$$

Utilizando a Eq. 2.48 encontra-se a intensidade sonora instantânea para o caso de ondas planas (Eq. 2.59). A dependência de p em relação ao tempo está implícita.

$$I(t) = \frac{[(p^+)^2 - (p^-)^2]}{\rho_0 c} \quad (2.59)$$

No caso de ondas planas “puramente” progressivas, em que as ondas sonoras se propagam somente em um sentido, as densidades de energia cinética ϵ_c e potencial ϵ_p são iguais para quaisquer valores de x e t , como indica a Eq. 2.46 (densidade de energia sonora total). Fahy (1995) mostra que para uma onda sonora $p(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \phi)$, pode-se deduzir que:

$$\epsilon_c(x, t) = \epsilon_p(x, t) = \left[\frac{A^2}{2\rho_0 c^2} \right] \cos^2(\omega t - kx + \phi) = \frac{\epsilon_T}{2}, \quad (2.60)$$

e portanto

$$I(x, t) = \left[\frac{A^2}{\rho_0 c} \right] \cos^2(\omega t - kx + \phi) = \epsilon_T c. \quad (2.61)$$

Assim, para quaisquer valores de x e t

$$I/\epsilon_T = c. \quad (2.62)$$

A intensidade sonora média é representada na Eq. 2.63 a seguir.

$$\langle \vec{I}(t) \rangle_t = (1/2)(A^2/\rho_0 c) \quad (2.63)$$

A Eq. 2.63 indica que a intensidade sonora instantânea em quaisquer espaço e tempo, no caso de ondas planas progressivas, nunca assume um valor negativo, o que é coerente com a ideia de que a energia sonora se propaga apenas em um sentido. Fica evidente também que apenas um microfone é capaz de medir a intensidade sonora no caso de ondas planas progressivas.

2.4 Análise de sinais

A construção da sonda de intensidade sonora do tipo p-p exige o processamento dos sinais captados por dois microfones. Shin & Hammond (2008) explicam que o propósito de se realizar o processamento de um sinal é extrair informações do mesmo e que a metodologia de tal extração possui três passos fundamentais: (i) aquisição; (ii) processamento; (iii) interpretação.

A presente subseção, intitulada análise de sinais, tem como objetivo apresentar uma revisão de alguns conceitos importantes para o entendimento da aquisição e do processamento de sinais necessários na determinação da intensidade sonora a partir de uma medição com sonda. No presente trabalho será utilizado o processamento digital de sinais, por isso, as funções discretas serão expostas após a apresentação das funções contínuas.

2.4.1 Aquisição de sinais acústicos

A aquisição de sinais analógicos e sua conversão para sinais digitais envolvem uma série de processos, desde a coleta de uma quantidade física por um transdutor até o momento em que o sinal se encontra em sua forma digital final, pronto para admitir um processamento digital. Para chegar a esses valores finais é preciso escolher um transdutor adequado, realizar a conversão analógico-digital estabelecendo valores de parâmetros de aquisição adequados (taxa de amostragem, por exemplo), passar o sinal por filtros, efetuar um pré-processamento e converter os valores para uma unidade de engenharia.

No caso das medições acústicas que envolvem a determinação da pressão sonora, o transdutor a ser utilizado é o microfone. Depois do sinal analógico ter sido captado pelo transdutor de pressão sonora, é preciso efetuar uma conversão deste sinal para o formato digital. Proakis e

Manolakis (2007) explicam que o processo de conversão consiste em três operações distintas: amostragem, quantização e codificação (*coding*).

Bendat & Piersol (1986) definem amostragem como sendo o processo em que se define os instantes no tempo nos quais dados contínuos devem ser amostrados, passando assim a serem representados de maneira discreta. Supondo uma medição de um sinal analógico (contínuo) cuja a duração é representada por T [segundos], na conversão para um sinal digital é preciso escolher de quanto em quanto tempo será retirado uma amostra deste sinal, ou seja, qual o intervalo de tempo Δt [segundos] entre uma amostra e outra. Dessa forma, uma função contínua representada por $x_a(t)$, quando amostrada em intervalos constantes de tempo, denominados de intervalo de amostragem Δt , torna-se uma representação discreta simbolizada por $x(n)$, em que $1 \leq n \leq N_t$.

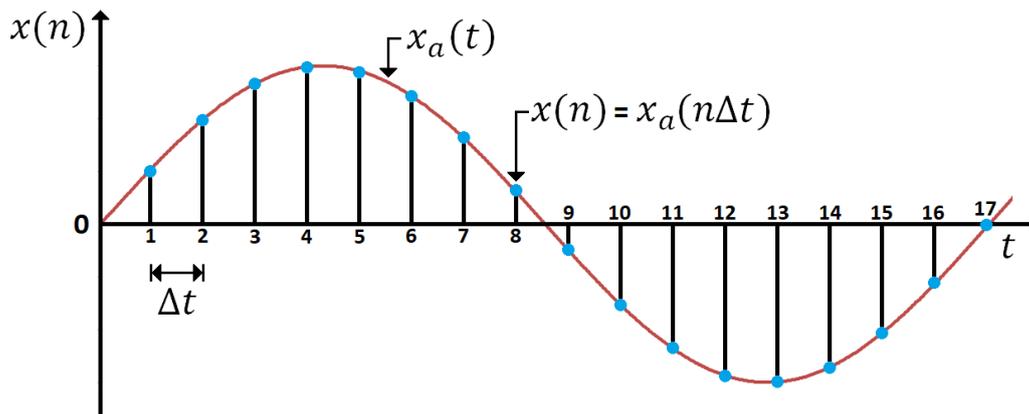


Figura 2.11: Amostragem periódica de um sinal analógico.
Fonte: Modificado de Proakis & Manolakis, 2007, p. 21.

A Fig. 2.11 apresenta a transformação de um sinal analógico para uma série finita de valores, representando o processo de amostragem. O inverso do intervalo de amostragem é chamado de frequência de amostragem $f_s = 1/\Delta t$, também conhecido como taxa amostral ou frequência amostral. Proakis e Manolakis (2007) explicam que, no caso de intervalos de amostragem constantes, existe relação direta entre N_t e T e que esta é dada pela Eq. 2.64 mostrada a seguir.

$$T = N_t \Delta t = \frac{N_t}{f_s} \quad (2.64)$$

A representação precisa de um sinal analógico por um sinal digital depende da escolha do intervalo de amostragem adequado. Segundo Proakis e Manolakis (2007), sabendo-se o valor

de frequência máxima f_{max} em um sinal analógico, a frequência amostral necessária para representar tal sinal de maneira única e sem ambiguidade na forma digital é $f_s = 2f_{max}$. Usando esse valor garante-se, também de maneira única, a reconstrução do sinal analógico através do sinal digital. Esse valor de f_s é determinado pelo teorema de amostragem. A frequência máxima para uma taxa amostral é chamada de frequência de Nyquist f_N , por exemplo: para f_s igual a 1000 [Hz] tem-se uma frequência de Nyquist f_N igual a 500 [Hz].

Um erro com o qual se deve tomar muito cuidado é o erro de identificação, chamado em inglês de *aliasing error*. Ele consiste no fato de que ao se utilizar uma frequência amostral $f_s < 2f_{max}$ ocorre uma confusão entre frequências acima e abaixo da frequência de Nyquist $f_N = f_s/2$, de forma que as frequências acima entram no sinal digital atrapalhando a precisão da representação das frequências menores que f_N . A Fig. 2.12 mostra como que mais de um sinal analógico podem ser representados pelo mesmo sinal digital.

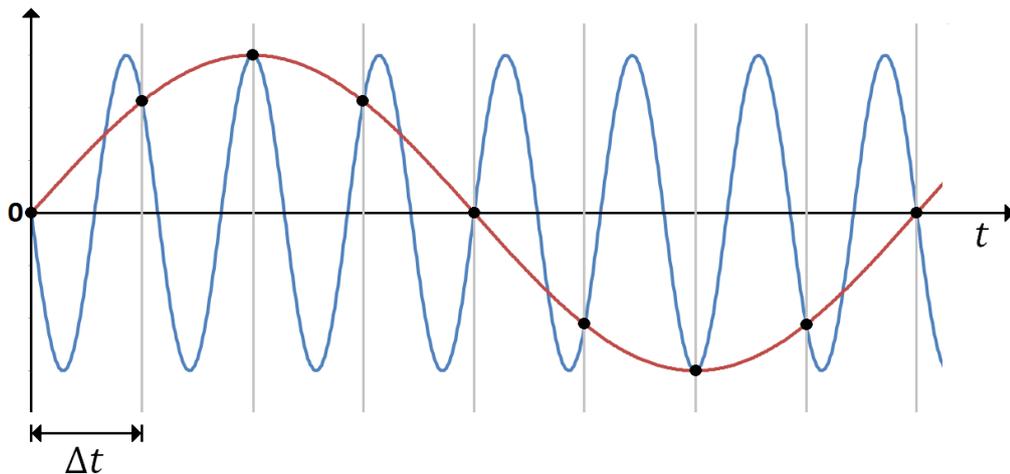


Figura 2.12: Exemplo de dois sinais analógicos representados pelo mesmo sinal digital.

A solução para o erro de *aliasing* é o uso de filtros passa-baixa, que eliminam as frequências acima da faixa de frequência de interesse. Por exemplo, em uma medição de pressão sonora que se deseja contemplar todas as frequências audíveis pelo ser humano, como a maior frequência de interesse é 20.000 [Hz], deve-se utilizar uma frequência amostral f_s de pelo menos 40.000 [Hz], pois assim a frequência de Nyquist é $f_N = 20.000$ [Hz]. Faz-se necessário então utilizar um filtro passa-baixa que elimine as frequências acima de 20.000 [Hz] existentes no sinal analógico.

Esses filtros podem ser analógicos e usados antes da conversão analógico-digital ou podem ser filtros digitais usados após a conversão, ambos possuem vantagens e desvantagens que devem ser analisadas de acordo com o tipo de sinal com o qual se trabalha.

2.4.2 Processamento de sinais

Esta subseção trata de alguns conceitos de análise de sinais que são fundamentais para a dedução da formulação que representa o princípio do método p-p. Além disso, faz parte do desenvolvimento da sonda de baixo custo a implementação computacional de um processamento de sinais responsável por realizar manipulações matemáticas com os sinais adquiridos por dois microfones, sendo que em tal processamento também se utiliza conceitos apresentados a seguir.

2.4.2.1 Transformada de Fourier

Em engenharia acústica é muito comum e conveniente trabalhar com sinais no domínio da frequência, isso porque a análise em tal domínio ajuda a identificar problemas e facilita a elaboração de soluções direcionadas. No presente trabalho, a passagem de sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência será realizada de maneira recorrente, por isso faz-se necessária uma breve revisão das ferramentas matemáticas e computacionais responsáveis por esse processo.

Proakis & Manolakis (2007) fazem uma analogia entre o prisma de vidro que decompõe a luz do sol em um *spectrum* de cores com a transformada de Fourier, que decompõe um sinal no domínio do tempo em componentes senoidais ou de exponenciais complexas. Após executar tal decomposição, que designa uma amplitude e uma fase para cada frequência, diz-se que o sinal se encontra no domínio da frequência. Proakis & Manolakis (2007) explicam ainda que quando se trata de sinais periódicos utiliza-se uma série de Fourier, enquanto que para sinais de energia finita e não-periódicos o nome dado ao processo de decomposição é transformada de Fourier.

No caso de um sinal não-periódico $x(t)$, ao invés de um somatório discreto como ocorre na série de Fourier utilizada para sinais periódicos, tem-se um somatório contínuo, ou seja, uma integral, como explicam Shin & Hammond (2008). Segundo Proakis & Manolakis (2007), a transição de um somatório para uma integral passa pelo raciocínio de que um sinal aperiódico

tomado em um período T_p , ao ser repetido infinitamente, torna-se periódico $x_p(t)$ (Fig. 2.13) e que ao se usar o limite $T_p \rightarrow \infty$ retorna-se ao sinal original. O *spectrum*, que para um sinal periódico (série de Fourier) é discreto, torna-se contínuo.

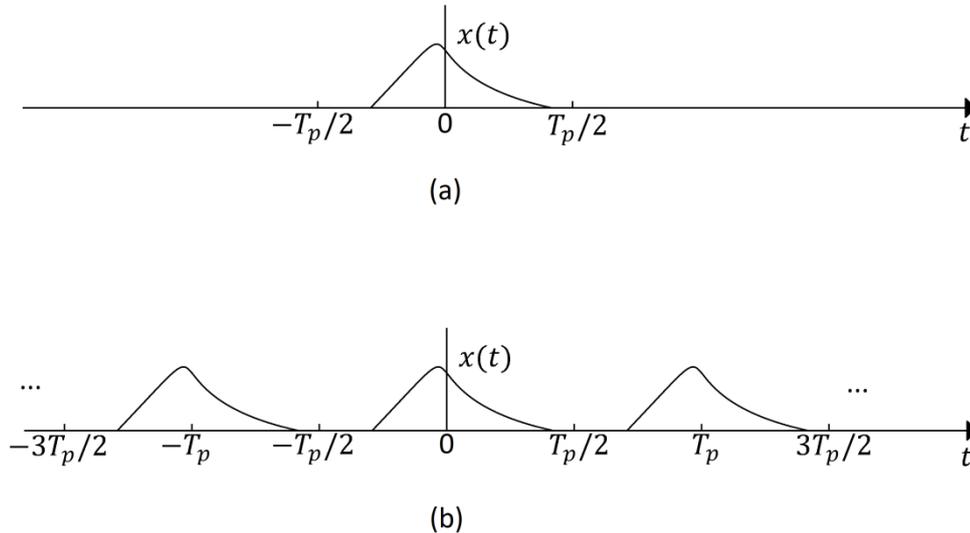


Figura 2.13: : **(a)** Sinal aperiódico $x(t)$ e **(b)** sinal periódico $x_p(t)$ construído através da repetição de $x(t)$ com um período T_p .

Fonte: Modificado de Proakis & Manolakis, 2007, p. 235.

Bendat & Piersol (1986) apresentam, através da Eq. 2.65, a quantidade complexa $X(f)$ como sendo a transformada de Fourier de limite infinito de um registro $x(t)$ de valores reais ou complexos. Já a Eq. 2.66 mostra a transformada de Fourier inversa. Juntas as Eq. 2.65 e 2.66 formam um par de transformadas de Fourier.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.65)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (2.66)$$

Teoricamente, essa transformada de Fourier $X(f)$ não irá existir para um $x(t)$ que represente um processo estacionário randômico quando se usar os limites infinitos (BENDAT & PIERSOL, 1986). Pode-se, no entanto, restringir o sinal para um intervalo de tempo de $[0, T]$, para que a transformada de Fourier de limites finitos exista e seja definida pela Eq. 2.67.

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.67)$$

No caso de sinais digitais, é preciso realizar a transformada de Fourier em um sinal discreto, em inglês dá-se o nome de *Discrete Fourier Transform* (DFT). Um procedimento muito difundido pela sua rapidez computacional é a chamada *Fast Fourier Transform* (FFT). As formulações da FFT são apresentadas por Bendat & Piersol (1986), que explicam que para um sinal $x(t)$ representado na forma digital por um número N_t de amostras, captadas em intervalos Δt , ao se utilizar n começando de 0 por conveniência, tem-se:

$$x_n = x(n\Delta t), \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, N_t - 1. \quad (2.68)$$

Para um f arbitrário, a versão discreta da transformada de Fourier é a Eq. 2.69.

$$X(f, T) = \Delta t \sum_{n=0}^{N_t-1} x_n e^{-j2\pi fn\Delta t} \quad (2.69)$$

Os valores das frequências normalmente selecionadas para a computação de $X(f, T)$ são:

$$f_k = k/T = k/N_t\Delta t, \text{ para } k = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (2.70)$$

Para essas frequências, os valores transformados geram as componentes de Fourier definidas pela Eq. 2.71, como apresentam Bendat & Piersol (1986). Os métodos de FFT são desenvolvidos para calcular os valores X_k .

$$X_k = \frac{X(f_k)}{\Delta t} = \sum_{n=0}^{N_t-1} x_n e^{(-j2\pi fn\Delta t)/N_t} \text{ para } k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2.71)$$

2.4.2.2 Funções de densidade espectral de potência

Na análise no domínio da frequência de sinais estacionários randômicos é essencial e de grande utilidade determinar as chamadas funções de densidade espectral de potência (DEP) e de densidade espectral cruzada de potência (DECP). Existem duas abordagens principais para se estimar tais funções: paramétrica e não-paramétrica, a última também chamada de tradicional (SHIN & HAMMOND, 2008). Será discutido aqui um dos métodos da abordagem tradicional para estimar as funções DEP, o qual define tais funções através de transformadas de Fourier finitas e é chamado de método direto.

Considerando-se um par de registros de amostras associados $x_k(t)$ e $y_k(t)$ referentes a processos estacionários randômicos $\{x_k(t)\}$ e $\{y_k(t)\}$, Bendat & Piersol (1986) definem a densidade espectral cruzada de potência de dois lados (*two-sided cross power spectral density*) $S_{xy}(f, T, k)$ através da Eq. 2.72, em que $X_k(f, T)$ e $Y_k(f, T)$ representam as transformadas de Fourier finitas de $x_k(t)$ e $y_k(t)$, respectivamente, como mostrado pelas Eq. 2.73 e 2.74.

$$S_{xy}(f, T, k) = \frac{1}{T} X_k^*(f, T) Y_k(f, T), \text{ para } 0 \leq t \leq T \quad (2.72)$$

$$X_k(f, T) = \int_0^T x_k(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.73)$$

$$Y_k(f, T) = \int_0^T y_k(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.74)$$

Sendo $E[S_{xy}(f, T, k)]$ a operação de valor esperado sobre o índice 'k', define-se $S_{xy}(f)$ com a Eq. 2.75.

$$S_{xy}(f) = E[S_{xy}(f, T, k)] \quad (2.75)$$

A função de densidade espectral cruzada de potência de um lado (*one-sided cross power spectral density function*) $G_{xy}(f)$, em que a frequência varia somente dentro do intervalo $(0, \infty)$, é definida por Shin & Hammomd (2008) através das Eq. 2.76, 2.77 e 2.78.

$$G_{xy}(f) = 2S_{xy}(f), \text{ para } f > 0 \quad (2.76)$$

$$G_{xy}(f) = S_{xy}(f), \text{ para } f = 0 \quad (2.77)$$

$$G_{xy}(f) = 0, \text{ para } f < 0 \quad (2.78)$$

$S_{xx}(f)$ e $S_{yy}(f)$ são chamadas de funções de densidade autoespectral de potência de dois lados (*two-sided autospectral density functions*) de $\{x_k(t)\}$ e $\{y_k(t)\}$, respectivamente, e são definidas de maneira semelhante à realizada na determinação da densidade espectral cruzada de potência de dois lados, mas ao invés de haver um cruzamento de sinais diferentes, há um “cruzamento de um sinal com ele mesmo”. O mesmo pode ser dito sobre $G_{xx}(f)$ e $G_{yy}(f)$, chamadas de funções de densidade autoespectral de um lado (*one-sided autospectral density functions*).

As funções de densidade autoespectrais de potência estão relacionadas com a distribuição de potência de um sinal no domínio da frequência, além disso possuem valores sempre positivos e reais, portanto, não carregam informação sobre a fase do sinal de origem. Já as funções cruzadas estão relacionadas com o nível de similaridade entre dois sinais e possuem informação sobre diferenças de amplitude e fase. O $\arg S_{xy}(f)$ é o espectro de fase e indica a relação de *lag*, *lead* ou *match* entre os sinais no espectro de frequência, i.e., mostra a diferença de fase entre os sinais (SHIN & HAMMOMD, 2008).

As funções apresentadas até o momento estão na forma contínua, porém, na prática, são calculadas de maneira discreta, depois do sinal ter sido convertido para a forma digital. A Eq. 2.79, exposta por Bendat & Piersol (1986), é a fórmula da densidade espectral cruzada de potência de um lado para sinais discretos, em que X_k e Y_k são os valores da transformada rápida de Fourier de sinais discretos que representam $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente. O asterisco denota conjugado, f_s é o valor da taxa amostral e N_t é o número total de amostras. A Eq. 2.80 apresenta a fórmula da densidade autoespectral de potência de um lado do sinal $x(t)$.

$$G_{xy}(f_k) = \frac{2}{N_t \times f_s} [X_k^* \times Y_k] \quad (2.79)$$

$$G_{xx}(f_k) = \frac{2}{N_t \times f_s} |X_k|^2 \quad (2.80)$$

As funções apresentadas estão relacionadas com a distribuição de potência do sinal (ou sinais, no caso da função cruzada) no domínio da frequência. Tem-se maior interesse, no presente estudo, nas funções chamadas de espectro de potência (*power spectrum*, $\tilde{G}_{xx}(f_k)$) e espectro de potência cruzada (*cross-power spectrum*, $\tilde{G}_{xy}(f_k)$), por conta das formulações usadas na determinação da intensidade sonora e do nível de pressão sonora. Tais funções são definidas pelas Eq. 2.81 e 2.82, em que Δf é a resolução no domínio da frequência associada com a transformada de Fourier finita.

$$\tilde{G}_{xx}(f_k) = \Delta f \times G_{xx}(f_k) \quad (2.81)$$

$$\tilde{G}_{xy}(f_k) = \Delta f \times G_{xy}(f_k) \quad (2.82)$$

Expressando em palavras: o espectro de potência ($\tilde{G}_{xx}(f_k)$) é o produto da densidade autoespectral de potência de um lado ($G_{xx}(f_k)$) multiplicada por Δf ; o espectro de potência cruzada ($\tilde{G}_{xy}(f_k)$) é o produto da densidade espectral cruzada de potência de um lado ($G_{xy}(f_k)$) multiplicada por Δf . A nomenclatura nessa área de estudo do processamento de sinais pode se tornar confusa, para ficar claro é preciso se atentar aos conceitos, às unidades e à palavra densidade. No caso de sinais acústicos $\tilde{G}_{xx}(f_k)$ e $\tilde{G}_{xy}(f_k)$ possuem unidade no SI igual a $[\text{Pa}^2]$, enquanto que $G_{xx}(f_k)$ e $G_{xy}(f_k)$ têm $[\text{Pa}^2/\text{Hz}]$, pelas próprias unidades percebe-se porque as duas últimas funções recebem a palavra densidade em seu nome e as duas primeiras não.

2.4.2.3 Janelamento e *overlapping*

Considerando-se um sinal $x(t)$ de duração finita $[0, T]$ representado na forma digital $x(n)$ por N_t amostras, $n = 0, 1, 2, \dots, N_t - 1$, Shin & Hammomd (2008) explicam que na sequência

original $x(n)$ é zero para $n < 0$ e $n \geq N_t$, mas que o ato de “amostrar na frequência” (*sampling in frequency*) impõe uma periodicidade, ou seja, a DFT de um $x(n)$ finito implica que $x(n)$ é um período de uma sequência periódica $x_p(n)$, tal que:

$$x(n) = x_p(n) \text{ para } 0 \leq n \leq N_t - 1 \quad \& \quad x_p(n) = x_p(n + rN_t), \text{ para } r \in \mathbb{Z} \quad (2.83)$$

Shin & Hammomd (2008) explicam que essa característica do processo da DFT, descrita no parágrafo acima, é importante porque gera um erro devido as discontinuidades presentes no início e final do sinal, resultando em uma forma de onda truncada. A exceção é o caso, praticamente impossível de acontecer em medições acústicas, em que o sinal é periódico e o intervalo amostrado contém um número inteiro de períodos. A Fig. 2.14.a) mostra um sinal harmônico de duração finita T e a Fig. 2.14.b) mostra na prática a suposição feita por uma DFT como descrita no parágrafo acima.

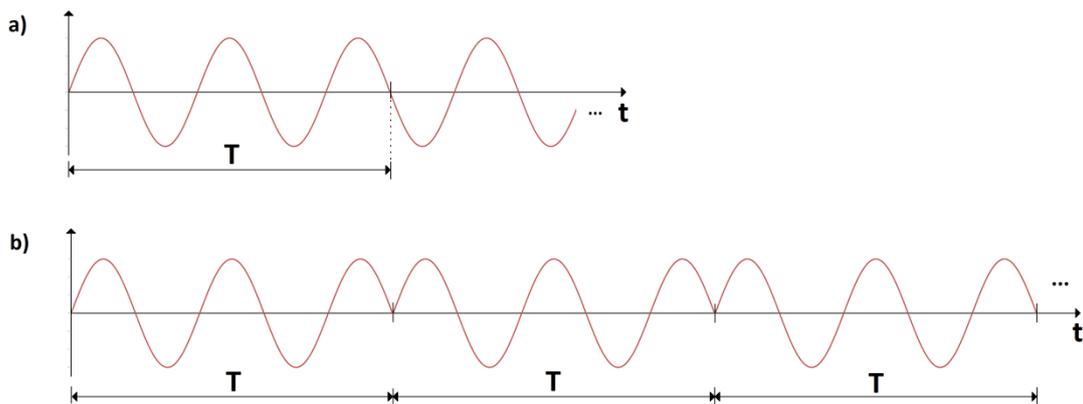


Figura 2.14: a) Sinal original de duração T . b) Como o processo da DFT supõe que o sinal é.

Essa discontinuidade no sinal gera distorções na representação no domínio da frequência (PPGEM-UFSC, 1999). Por exemplo, um sinal harmônico que deveria ser representado apenas por uma linha no domínio da frequência passa a ser representado por um lóbulo principal e lóbulos laterais, como mostra a Fig. 2.15 que tem como objetivo ilustrar qualitativamente a distorção descrita.

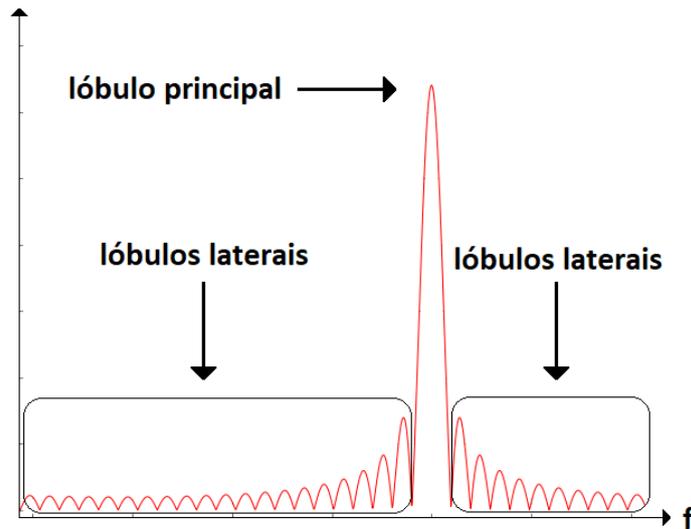


Figura 2.15: Ilustração qualitativa do fenômeno de truncamento para um sinal periódico no domínio da frequência.

Shin & Hammomd (2008) chamam o fenômeno de surgimento de lóculos laterais de *spectral leakage*, também conhecido como dispersão ou vazamento espectral, e o alargamento do lóculo principal, que deveria teoricamente ser uma linha, é chamado de *smearing*. Essas distorções podem prejudicar a análise de um sinal, dificultando a precisão na identificação das frequências presentes. Bendat & Piersol (1986) explicam que ao se definir o segmento de sinal em um intervalo, $[0, T]$ por exemplo, realizar uma DFT é equivalente a realizar uma DFT da convolução entre o sinal neste intervalo e um sinal retangular $w(t)$, definido como:

$$\begin{cases} w(t) = 1 & \text{para } 0 \leq t \leq T \\ w(t) = 0 & \text{para } t < 0 \text{ e } t > T \end{cases} \quad (2.84)$$

Como é mostrado na Fig. 2.14.a), o “corte” feito no sinal é como se fosse a representação do sinal visto através de uma janela retangular. Uma maneira de se controlar as distorções da dispersão espectral, causadas pelas mudanças abruptas que ocorrem ao se ligar o início com o final de um segmento de sinal, é através do uso de janelas que suavizam essa ligação ao levar as extremidades do segmento de sinal para zero. Um exemplo é a janela de Hanning, definida pela Eq. 2.85 e mostrada na Fig. 2.16, junto com a janela retangular.

$$w_h(t) = \begin{cases} 1 - \cos^2\left(\frac{\pi t}{T}\right) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.85)$$

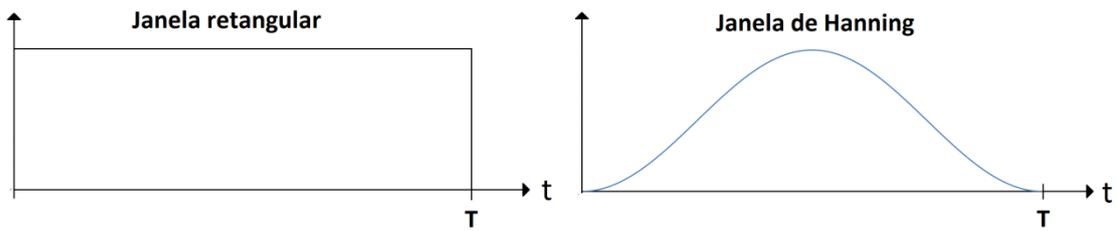


Figura 2.16: Janelas retangular e de Hanning.

A Fig. 2.17 mostra o uso de uma janela de Hanning no mesmo sinal mostrado pela Fig. 2.14, na qual usou-se uma janela retangular.

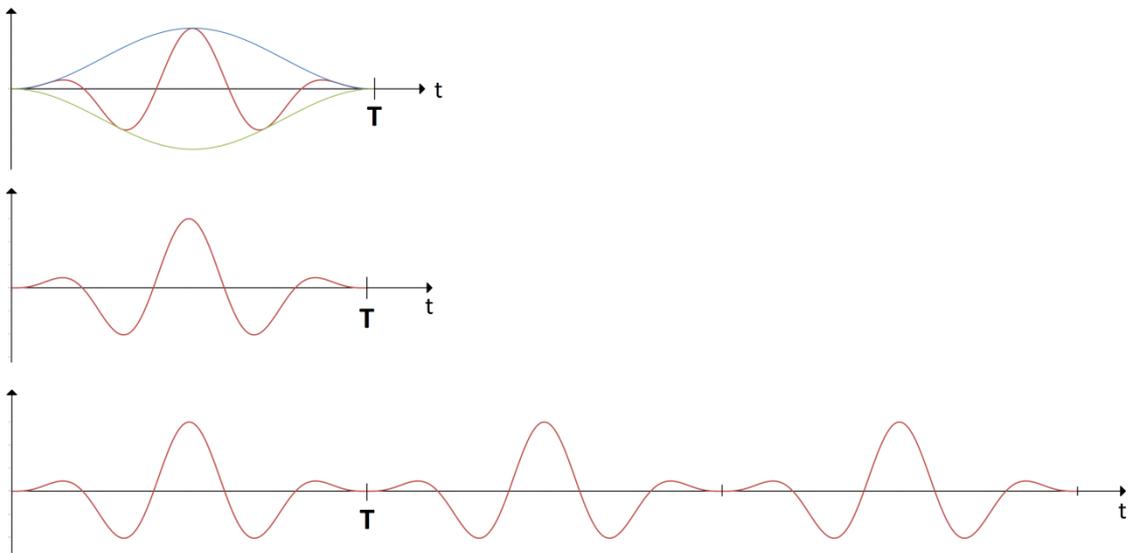


Figura 2.17: Como o uso da janela de Hanning suaviza a descontinuidade de um sinal.

A janela de Hanning, quando comparada com a janela retangular, realmente diminui o vazamento de energia para os lóbulos laterais, mas em compensação aumenta o *smearing*, ou seja, a largura do lóbulo principal. As janelas retangular e de Hanning são apenas duas das várias presentes na literatura do tema, na apostila do PPGEM-UFSC (1999) explica-se que a escolha de qual janela utilizar se baseia no equilíbrio entre *smearing* e dispersão espectral, sendo necessário levar em consideração o sinal a ser analisado e qual dos dois erros é mais importante suprimir para a melhor representação do mesmo.

Ao contrário da janela retangular, que multiplica as amplitudes dentro do comprimento do sinal pela unidade, as demais janelas modificam as amplitudes originais, o que altera a potência do sinal. Por isso, faz-se indispensável a utilização de um fator de correção E (Eq. 2.86), de modo que a potência do sinal se mantenha inalterada (PPGEM-UFSC, 1999).

$$\frac{E}{2T} \int_{-T}^T w_h^2(t) dt = 1 \quad (2.86)$$

No caso da janela de Hanning, por exemplo, tem-se:

$$\frac{2E}{2T} \int_0^T \frac{1}{4} \left(1 + \cos \frac{\pi t}{T} \right)^2 dt = 1, \quad (2.87)$$

então

$$E = \frac{1}{0.375} = 2,667. \quad (2.88)$$

Ao se utilizar uma janela como a de Hanning, devido ao fato das extremidades do segmento de sinal serem zeradas, ocorre uma perda de informação. Bendat & Piersol (1986) explicam que, assumindo que os dados a serem analisados possuem um espectro aproximadamente uniforme, usar a janela de Hanning aumenta a variância da estimativa espectral resultante por volta de duas vezes. Esse problema é contornável dividindo o sinal original em vários segmentos e aplicando o janelamento em cada um, para em seguida utilizar um *overlapping*, como demonstra a Fig. 2.18.

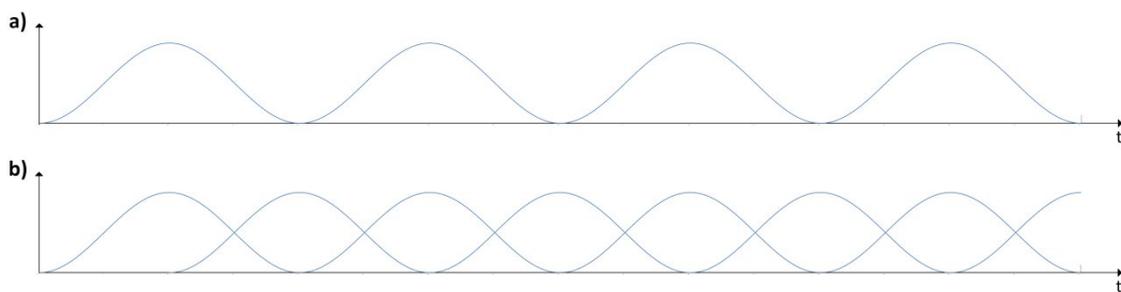


Figura 2.18: a) Janelamento sem overlapping. b) Janelamento com overlapping de 50%.

A divisão de um sinal analógico $x(t)$ que possui tempo de medição igual a T_r em n_d segmentos, cada um com uma subdivisão de tempo T , gera vários segmentos $x_i(t)$ com $i = 1, 2, 3, \dots, n_d$. O tempo de início e término de cada segmento é dado pela Eq. 2.89.

$$(i - 1)T \leq t \leq iT \quad (2.89)$$

No caso do uso de *overlapping* com um fator de q , o número de segmentos passa a ser igual a $(n_d/q) - 1$, conseqüentemente, $i = 1, 2, 3, \dots, (n_d/q) - 1$. A formulação a ser usada passa a ser a Eq. 2.90.

$$[q(i - 1)]T \leq t \leq [q(i - 1) + 1]T \quad (2.90)$$

A divisão do sinal original que possui um número total de N_t amostras em $M = (n_d/q) - 1$ segmentos, cada um com um número $NFFT$ de amostras, modifica as Eq. 2.79 e 2.80, que se transformam nas Eq. 2.91 e 2.92. No caso do uso de outras janelas que não sejam a retangular, essas equações devem ser corrigidas pelos seus respectivos fatores E , que são calculados como exemplificado pelas Eq. 2.87 e 2.88 para a janela de Hanning.

$$G_{xy}(f_k) = \frac{2}{M \times NFFT \times f_s} \sum_{i=1}^M [X_k^* \times Y_k] \quad (2.91)$$

$$G_{xx}(f_k) = \frac{2}{M \times NFFT \times f_s} \sum_{i=1}^M |X_k|^2 \quad (2.92)$$

2.4.2.4 Função de transferência

Serão apresentadas aqui as equações básicas de modelos de entrada-única/saída-única. O intuito é dar embasamento para a explicação do método de Krishnappa (1981), que é utilizado para correção do *phase-mismatch* neste trabalho. Uma relação de entrada/saída que descreve um sistema linear invariante no tempo caracterizado pela resposta impulsiva $h(t)$, em que $x(t)$ é um sinal de entrada randômico estacionário e, por isso, o sinal de saída $y(t)$ também é um processo randômico estacionário, é representada pela Fig. 2.19.

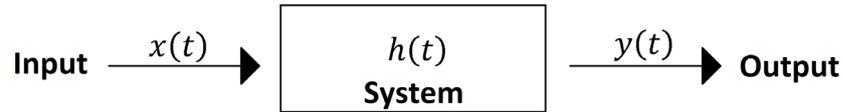


Figura 2.19: Sistema de entrada única e saída única.

Bendat & Piersol (1986) definem a relação entre $h(t)$, $x(t)$ e $y(t)$ através da integral de convolução apresentada pela Eq. 2.93. A representação da Eq. 2.93 no domínio da frequência, considerando $X(f)$ e $Y(f)$ as transformadas de Fourier de $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente, é feita pela Eq. 2.94.

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad (2.93)$$

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad (2.94)$$

Shin & Hammomd (2008) apresentam a Eq. 2.95, que permite determinar a função de transferência utilizando as funções de densidade espectral de potência, e cuja dedução é por eles mostrada de maneira detalhada.

$$G_{xy}(f) = H(f)G_{xx}(f) \quad (2.95)$$

2.5 Sonda de intensidade sonora do tipo 'p-p'

A medição da intensidade sonora envolve a determinação da pressão sonora e da velocidade de partícula na mesma posição de maneira simultânea (FINN JACOBSEN, 2007). A relação entre pressão sonora e velocidade de partícula em um ponto depende do tipo de campo sonoro e não é única, sendo assim necessário empregar ao menos dois transdutores para determinar a intensidade sonora (FRANK FAHY, 1995).

Finn Jacobsen (2007) explica:

Existem três princípios de medição: (i) um determina a velocidade de partícula através de uma aproximação do gradiente de pressão pela diferença finita usando dois microfones alocados muito próximos um do outro e usa a média dos sinais dos microfones como pressão sonora (método p-p); (ii) outro combina um microfone com um transdutor de velocidade de partícula (método p-u); (iii) e um terceiro consegue determinar a pressão sonora através de uma aproximação pela diferença finita do divergente da velocidade de partícula (método u-u).

O método p-p, princípio de medição (i), é o amplamente discutido e desenvolvido no presente trabalho. Jacobsen (2011) explica que todas as sondas de intensidade sonora produzidas comercialmente, com exceção do *Microflown*, baseiam-se no método p-p. Além disso, a norma IEC 1043 é a única que regulamenta instrumentos de medição de intensidade sonora, sendo que a mesma lida somente com o princípio p-p.

2.5.1 Princípio de medição do método ‘p-p’

Como já mencionado, o método ‘p-p’ utiliza dois microfones, em geral microfones capacitivos de alta qualidade, alocados muito próximos um do outro, e determina a velocidade de partícula através de uma aproximação do gradiente espacial de pressão pela diferença finita de pressão. A Fig. 2.20 mostra possíveis configurações de posicionamento dos microfones.

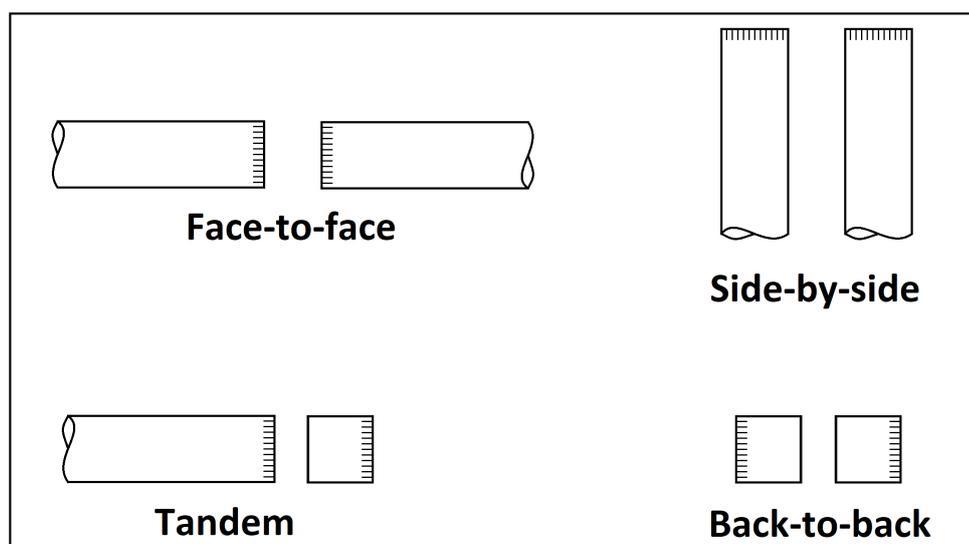


Figura 2.20: Ilustração esquemática de possíveis configurações para sondas do tipo ‘p-p’.

Fonte: Frank Fahy, 1995, p. 91.

Frank Fahy (1995) explica que ao se analisar a equação de *momentum* (Eq. 2.19), no caso de um campo sonoro de pequenas amplitudes, percebe-se que a componente do gradiente de pressão em qualquer direção n é proporcional a componente de aceleração de partícula:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \frac{\partial u_n}{\partial t}. \quad (2.96)$$

Logo, a velocidade de partícula é dada pela Eq. 2.97.

$$u_n = -\left(\frac{1}{\rho_0}\right) \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(\tau)}{\partial n} d\tau \quad (2.97)$$

Neste momento entra a aproximação do gradiente de pressão sonora pela diferença finita, representada na Eq. 2.98, em que d é a distância entre os microfones. A Fig. 2.21 representa essa aproximação.

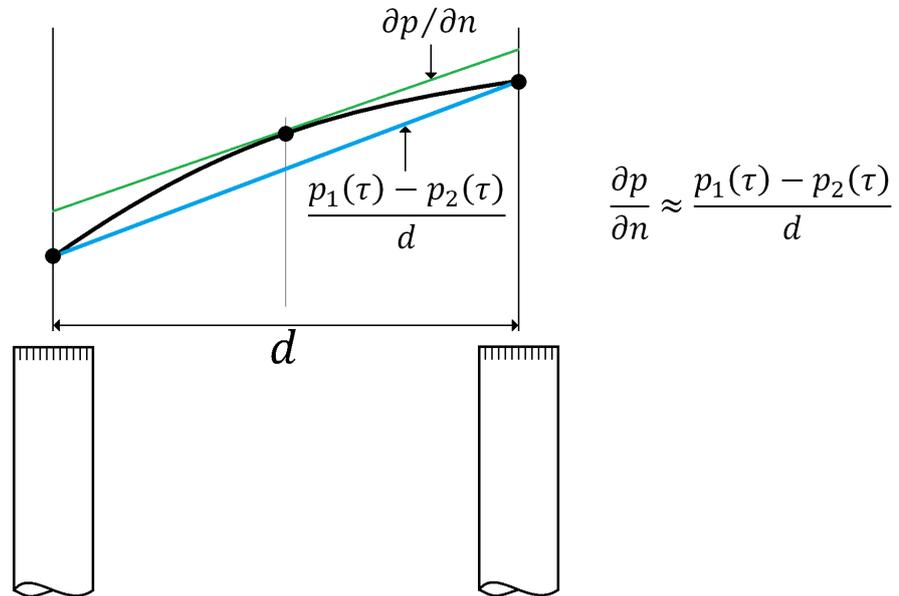


Figura 2.21: Aproximação do gradiente de pressão pela diferença finita de pressão.

$$\frac{\partial p(\tau)}{\partial n} \approx \frac{p_1(\tau) - p_2(\tau)}{d} \quad (2.98)$$

A velocidade de partícula passa a ser, aproximadamente:

$$u_n \approx -\left(\frac{1}{\rho_0 d}\right) \int_{-\infty}^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau. \quad (2.99)$$

No princípio p-p, a pressão sonora é aproximada pela média da pressão sonora medida pelos dois microfones:

$$p(t) \approx \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2}. \quad (2.100)$$

Usando as Eq. 2.99 e 2.100, que definem a velocidade de partícula e a pressão sonora, chega-se na Eq. 2.101, que determina a intensidade sonora instantânea aproximada.

$$I_n(t) \approx \left(\frac{1}{2\rho_0 d}\right) [p_1(t) + p_2(t)] \int_{-\infty}^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau \quad (2.101)$$

A evolução dos valores da intensidade sonora no tempo é importante no caso de fontes sonoras transientes, porém existem muitas fontes sonoras que operam de maneira constante e geram campos sonoros que podem ser considerados estacionários (FRANK FAHY, 1995). Neste último caso, a intensidade sonora média é de vital importância, principalmente na determinação da potência sonora. Apresenta-se agora dedução, passo a passo, da equação de intensidade sonora média. Por definição, a média temporal de um grupo de valores de intensidade sonora instantânea é dada pela Eq. 2.102.

$$\langle I_n(t) \rangle_t = I_n = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T I_n(t) dt \quad (2.102)$$

Substituindo a Eq. 2.101 na Eq. 2.102, tem-se:

$$I_n = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T \left\{ \left(\frac{1}{2\rho_0 d}\right) [p_1(t) + p_2(t)] \int_{-\infty}^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau \right\} dt. \quad (2.103)$$

Através de manipulações algébricas obtém-se a Eq. 2.104 e em seguida a Eq. 2.105.

$$I_n = \left(\frac{1}{2\rho_0 d}\right) \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T \left\{ [p_1(t) + p_2(t)] \left[\int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau - \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] \right\} dt \quad (2.104)$$

$$I_n = \left(\frac{1}{2\rho_0 d}\right) \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T \left\{ \left[p_1(t) \int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau \right] - \left[p_1(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] + \dots \right. \\ \left. + \left[p_2(t) \int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau \right] - \left[p_2(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] \right\} dt. \quad (2.105)$$

Para sinais estacionários $x(t)$ e $y(t)$, tem-se que:

$$\overline{x \left(\frac{dx}{dt} \right)} = \overline{y \left(\frac{dy}{dt} \right)} = 0 \quad (2.106)$$

e

$$\overline{x \left(\frac{dy}{dt} \right)} = -\overline{y \left(\frac{dx}{dt} \right)}. \quad (2.107)$$

Dessa forma:

$$\frac{d \left(\int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau \right)}{dt} = p_1(t) \quad (2.108)$$

e

$$\frac{d \left(\int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right)}{dt} = p_2(t). \quad (2.109)$$

Levando em consideração as propriedades de sinais estacionários apresentadas pelas Eq. 2.106 e 2.107, tira-se as conclusões expressas pelas Eq. 2.110, 2.111 e 2.112.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T \left[p_1(t) \int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau \right] dt = 0 \quad (2.110)$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T \left[p_2(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] dt = 0 \quad (2.111)$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T \left[p_2(t) \int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau \right] dt = - \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T \left[p_1(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] dt \quad (2.112)$$

Substituindo as Eq. 2.110, 2.111 e 2.112 na Eq. 2.105, encontra-se:

$$I_n = \left(\frac{1}{2\rho_0 d} \right) (-2) \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T \left[p_1(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] dt. \quad (2.113)$$

Por fim, chega-se na Eq. 2.114, que representa a intensidade sonora média medida a partir de dois microfones no domínio do tempo.

$$I_n = \left(\frac{1}{\rho_0 d} \right) \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T \left[p_1(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] dt \quad (2.114)$$

Fahy (1977) e Chung (1978) derivaram uma fórmula de intensidade sonora média no domínio da frequência de maneira independente. Trata-se da Eq. 2.115, cuja dedução de maneira detalhada encontra-se no livro de Frank Fahy (1995), onde ele expõe dois métodos: 1) um deles baseado na função de correlação cruzada entre os sinais de pressão e velocidade de partícula no tempo, no qual ao final é realizada uma transformada de Fourier; 2) no outro os sinais da velocidade de partícula e pressão são passados para o domínio da frequência e em seguida utiliza-se a função de densidade espectral. Na Eq. 2.115, $\tilde{G}_{p_2 p_1}(\omega)$ é o espectro de potência cruzada dos dois sinais captados pelos microfones: $p_1(t)$ e $p_2(t)$.

$$I_n(\omega) = \left(\frac{1}{\rho_0 \omega d} \right) Im\{\tilde{G}_{p_2 p_1}(\omega)\} \quad (2.115)$$

2.5.2 Erro causado pela aproximação do gradiente de pressão pela diferença finita

Jacobsen & de Bree (2005) afirmam que as limitações mais importantes da sonda p-p possuem origem na aproximação pela diferença finita, nos fenômenos de difração e dispersão sonora e na diferença de fase entre os canais de aquisição. Apesar dos erros serem analisados em seções separadas no presente trabalho, como poderá ser percebido, erros em medições são causados por um conjunto de fatores de difícil separação entre si e com capacidade de influenciar uns nos outros.

A aproximação do gradiente de pressão pela diferença finita, sobre a qual o princípio de medição das sondas p-p é fundamentado, gera um erro na determinação da intensidade sonora que, justamente por estar ligado ao princípio, é considerado um erro inerente a esse tipo de medição. Finn Jacobsen (2007) explica que a precisão da aproximação pela diferença finita depende da distância que separa os dois microfones e do comprimento de onda. Ao analisar a Fig. 2.21, essa limitação fica óbvia, pois percebe-se que quanto menor o comprimento de onda, ou seja, quanto maior a frequência, maior será o erro da aproximação para uma mesma distância, e que ao se diminuir d é possível abranger uma faixa maior de frequências nas quais a aproximação é precisa.

O erro devido a aproximação da diferença finita também muda de acordo com o campo sonoro sob investigação. Para a avaliação desse erro o que se faz é analisar o mesmo para diferentes tipos de campos sonoros idealizados, como fizeram Thompson & Tree (1981) e Shirahatti & Crocker (1992). O resultado prático, apresentado por Finn Jacobsen (2007), é que o limite superior para uma separação de $d = 12$ [mm] entre os microfones é de cerca de 5 [kHz] quando se trata apenas do erro de aproximação pela diferença finita. Frank Fahy (1995) afirma que no ar a 20 [°C], para um erro máximo de -1 [dB] no nível de intensidade sonora média, deve-se manter $kd < 1,2$ e que para um erro máximo de -0,5 [dB] é preciso manter $kd < 0,8$.

2.5.3 Erro causado por difração e dispersão sonora

Os estudos realizados para análise do erro da aproximação pela diferença finita citados na subseção anterior levaram em consideração um cenário ideal, no qual a sonda de intensidade sonora não causa distorção no campo sonoro medido. Na prática essa idealização não condiz com a realidade. Watkinson & Fahy (1984) dizem que, principalmente quando a medição

envolve altas frequências com comprimentos de onda da mesma grandeza da dimensão de um microfone típico, a performance da sonda é influenciada significativamente pelos efeitos de difração e dispersão sonora.

É evidente que o efeito da difração e dispersão sonora está ligado ao design da sonda de intensidade sonora e dos equipamentos (microfones, pré-amplificadores, cabos e estrutura suporte) que a compõem. A configuração dos microfones, que pode ser escolhida dentre as opções mostradas pela Fig. 2.20, é um fator que já foi bastante estudado. Frank Fahy (1995) afirma que o consenso é que, em relação ao erro causado pelo distúrbio da sonda no campo sonoro estudado, para o caso de sondas comerciais, o melhor arranjo é o *face-to-face* com a utilização de um espaçador sólido entre os microfones. Jacobsen et. al (1998) concluiu que neste arranjo o erro causado pela aproximação da diferença finita é contrabalanceado pela combinação da difração e dispersão sonora com a ressonância da pequena cavidade entre o espaçador e o diafragma de cada microfone. Jacobsen (2007) diz que esse contrabalanceamento, de maneira fortuita, faz com que no uso de dois microfones de 0,5 [in] separados por um espaçador de 12 [mm] o limite superior de frequência atinja 10 [kHz].

Frank Fahy (1995) afirma que o erro de difração limita a configuração *side-by-side* em aproximadamente 3 [kHz] e sustenta sua afirmação com a Fig. 2.22. Para essa configuração é preciso lembrar que existe uma separação mínima entre os microfones, que no caso de microfones de 0,5 [in] é de aproximadamente 13 [mm]. Caso se objetive um erro causado pela aproximação da diferença finita de no máximo de -0,5 [dB], a limitação também fica por volta de 3 [kHz] na configuração *side-by-side*. Este é um exemplo da influência de mais de um fator na geração de erros, já que a escolha de uma configuração influi na distância mínima, que por sua vez afeta o erro pela aproximação da diferença finita e no erro de difração.

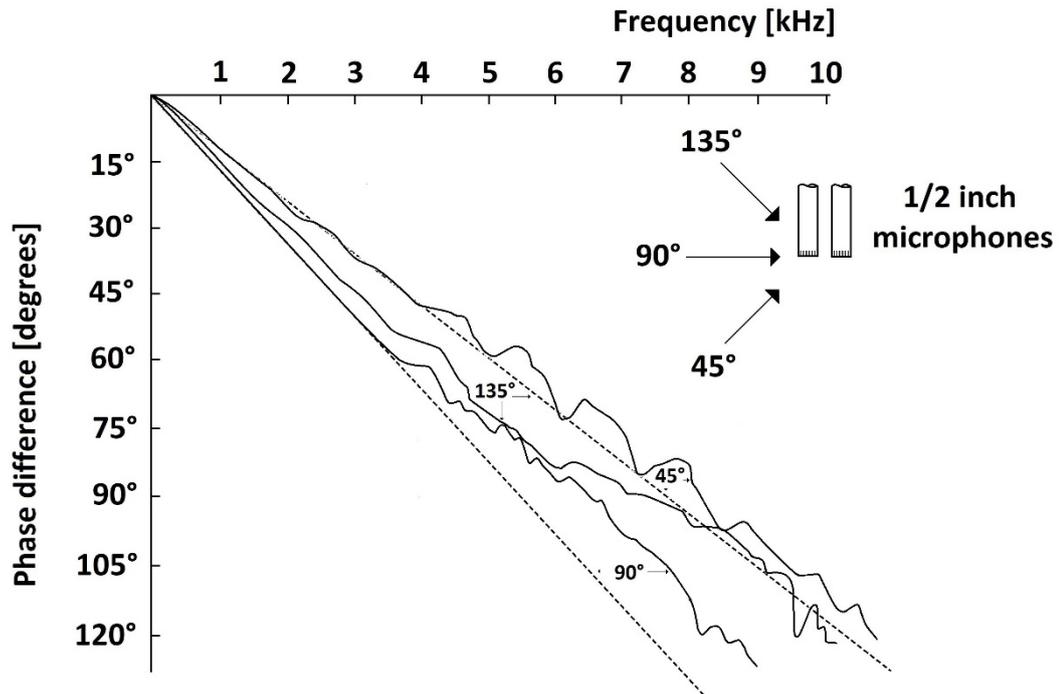


Figura 2.22: Efeitos da difração da configuração side-by-side p-p.
Fonte: Frank Fahy, 1995, p. 110.

2.5.4 Erro causado pela diferença de fase

A diferença de fase (*phase-mismatch*) entre os canais de aquisição de uma sonda é a fonte de erro mais preocupante na medição de intensidade sonora, até mesmo com os melhores equipamentos disponíveis na atualidade (FINN JACOBSEN, 2011). Portanto, é indispensável que os dois canais possuam uma compatibilidade de fases ou, caso exista diferença relevante entre eles, que a mesma seja corrigida. Quando se faz referência à diferença entre canais de aquisição o objetivo é ser generalista, porque a diferença pode vir dos microfones, cabos ou dos canais de uma placa de aquisição, no entanto, normalmente a diferença relevante vem dos microfones.

Para quantificar o *phase-mismatch* é preciso estabelecer algumas convenções, a primeira delas é a de que será usada a diferença de fase que seria encontrada em uma onda plana progressiva como um valor de referência: $\phi_0 = kd$. Chamando a fase que de fato existe entre os pontos de medição dos dois microfones de ϕ_f e o valor do *phase mismatch* de $\pm\phi_s$, é possível expressar a relação entre essas três variáveis pela Eq. 2.116, apresentada por Frank Fahy (1995).

$$\delta_{pI} = 10 \log \left| \frac{\phi_f \pm \phi_s}{\phi_0} \right| = NPS - NIS \text{ [dB]} \quad (2.116)$$

A variável δ_{pI} é o *pressure-intensity index* (coeficiente de pressão-intensidade), NPS é o nível de pressão sonora medido pelos microfones e NIS é o nível de intensidade sonora. Quando ambos os microfones são expostos à mesma pressão, em um campo sonoro controlado, sendo $\phi_f = 0$ e a intensidade teórica esperada $I_n = 0$, o coeficiente de pressão-intensidade se transforma no *pressure-residual intensity index* (coeficiente de pressão-intensidade residual): $\delta_{pI} \rightarrow \delta_{pI0}$. Frank Fahy (1995) explica que δ_{pI0} pode ser usado como um indicador de qualidade pois é uma medida da diferença de fase entre os canais, já δ_{pI} , por sofrer influência da própria diferença de fase, deve ser usado como um indicador da dificuldade de se realizar uma medição precisa.

Para uma mesma distância d , é fácil perceber que uma mesma diferença de fase entre os canais de aquisição (ϕ_s) causa um erro maior nas baixas frequências do que nas altas frequências, já que a diferença de fase que de fato existe entre os microfones (ϕ_f) no caso de altas frequências é maior do que nas baixas frequências, então, conseqüentemente, o mesmo erro é proporcionalmente maior para uma frequência menor. Uma possível ação para amenizar esse fator é o uso de espaçamentos diferentes para faixas de frequências diferentes, usando um d maior para baixas frequências e menor para altas frequências. Vale salientar, mais uma vez, que o erro na medição de intensidade sonora com a sonda p-p é causado por um conjunto de fatores correlacionados uns com os outros, como já visto, a escolha de d influencia nos três erros apresentados até o momento.

A norma IEC 1043 ‘Electroacoustics — Instruments for the measurement of sound intensity — Measurement with pairs of pressure sensing microphones.’ (1993) é a norma que lida com os requisitos necessários para sondas de intensidade sonora do tipo p-p. No que tange a diferença de fase, essa norma apresenta a Tab. 2.1, que possui os valores mínimos para os coeficientes de pressão-intensidade residual (CPIR) em decibéis no caso de sondas, processadores e instrumentos. Esses valores são para uma distância $d = 25$ [mm] entre os microfones, sendo necessário o reajuste por um fator de $+10 \log(d/25)$ para outros espaçamentos.

Tabela 2.1: Requerimentos mínimos para o Coeficiente de Pressão-Intensidade Residual em decibéis no caso de sondas, processadores e instrumentos. Valores para uma distância $d = 25$ [mm] entre os microfones. Fonte: IEC 1043.

Frequência central da banda [Hz]	Sonda		Processador		Instrumento	
	Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 2
50	13,0	7,0	19,0	13,0	12,0	6,0
63	14,0	8,0	20,0	14,0	13,0	7,0
80	15,0	9,0	21,0	15,0	14,0	8,0
100	16,0	10,0	22,0	16,0	15,0	9,0
125	17,0	11,0	23,0	17,0	16,0	10,0
160	18,0	12,0	24,0	18,0	17,0	11,0
200	19,0	13,0	25,0	19,0	18,0	12,0
250	20,0	14,0	26,0	20,0	19,0	13,0
315	20,0	15,0	26,0	20,0	19,0	14,0
400	20,0	16,0	26,0	20,0	19,0	14,5
500	20,0	17,0	26,0	20,0	19,0	15,0
630	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
800	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
1000	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
1250	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
1600	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
2000	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
2500	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
3150	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
4000	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
5000	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0
6300	20,0	18,0	26,0	20,0	19,0	16,0

Uma outra maneira de se avaliar a diferença de fase entre dois sinais, além do cálculo do coeficiente de pressão-intensidade residual, é através dos dados do espectro de potência cruzado. Como explicitado na subseção 2.4.2.2, as funções cruzadas estão relacionadas com o

nível de similaridade entre os sinais e possuem informação sobre a diferença de fase entre os mesmos, sendo $\arg S_{xy}(f)$ o espectro de fase.

No caso de sondas de intensidade sonora comerciais, os fabricantes utilizam microfones que possuem a fase “casada” de fábrica, além de comercializarem também calibradores de fase entre microfones, garantindo sempre que o erro causado pela diferença de fase seja controlado e minimizado.

Como o objetivo do presente trabalho é fazer um protótipo de sonda de baixo custo utilizando microfones comumente disponíveis em universidades e empresas especializadas em engenharia acústica, é preciso utilizar métodos de correção da fase condizentes com a situação. Um método barato e efetivo, apresentado primeiramente por J. Y. Chung (1978), baseia-se na inversão da posição dos microfones. Ao se realizar uma medição e em seguida inverter as posições dos dois microfones em torno do ponto efetivo de medição, a média aritmética das intensidades sonoras, em princípio, é isenta de influência do erro da diferença de fase entre os canais de aquisição. Algumas dificuldades de aplicação deste método são: o campo sonoro medido deve permanecer inalterado durante o intervalo entre medições; a inversão de posição precisa ser feita de maneira a garantir a manutenção do ponto efetivo de medição, algo difícil a não ser que a sonda tenha um *design* previamente projetado para tal finalidade; passa a ser necessário o dobro de medições para determinar a intensidade sonora.

Um outro método pertinente é o apresentado por G. Krishnappa (1981), nele os dois microfones são colocados ao final de um tubo circular e na outra ponta do tubo é posicionada uma fonte sonora. Até a frequência de corte do tubo, a propagação ocorre na forma de ondas planas, assim sendo, os dois microfones ficam sujeitos à mesma pressão sonora e a mesma fase. Pode-se então, através de uma função de transferência, passar as propriedades de um microfone para o outro, igualando as respostas dos dois no que tange amplitude e fase.

2.5.5 Processamento de sinais

O processamento de sinais que será utilizado no presente trabalho trata-se da implementação da Eq. 2.115 através do uso de FFT's. A Fig. 2.23, apresentada como uma cortesia da Brüel & Kjaer no livro do Frahy (1995), mostra um diagrama simplificado que será utilizado como base.

Uma apresentação mais detalhada do processamento de sinais de fato implementado é feita na Seção 4.

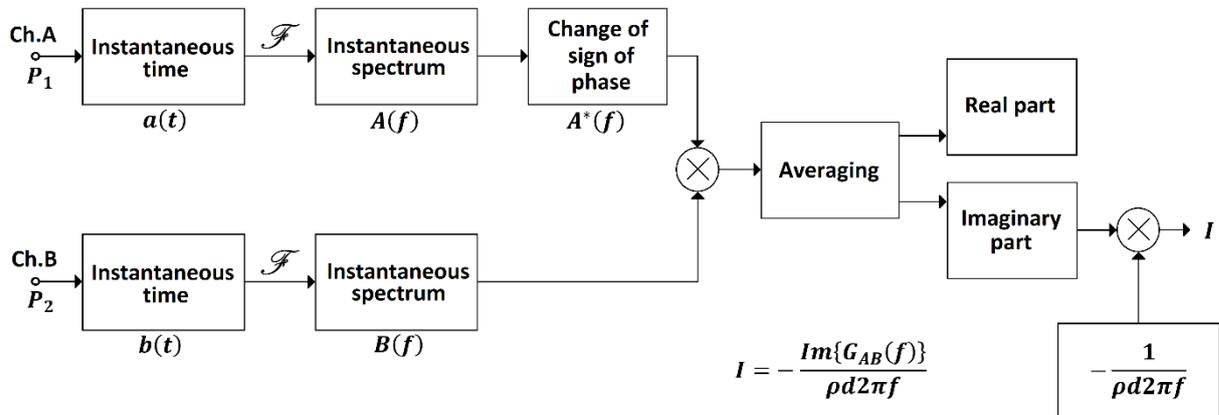


Figura 2.23: Diagrama de processamento de sinais para determinação da intensidade sonora.
Fonte: Frank Fahy, 1995, p. 132.

2.5.6 Aplicações práticas

Dentre as aplicações práticas das medições de intensidade sonora, destacam-se: a determinação de potência sonora; o estudo e visualização de campos sonoros para localização, caracterização e ranqueamento de fontes sonoras; a medição da perda de transmissão. Essas serão abordadas a seguir de maneira mais detalhada.

Apesar de não serem explicadas no presente trabalho, por serem menos utilizadas ou por não serem aplicações muito bem estabelecidas, vale citar as seguintes aplicações da intensidade sonora: medição da absorção sonora *in situ*; medição da impedância acústica específica; eficiência de irradiação de superfícies vibrantes; auxílio na técnica de holografia.

2.5.6.1 Determinação da potência sonora

Bistafa (2009) afirma que o que caracteriza acusticamente uma fonte sonora é a sua potência sonora, pois esta indica a capacidade de uma fonte gerar som, sendo uma característica intrínseca da mesma. Fahy (1995) é mais ponderado e preciosista sobre a questão, ele escreve que, apesar de ser verdade que a potência sonora de uma fonte é geralmente menos influenciada pela natureza do seu entorno próximo do que a pressão sonora, aquela não é totalmente independente desse entorno. Porém, ambos concordam que a potência sonora é a quantidade fundamental sobre a qual a previsão do potencial efeito de uma fonte em qualquer ambiente

operacional deve ser baseada. Além disso, a potência constitui a base para a comparação entre a performance acústica de produtos de diferentes fabricantes e é uma das duas principais quantidades acústicas que são controladas por regulamentações e legislações (FRANK FAHY, 1995).

Uma aplicação importante da intensidade sonora é a determinação da potência sonora de maquinário em operação, tal determinação baseia-se na integração da componente normal da intensidade em uma superfície que envolve a fonte (FINN JACOBSEN, 2001). O uso da intensidade ao invés da pressão para determinar potência sonora significa que as medições podem ser feitas *in situ*, com ruído de fundo estável e no *near field* de máquinas (BRÜEL & KJÆR PUBLICATION, 1993). As normas internacionais que regulam a determinação da potência sonora através de medições de intensidade sonora são: ISO 9614-1, ISO 9614-2 e ISO 9614-3.

2.5.6.2 Estudo e visualização de campos sonoros para localização, caracterização e ranqueamento de fontes sonoras

A identificação, caracterização e ranqueamento das fontes sonoras em um ambiente no qual se pretende realizar um projeto de controle de ruído é de fundamental e óbvia importância. Medições de intensidade sonora possuem grande capacidade de ajudar nestas tarefas. Um exemplo é o mapeamento da intensidade sonora em um recinto utilizando medições pontuais que, através de interpolação, podem virar um mapa de contorno da intensidade sonora, como explica Jacobsen (1997), sendo esse mapa muito útil na localização de fontes. Além de medições pontuais, também pode ser utilizado o método de escaneamento que, com a grande capacidade de computação gráfica disponível atualmente, deixa o mapeamento ainda mais preciso e completo.

Após a localização de uma fonte sonora é preciso caracterizá-la, medições de intensidade sonora, como já mencionado, permitem a determinação da potência sonora *in situ*. É possível também detalhar a diretividade de uma fonte sonora, o que no caso de fontes complexas, em que acontece até mesmo de partes da estrutura irradiarem som enquanto outras absorvem, é de grande utilidade, pois torna o projeto de controle de ruído mais minucioso e eficiente. No caso de um ambiente com várias fontes sonoras distintas, após localizar e caracterizá-las fica fácil fazer um ranqueamento das mesmas, o que também torna o controle de ruído mais preciso.

Além da visualização da intensidade sonora distribuída em um recinto ajudar no estudo das fontes, Jacobsen (2001) explica que a visualização de campos sonoros contribui para a compreensão da irradiação e propagação de som e dos efeitos da difração e interferência, além de estimular e facilitar pesquisas sobre campos sonoros.

2.5.6.3 Medição de perda de transmissão

A capacidade de isolamento acústico de uma divisória ou painel é normalmente expressa em termos do coeficiente de transmissão de potência sonora τ , que é definido como a razão entre as potências transmitida e incidente (FRANK FAHY, 1995). O método tradicional para obtenção da perda de transmissão é através do ensaio normalizado pela ISO 140-3. Bistafa (2009) explica que o ensaio requer a instalação da parede sob teste como divisória entre duas câmaras reverberantes – sala de fonte e sala de recepção – e que a perda de transmissão é obtida medindo-se o nível de pressão sonora médio nas duas, sendo preciso descontar a absorção da sala de recepção.

O método que utiliza a intensidade sonora torna possível medir a potência sonora transmitida de maneira direta, em contraste, a potência sonora incidente não pode ser medida na sala da fonte usando intensidade sonora. Se o método da intensidade sonora é utilizado, não é necessário que o campo sonoro da sala de recepção seja difuso, por isso é preciso apenas de uma câmara reverberante (FINN JACOBSEN, 2007). Vale ainda ressaltar como vantagem do método que utiliza intensidade sonora o fato de que é possível analisar componentes de uma divisória (ex: janela, porta, e etc.) de maneira separada, identificando os pontos fracos por onde o caminho de transmissão é mais forte.

As normas referentes à determinação da perda de transmissão através do uso de intensidade sonora são: ISO 15186-1:2000 “Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity -- Part 1: Laboratory measurements”, ISO 15186-2:2003 “Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity -- Part 2: Field measurements” e ISO 15186-3:2002 “Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity - Part 3: Laboratory measurements at low frequencies”.

3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1 Experimento para correção da diferença entre as fases dos microfones

Como explicado na subseção 2.5.4, o erro causado pela diferença entre as fases dos dois canais de aquisição de uma sonda de intensidade sonora é o mais preocupante. Como objetiva-se permitir a realização de medições de intensidade sonora com o mínimo de exigências possível no que tange a posse de equipamentos, demandar que se tenha disponível dois microfones que possuam respostas sem diferença de fases entre si é contraditório, por isso é apresentado e realizado experimentalmente o método do Krishnappa para correção da fase existente entre microfones.

O método do Krishnappa, apresentado de maneira breve na subseção 2.5.4, consiste em expor dois microfones à mesma pressão sonora, para que, com o uso de uma função de transferência, as propriedades de um dos microfones sejam passadas para o outro, igualando as respostas em termos de amplitude e fase. Em seu artigo, Krishnappa explana o método levando em consideração as sensibilidades dos microfones como sendo variáveis de acordo com a frequência, portanto, sua explicação parte do sinal ainda em [volts]. Aqui o método é apresentado já partindo dos sinais em [Pascal].

Supondo dois microfones ‘ x ’ e ‘ y ’ expostos à mesma pressão sonora $P(f)$, que deve ser considerada como sinal de entrada, e considerando que os sinais $P_x(f)$ e $P_y(f)$, já digitalizados, são as saídas, qualquer dessemelhança entre esses sinais $P_x(f)$ e $P_y(f)$ é causada por diferença entre microfones, cabos ou canais de aquisição, ou ainda, por uma combinação dessas diferenças. Atribuindo todo o processo que transforma $P(f)$ em $P_x(f)$ e $P_y(f)$ às funções de transferências $H_x(f)$ e $H_y(f)$, pode-se representar essas transformações pela Fig. 3.1.

$$\begin{aligned}
 P(f) &\rightarrow \boxed{H_x(f)} \rightarrow P_x(f) \\
 P(f) &\rightarrow \boxed{H_y(f)} \rightarrow P_y(f) \\
 P_x(f) &\rightarrow \boxed{H_{xy}(f)} \rightarrow P_y(f)
 \end{aligned}$$

Figura 3.1: Representação de funções de transferência.

Ainda na Fig. 3.1, é representada a função de transferência $H_{xy}(f)$, que passa as propriedades de um microfone para o outro, pois considera um dos sinais como entrada e o outro como saída. É nessa capacidade de transferência contida em $H_{xy}(f)$ que o método se baseia, pois, uma vez realizada uma calibração dos dois microfones sob a mesma pressão sonora, em medições de intensidade sonora posteriores pode-se corrigir a diferença de fase através da função de transferência.

O experimento que atesta o funcionamento desse método utiliza um microfone 378B20 da PCB Piezotronics, dois microfones MP 201 da BSWA Tech, a placa de aquisição NI 9234, peças confeccionadas através de impressão 3D, um alto falante com *bluetooth*, peças de madeira e um tubo de PVC com diâmetro nominal de 75 [mm]. A Fig. 3.2 mostra ilustrações feitas no *SolidWorks* dos materiais e equipamentos usados na montagem do experimento. A peça de impressão 3D, mostrada pela Fig. 3.2-f), tem a função de posicionar os microfones de maneira a manter o eixo que liga os seus pontos centrais perpendicular à propagação das ondas sonoras, mantendo-os submetidos a mesma pressão sonora. O espaçamento entre os microfones nesse experimento foi de 28 [mm].

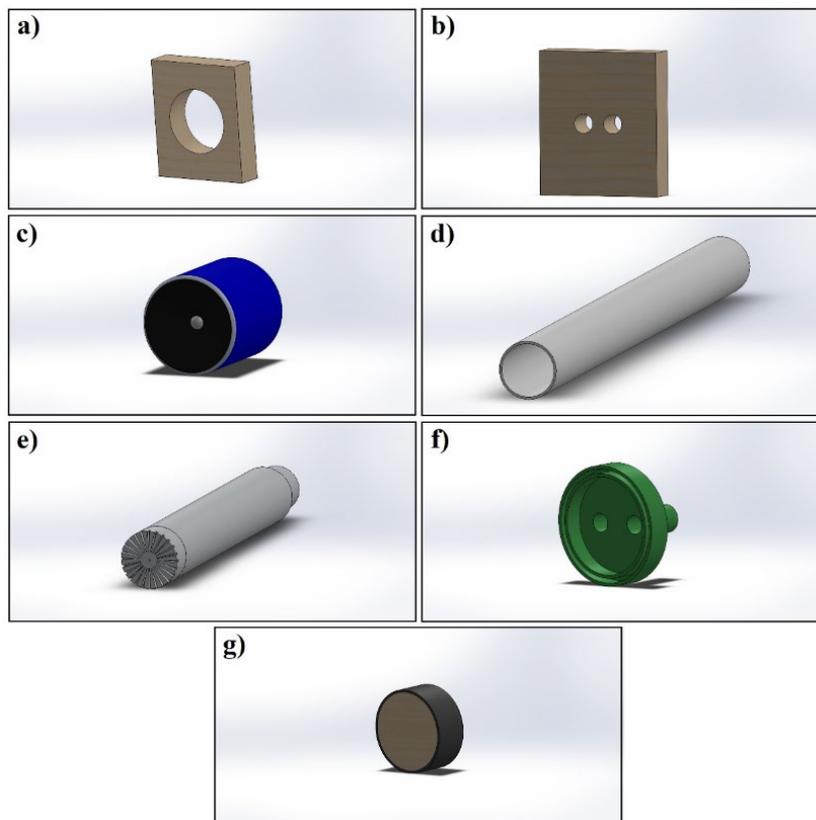


Figura 3.2: a), b) e g) Peças de madeiras com função de suporte. c) Alto falante. d) Cano. e) Microfone. f) Peça feita por impressora 3D. g) Peça de madeira envolta com borracha.

A Fig. 3.3 mostra um passo a passo para melhor entendimento da planta experimental, sendo que para completar a montagem os microfones são conectados através de um cabo BNC à placa de aquisição de sinais, que por sua vez é conectada a um microcomputador.

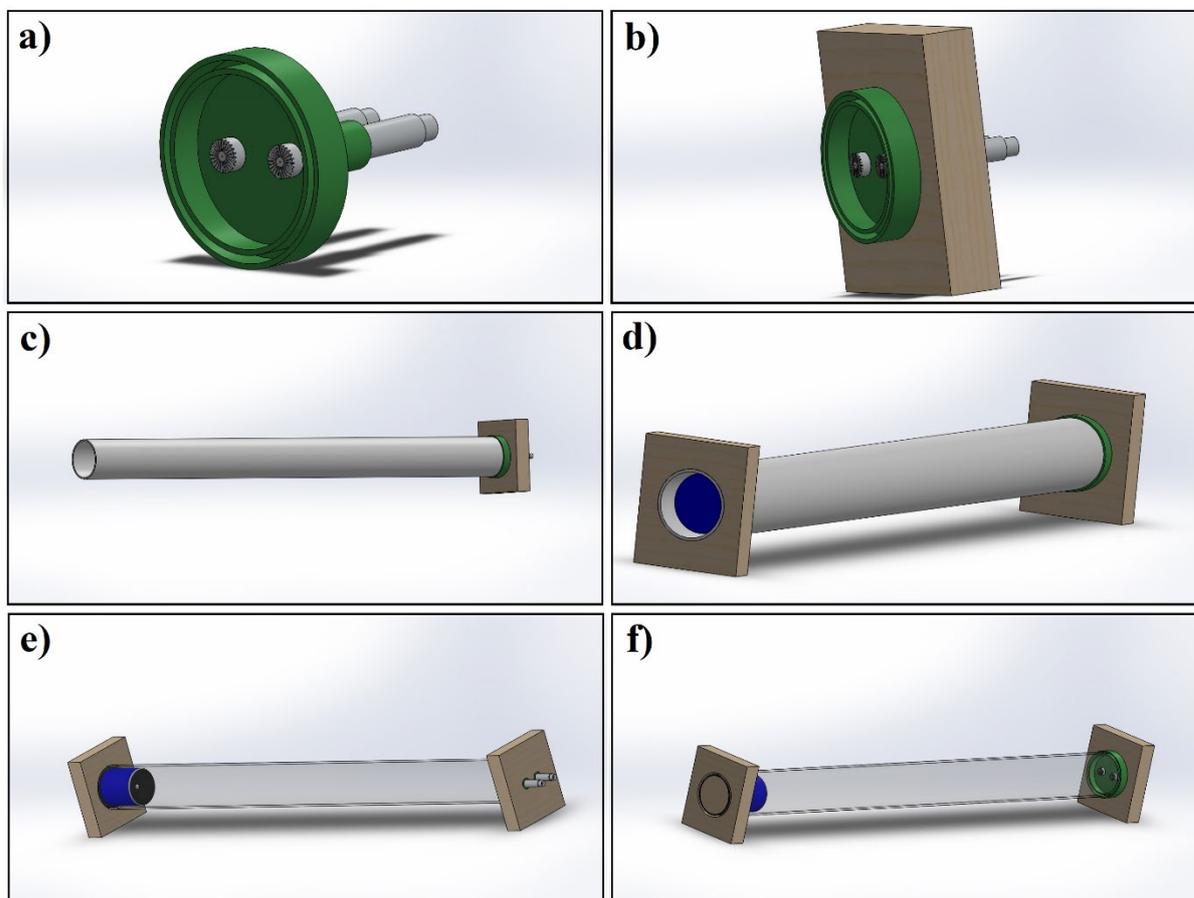


Figura 3.3. Ilustração de um passo a passo sequencial para montagem do experimento. Nas figuras e) e f) o cano foi representado de maneira transparente para facilitar o entendimento.

Nesse experimento, realiza-se uma medição de calibração na qual as respostas dos dois microfones são comparadas em relação a amplitude e fase. Logo após, com os sinais obtidos e processados na calibração, é determinada a função de transferência capaz de igualar as respostas dos dois microfones, para que em uma medição posterior essa função seja aplicada a um dos dois. Assim, nessa segunda medição em que a correção é aplicada, pode-se comparar novamente as respostas dos dois microfones e examinar se as diferenças foram corrigidas. No caso da fase, tal exame pode ser feito através da análise de dados do espectro cruzado e da comparação dos valores de coeficientes de pressão-intensidade residual das medições que ocorreram sem e com aplicação da correção.

Excluindo a parte relacionada ao processamento de sinais, cada medição experimental envolve passos simples e rápidos:

1. Montar a planta experimental como mostra a Fig. 3.3.
2. Ligar os microfones à placa de aquisição e a mesma a um microcomputador.
3. Enviar um sinal de ruído rosa para o alto-falante através de *bluetooth*.
4. Realizar a captação da medição de calibração.
5. Realizar uma segunda medição na qual correções são aplicadas através do processamento de sinais. Essa segunda medição é feita na mesma planta experimental e usando o mesmo sinal de ruído rosa.

Para evitar ambiguidade, a partir deste momento se adota a seguinte nomenclatura: a medição do passo quatro é chamada de Medição de Calibração; a medição do passo cinco recebe o nome de Medição Corrigida; o conjunto dos cinco passos constituem uma Medição K.

Realizou-se medições com duas duplas de microfones:

- Dupla 1: formada pelo microfone 378B20 da PCB Piezotronics com número de série 113098 e pelo microfone MP 201 da BSWA Tech com número de série 44394.
- Dupla 2: formada por dois microfones MP 201 da BSWA Tech, com números de série 44394 e 44432.

Por conveniência e para maior clareza adotou-se a seguinte convenção de nomenclatura:

Tabela 3.1: Convenção de nomenclatura para os microfones utilizados.

Fabricante	Modelo	Nº de Série	Nome Convencionado
PCB Piezotronics	378B20	113098	Mic 1
BSWA	MP 201	44394	Mic 2
BSWA	MP 201	44432	Mic 3

3.2 Experimento para comparação de métodos de medição de intensidade sonora

No caso específico de ondas planas progressivas sem reflexão, é possível obter o valor da intensidade sonora a partir da pressão sonora. Pode-se usar essa informação para montar um experimento em que se reproduza esse campo sonoro particular, para então comparar a intensidade sonora definida a partir dos valores de pressão sonora com a intensidade determinada através do processamento de sinais baseado no método p-p. O primeiro método, que consiste em implementar a Eq. 2.63, será chamado de Método Analítico, enquanto que o segundo método, fundamentado na implementação da Eq. 2.115, será chamado de Método p-p.

Apesar da nomenclatura convencionada, em última instância, o que se faz neste experimento é comparar dois métodos analítico-experimentais de obtenção da intensidade sonora. Pode-se usar o termo analítico-experimental para os dois pois ambos usarão dados obtidos experimentalmente, sinais de microfones, para através de uma formulação analítica encontrar a intensidade sonora. O que difere os dois métodos é que o chamado de Método Analítico funciona somente para ondas sonoras planas progressivas e, quando se atinge essas circunstâncias restritas, é exato, enquanto que o método usado na sonda p-p foi desenvolvido para medir a intensidade sonora em vários tipos de campos acústicos, porém, por usar de aproximações nas deduções de suas fórmulas analíticas, sempre gera resultados aproximados.

Nesse contexto, o experimento proposto se faz bastante útil, pois reproduz condições específicas para, através do Método Analítico, encontrar um valor de intensidade sonora que é utilizado como referência para validar o Método p-p, que, após ser validado, pode ser empregado posteriormente em ambientes acusticamente menos restritos. Colocando de maneira mais direta: o objetivo do experimento ao se comparar os dois métodos é testar o protótipo de sonda de intensidade sonora (equipamentos, implementação do processamento de sinais do método p-p e design) desenvolvida, usando como referência o Método Analítico, que é válido somente para o caso específico de ondas planas progressivas.

Para este ensaio utilizou-se a planta do experimento anterior, subseção 3.1, mais a planta mostrada pelas Fig. 3.4, 3.5 e 3.6. Compõem a nova montagem: um tubo de PVC de 6 [metros] de comprimento e diâmetro nominal de 75 [mm], uma peça desenhada em *SolidWorks* e materializada através de impressão 3D, dois microfones, lã de rocha, espuma acústica de

poliuretano, bases de madeira, caixa de som com *bluetooth* e uma peça de madeira envolvida com borracha.

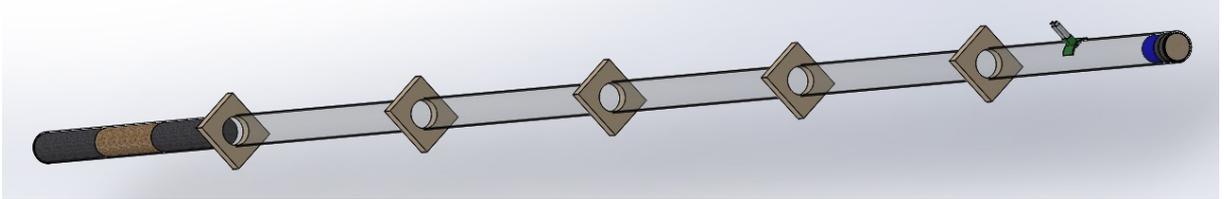


Figura 3.4: Planta experimental que objetiva gerar um campo sonoro em que a propagação de ondas se dê somente através de ondas planas “puramente” progressivas.

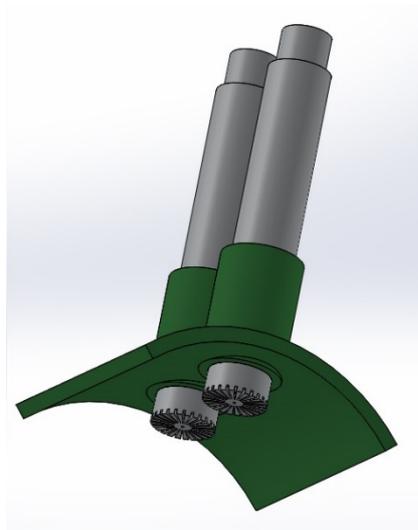


Figura 3.5: Peça de impressão 3D que possui a função de posicionar os microfones.

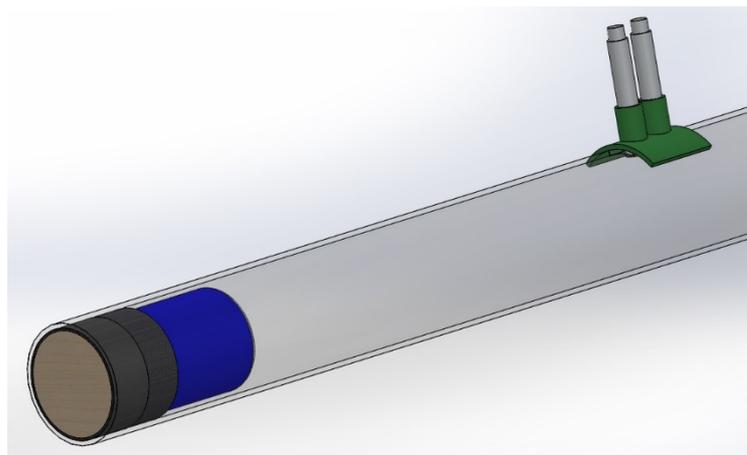


Figura 3.6: Em detalhe a extremidade do tubo onde fica o alto-falante e a 50 [mm] de distância os microfones para medição da intensidade sonora.

Uma grande diferença entre a montagem mostrada pela Fig. 3.4 e a apresentada pela Fig. 3.3 é o posicionamento dos microfones. Como ilustra a Fig. 3.6, no presente experimento é preciso

que o eixo que liga os pontos centrais dos dois microfones seja paralelo ao eixo de propagação de ondas planas, já na planta de calibração (Fig. 3.3) esses eixos ficam posicionados de maneira perpendicular entre si, de modo que ambos os microfones estejam sob efeito da mesma frente de onda sonora. A peça de impressão 3D, mostrada pela Fig. 3.5, é que possui a função de posicionar os microfones em paralelo à propagação das ondas sonoras, e, nesse experimento específico, optou-se por um espaçamento fixo de 20 [mm] entre os pontos centrais dos microfones.

Outra diferença entre as duas plantas experimentais é que na planta mostrada pela Fig. 3.4, em uma das extremidades do tubo de PVC são colocados materiais absorvedores de som para transformar a ponta oposta ao alto falante em uma terminação anecóica. Essa medida visa diminuir ao máximo a reflexão sonora, para que o valor calculado pela implementação da Eq. 2.63, que pressupõe um campo de ondas progressivas sem reflexão, seja o mais próximo do correto possível. Para montar a terminação anecóica levou-se em consideração os princípios sobre absorção sonora destacados na subseção 2.1.4, gerando as seguintes medidas:

- Como o aumento da espessura do material aumenta a absorção sonora e diminui a reflexibilidade, utilizou-se uma espessura muito alta: 92 [cm] no total ao somar todas as camadas. Para se ter uma referência, em bancos de dados de materiais absorvedores, como por exemplo mostra Bistafa (2006), os materiais têm seus coeficientes de absorção sonora apresentados para camadas de 5 e 10 [cm], sendo que essa duplicação da espessura costuma gerar um aumento expressivo da absorção, mesmo nas baixas frequências
- A primeira camada de material absorvente utilizada foi de 31 [cm] de uma espuma acústica de poliuretano, a segunda foi de 30 [cm] de lã de rocha e uma terceira camada igual a primeira fechou a terminação anecóica.
- Utilizou-se um tubo de grande comprimento, 6 [metros], com os microfones posicionados a 50 [cm] do alto-falante. Isso objetiva diminuir a magnitude da interferência de ondas reflexivas nas medições.

O experimento começa usando a planta apresentada na subseção 3.1 para realizar uma Medição de Calibração, onde as variáveis necessárias para a transferência das propriedades de um microfone para o outro são obtidas e armazenadas. Em seguida, os dois microfones são

colocados na planta apresentada pela Fig. 3.4 para uma medição posterior, em que correções são aplicadas pelo processamento de sinais. É possível usar os mesmos cinco passos do experimento anterior, com algumas pequenas modificações. A primeira mudança é que antes a medição posterior à Medição de Calibração era chamada de Medição Corrigida e era realizada na planta da Fig. 3.3, agora essa medição recebe o nome de Medição de Intensidades e é feita na planta da Fig. 3.4. A segunda é que na Medições de Intensidades são usados outros sinais sonoros, além do ruído rosa: sinal tonal de 1000 [Hz], ruído branco e dois ruídos industriais.

Comparando os experimentos, também mudam as variáveis de saída de interesse, pois na subseção 3.1 a preocupação era com a avaliação das diferenças de respostas dos dois microfones, agora o foco são as intensidades sonoras calculadas pelos dois métodos analítico-experimentais.

Em resumo, os passos do presente experimento são:

1. Montar as plantas experimentais como mostram as Fig. 3.3 e 3.4.
2. Ligar os microfones à placa de aquisição e a mesma a um microcomputador.
3. Enviar um sinal de ruído rosa para o alto-falante através de *bluetooth*.
4. Realizar a captação da Medição de Calibração, na planta da Fig 3.3.
5. Realizar Medições de Intensidades, utilizando a planta exibida pela Fig 3.4, nas quais são usados cinco sinais diferentes, inclusive o de ruído rosa. Nessa medição aplica-se uma correção na resposta de um dos microfones através do processamento de sinais e a intensidade sonora é calculada pelos Métodos Analítico e p-p.

Resumindo a nomenclatura usada nesse experimento: às medições na planta da Fig 3.3 (passo quatro) deu-se o nome de Medição de Calibração; às medições posteriores, feitas na planta da Fig. 3.4 e nas quais correções são aplicadas, atribuiu-se o nome de Medição de Intensidades. O conjunto dos cinco passos apresentados acima formam uma medição que é chamada de Medição Comparativa de Intensidades.

Neste experimento se utilizou as mesmas duas duplas de microfones do experimento anterior. Vale ressaltar que a montagem da planta experimental apresentada nesta seção, apesar de se basear na teoria acústica, se valeu principalmente de conhecimentos empíricos (escolha de materiais, tamanho do tubo e distâncias entre alto-falante e microfones).

4 IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSAMENTO DE SINAIS

Todo o processamento de sinais, que ocorre a partir da captação sonora realizada pelos microfones e vai até a determinação da intensidade sonora, foi realizado através de um *script* desenvolvido em MATLAB, como já salientado anteriormente. A presente seção destina-se a apresentar a implementação desse processamento de sinais. Apesar de expor algumas funções presentes no *Signal Processing Toolbox* do MATLAB e recorrer a algumas linhas em que a sintaxe desta linguagem de programação é usada, também são apresentados diagramas que objetivam explicar a estrutura do processamento digital de sinais de maneira mais generalista, pois assim fica facilitada a implementação desse processamento em qualquer outra linguagem de programação. Algumas linhas do *script* final são aqui apresentadas quando se julgar que isso facilita a didática de algumas explicações, já a versão final completa será disponibilizada integralmente para uso público através da internet.

4.1 Aquisição e pré-processamento

O primeiro passo é a aquisição dos sinais captados pelos microfones, que no presente estudo é feita pela placa NI 9234 da *National Instruments*. O MATLAB possibilita uma interação direta com as placas dessa empresa, como exemplificado pelas linhas de código expostas pela Fig. 4.1. A primeira linha trata-se da criação de um *session object*, chamado w_C , para configuração de uma aquisição e a segunda linha é onde são inseridos dados de entrada: a placa de aquisição a ser usada, os canais da placa e o tipo de medição. As linhas quatro e cinco fornecem a taxa amostral para a placa de aquisição. Esse passo necessita atenção, pois as placas possuem valores de taxa amostral pré-definidos e é preciso que a variável que armazene o valor da frequência de amostras, que no exemplo é fs_C , receba o valor real utilizado pela placa. O principal perigo de um possível erro neste passo é que muitas vezes ele gera um resultado distorcido, mas muito próximo do real, o que torna difícil a percepção da imprecisão. Na linha sete é estabelecido o tempo de duração de uma medição e nas linhas nove e dez as sensibilidades dos microfones ligados ao canal 0 e ao canal 1 da placa, respectivamente, são definidas.

```

1  w_C = daq.createSession('ni');
2  w_C.addAnalogInputChannel('cDAQ1Mod1', [0 1], 'Microphone');
3
4  w_C.Rate = fs_C;
5  fs_C = w_C.Rate;
6
7  w_C.DurationInSeconds = 10;
8
9  w_C.Channels(1).Sensitivity = 50e-3;
10 w_C.Channels(2).Sensitivity = 50e-3;

```

Figura 4.1: Exemplo meramente ilustrativo de criação de uma seção de aquisição de sinais no MATLAB.

Os sinais sonoros captados pelos dois microfones são convertidos para sinais com unidades em [volts], porque, como explicado na subseção 2.1.5, esses transdutores convertem energia acústica em energia elétrica. É preciso então passar os sinais para a unidade de engenharia [Pascal], e isso é feito utilizando a sensibilidade dos microfones, que são fornecidas pelos fabricantes e aferidas através do uso de calibradores comerciais. No caso de microfones de medição de alta precisão, a sensibilidade é uma constante que não varia ao longo das frequências, ou seja, é basicamente um escalar que amplifica o sinal como um todo. Existe um limite para essa suposição de sensibilidade constante, mas, dentro da faixa de frequência de interesse do presente estudo, os microfones utilizados possuem essa propriedade. A Fig. 4.2 mostra através de um diagrama essa conversão dos sinais captados $x(t)$ e $y(t)$ de [volts] para [Pa], através do uso das sensibilidades H_x e H_y , que possuem [Pa/volts] como unidade.

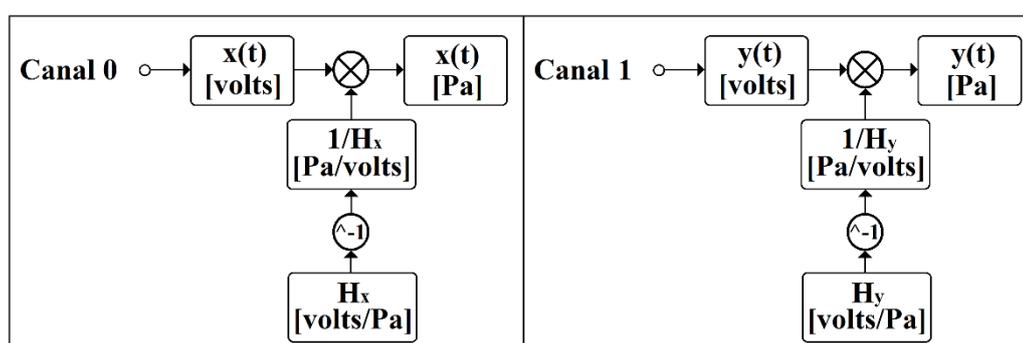


Figura 4.2: Passagem dos sinais elétricos para unidade de engenharia.

Faz-se necessária uma observação quanto a uma convenção adotada neste trabalho: como feito na Fig. 4.2, o canal 0 tem o seu sinal sempre associado a uma representação feita por 'x', enquanto que para o canal 1 se usa 'y'.

4.2 Visão geral do processamento digital de sinais implementado

Após a etapa de aquisição de sinais, que é controlada pelas primeiras linhas do *script*, todos os passos seguintes acontecem no computador/notebook, através do processamento digital dos sinais captados, como é representado pela Fig. 4.3.

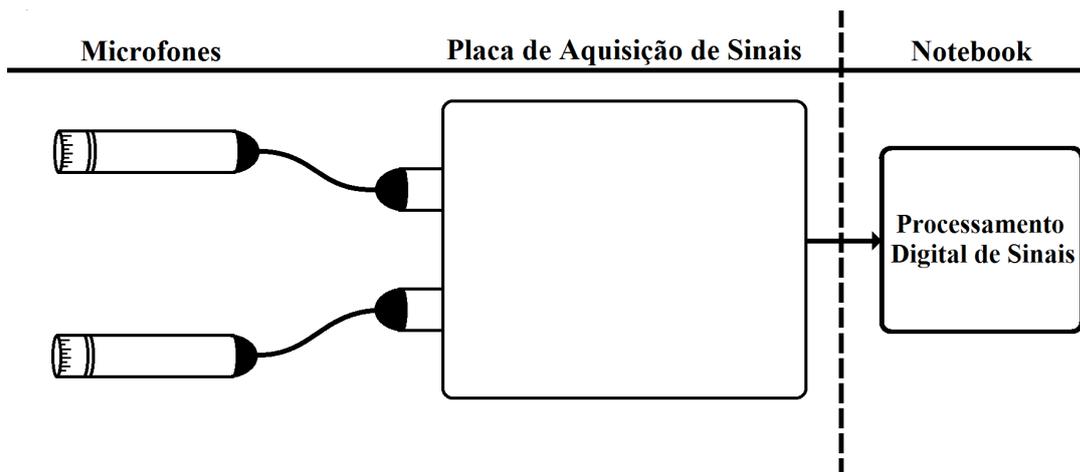


Figura 4.3: Ilustração da conversão dos sinais analógicos para sinais digitais.

Na presente subsecção é apresentada uma visão geral do processamento digital de sinais. A fim de facilitar um pouco o entendimento subdividiu-se o processamento em partes referentes às medições experimentais apresentadas nas subsecções 3.1 e 3.2. Para tal, montou-se fluxogramas que mostram os caminhos percorridos para a determinação das variáveis mais importantes, mas sem detalhar o processamento necessário para que tais variáveis sejam calculadas. O processamento é apresentado com seus pormenores nas subsecções seguintes através de diagramas.

As Fig. 4.4 e 4.5 mostram os fluxogramas das Medições de Calibração e Corrigida do ensaio baseado no método de Krishnappa. Nesse experimento, são avaliadas as respostas dos microfones no que tange a diferença de fase, sendo para isso calculado o coeficiente de pressão-intensidade residual (CPIR) em bandas de um terço de oitava a partir do nível de pressão sonora médio entre os dois sinais de microfones ($NPS_{médio}$) e do nível de intensidade sonora residual, ou seja, o NIS medido pelo método p-p. A outra maneira de avaliação da diferença de fase, feita a partir dos dados da densidade espectral de potência cruzada, também é representada nos fluxogramas. Analisa-se também as respostas dos microfones no que tange as amplitudes, isso é feito pelos níveis de pressão sonora dos dois microfones: NPS_x e NPS_y .

Como o propósito desse ensaio é comparar os valores das variáveis supracitadas antes e depois da correção, tais valores são determinados nas duas medições: Calibração e Corrigida. A grande diferença entre as Fig 4.4 e 4.5 está no fato de que na Medição de Calibração a função de transferência, simbolizada por $H_{xy}(f)$, é calculada, enquanto que na Medição Corrigida a mesma é aplicada em um dos sinais de microfone, ou seja, é usada como dado de entrada. Na Fig. 4.5 as variáveis que sofrem influência da correção recebem um sobrescrito ‘c’, como $G_{yy}^c(f)$, por exemplo.

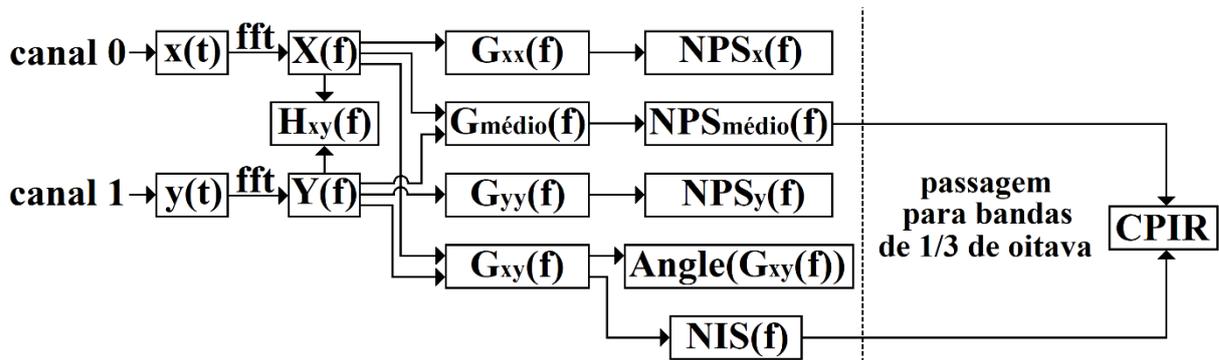


Figura 4.4: Fluxograma da Medição de Calibração do ensaio baseado no método de Krishnappa.

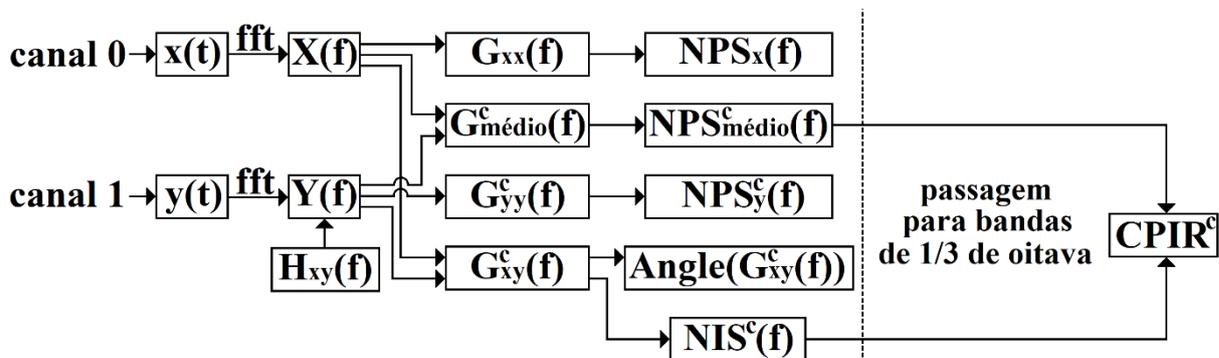


Figura 4.5: Fluxograma da Medição Corrigida.

No experimento apresentado na subseção 3.2, a Medição de Calibração pode ser representada pelo fluxograma da Fig 4.6, que nada mais é do que uma redução do fluxograma da Fig. 4.4, isso porque o objetivo neste momento é apenas obter a função de transferência. Depois de realizada essa medição ocorre uma Medição de Intensidades que tem como finalidade definir a intensidade sonora através dos Métodos Analítico e p-p. Mais uma vez, as variáveis que sofrem influência da correção recebem um sobrescrito ‘c’.

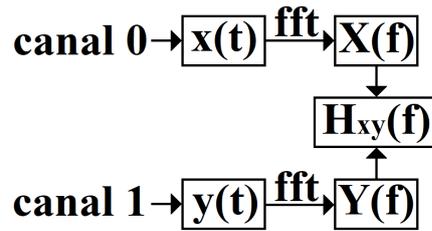


Figura 4.6: Fluxograma da Medição de Calibração do ensaio apresentado na subseção 3.2.

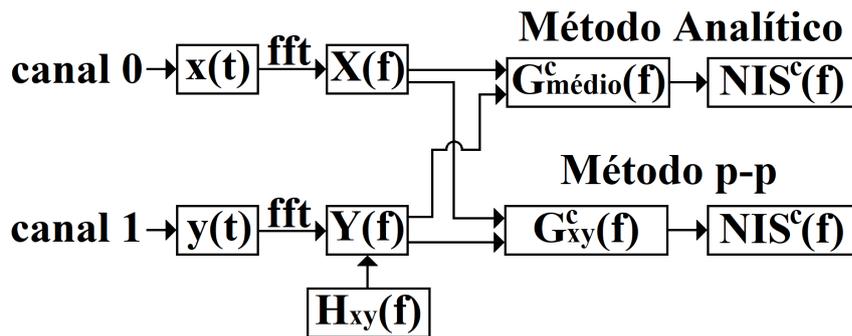


Figura 4.7: Fluxograma da Medição de Intensidades.

4.3 Espectro de potência e espectro de potência cruzada

O primeiro passo para a implementação do processamento que calcula o espectro de potência e o espectro de potência cruzada é definir as formulações a serem usadas. As Eq. 2.91 e 2.92, que expressam os valores da densidade espectral de potência cruzada e densidade autospectral de potência, após considerada a correção de energia devido ao uso de uma janela, se transformam nas Eq. 4.1 e 4.2, em que w_p é o inverso da constante E (Eq. 2.88) e $hanning(NFFT)$ é um vetor de $NFFT$ elementos que representa a janela de Hanning.

$$G_{xy}(f_k) = \frac{2}{M \times NFFT \times f_s \times w_p} \sum_{i=1}^M \{ [X_k^* \times hanning(NFFT)] \times \dots \times [Y_k \times hanning(NFFT)] \} \quad (4.1)$$

$$G_{xx}(f_k) = \frac{2}{M \times NFFT \times f_s \times w_p} \sum_{i=1}^M |X_k \times hanning(NFFT)|^2 \quad (4.2)$$

Após a multiplicação dos valores encontrados nas equações acima pela resolução no domínio da frequência, tem-se:

$$\tilde{G}_{xy}(f_k) = \Delta f \times G_{xy}(f_k) \quad (4.3)$$

e

$$\tilde{G}_{xx}(f_k) = \Delta f \times G_{xx}(f_k). \quad (4.4)$$

Vale lembrar que os valores de f_k são dados de acordo com a Eq. 2.70, porém como fez-se o uso de janelamento, deve-se substituir N_t por $NFFT$. Para o processamento de sinais é conveniente agrupar os valores de f_k em um vetor (Eq. 4.5).

$$f_k = k/T = k/(NFFT \times \Delta t), \text{ para } k = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (4.5)$$

A representação das Eq. 4.2 e 4.4 é feita pelo diagrama da Fig. 4.8, que retrata o cálculo do espectro de potência em uma Medição de Calibração. Começando o cálculo a partir do sinal do microfone ligado ao canal 0, $x_C(t)$, no domínio do tempo e em unidade de engenharia [Pa], o primeiro passo é dividir tal sinal em janelas utilizando a Eq. 2.90, mostrada na Fig. 4.8 em sintaxe de MATLAB, e $q = 0,5$. Em seguida, multiplica-se os M segmentos de sinais pelo vetor $hanning(NFFT)$ e realiza-se uma transformada rápida de Fourier, obtendo-se $X_{Ch}(f)_i$, que, logo após, tem seus valores absolutos elevados ao quadrado. Neste momento do processamento ocorre um somatório de todas as janelas, restando somente a multiplicação pela constante presente na Eq. 4.2 e pela resolução no domínio da frequência para a determinação do espectro de potência. Um detalhe neste diagrama é o armazenamento dos segmentos de sinais em uma matriz chamada $M1C$ logo após a aplicação de fft 's, esse passo está ligado à correção da resposta de um dos sinais através de funções de transferências e será explicado em detalhes na subseção 4.6. O cálculo do espectro de potência cruzada em uma Medição de Calibração é muito semelhante ao cálculo do espectro de potência, como mostra o diagrama da Fig. 4.9, que representa as Eq. 4.1 e 4.3.

Uma convenção usada neste trabalho, muito presente na representação em diagramas, é o uso de ‘_C’, como no caso de $x_C(t)$, $y_C(t)$, $y_{Ch}(t)$ e $y_{Ch}(t)$, para remeter ao fato de que se trata de uma medição sem correção da fase. Já o uso de ‘_M’, como em $x_M(t)$, $y_M(t)$, $y_{Mh}(t)$ e $y_{Mh}(t)$, é uma referência ao fato de que se trata de uma medição com correção da fase. Não confundir com a variável M , que representa o número de janelas.

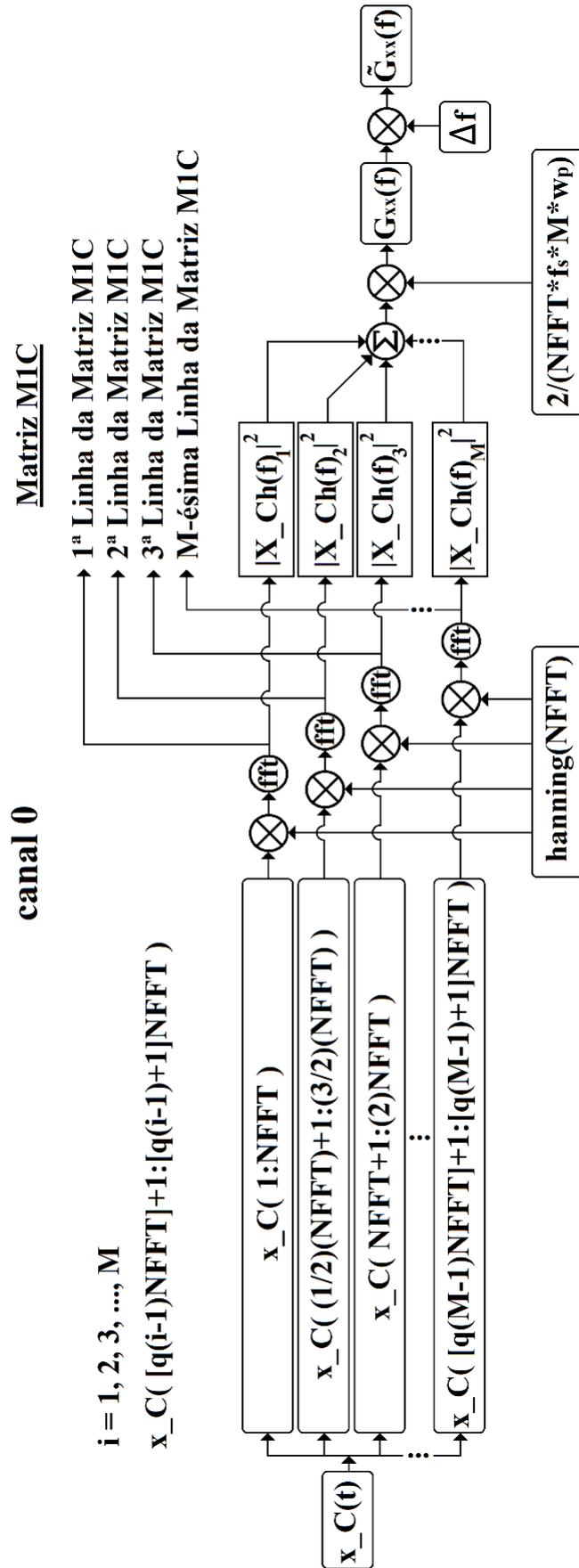


Figura 4.8: Diagrama do cálculo do espectro de potência de um lado. Medição de Calibração.

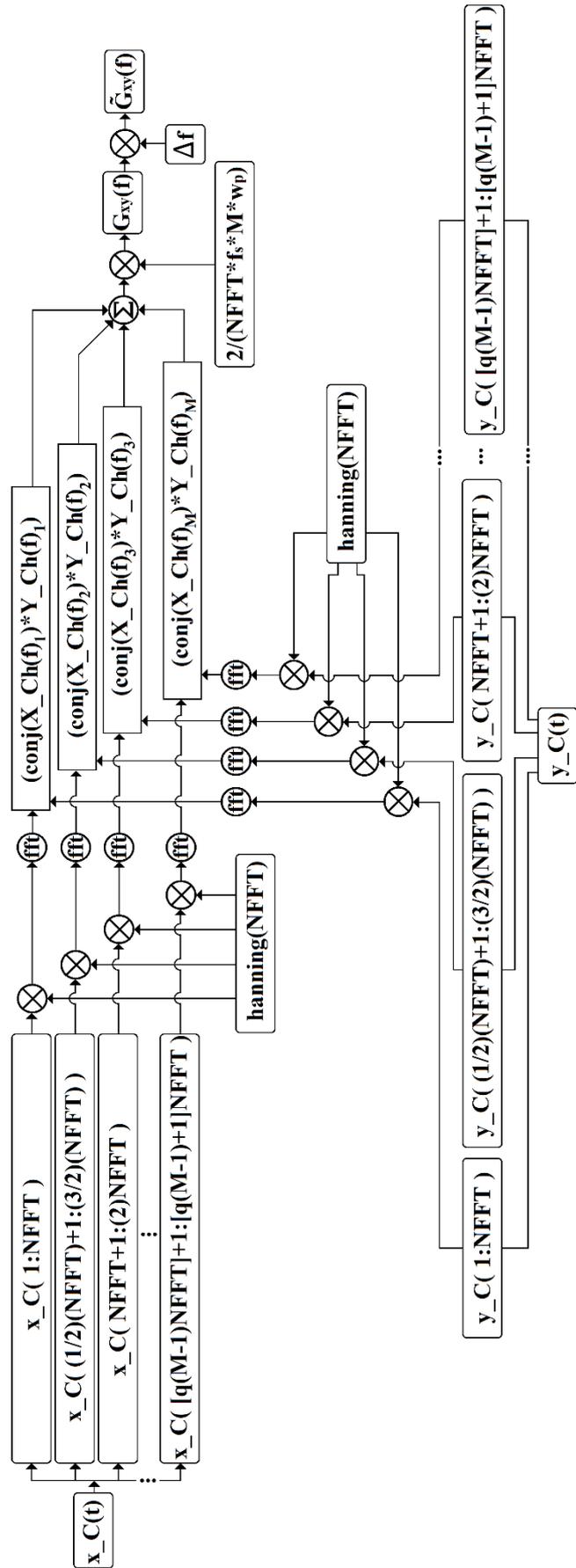


Figura 4.9: Diagrama do cálculo do espectro de potência cruzada de um lado. Calibração.

4.4 Nível de pressão sonora, intensidade sonora e diferença de fase

A partir dos valores de espectro de potência e espectro de potência cruzada determina-se os valores de $NPS_x(f_k)$, $NPS_y(f_k)$, $NPS_{médio}(f_k)$ e $NIS(f_k)$. O espectro de potência representa a contribuição de cada linha espectral para a energia acústica do sinal, sendo assim, os valores do espectro de potência representam a p_{rms}^2 para cada linha espectral. Tendo isso em vista, encontrar o nível de pressão sonora espectral de um sinal é fruto da aplicação da Eq. 2.4, como representa a Eq. 4.6. Na implementação dessa equação deve-se atentar ao fato de que a divisão que ocorre entre parênteses é entre um vetor e uma constante. O cálculo do $NPS_y(f_k)$ é feito de maneira análoga.

$$NPS_x(f_k) = 10\log\left(\tilde{G}_{xx}(f_k)/(4 \times 10^{-10})\right) \quad (4.6)$$

Para calcular o $NPS_{médio}(f_k)$ é necessário determinar, através de uma média aritmética simples (Eq. 4.7) o $\tilde{G}_{médio}(f_k)$. Por se tratarem de vetores, a soma de $\tilde{G}_{xx}(f_k)$ e $\tilde{G}_{yy}(f_k)$ deve ser realizada entre elementos correspondentes.

$$\tilde{G}_{médio}(f_k) = (\tilde{G}_{xx}(f_k) + \tilde{G}_{yy}(f_k))/2 \quad (4.7)$$

O cômputo da intensidade sonora usando o Método p-p é feito através da Eq. 2.115, que, se adaptada com os símbolos que estão sendo usados na presente subseção, se transforma na Eq. 4.8. No MATLAB existe uma função que toma somente a parte imaginária de uma variável, o que facilita a implementação dessa equação. Vale ressaltar que, como $\tilde{G}_{xy}(f_k)$ e f_k são vetores, a divisão deve ser feita elemento por elemento, sendo que no MATLAB a sintaxe para esse tipo de operação é um ponto antes do sinal de divisão: ./.

$$I_n(\omega) = \left(\frac{1}{\rho_0(2\pi f_k)d}\right) Im\{\tilde{G}_{xy}(f_k)\} \quad (4.8)$$

A determinação da intensidade sonora por meio do Método Analítico é feita utilizando a Eq. 2.63. Como a relação entre a amplitude A de um sinal de pressão sonora e o valor p_{rms} é dada pela Eq. 4.9, a Eq. 2.63 se transforma na Eq. 4.10.

$$A = \sqrt{2} \times p_{rms} \quad (4.9)$$

$$I_n = (p_{rms}^2 / \rho_0 c) \quad (4.10)$$

Lembrando-se da relação entre o espectro de potência e p_{rms}^2 , chega-se na Eq. 4.11.

$$I_n(f_k) = (\tilde{G}_{médio}(f_k) / \rho_0 c) \quad (4.11)$$

A diferença entre as fases dos dois microfones pode ser obtida através dos dados do espectro de potência cruzada, como explicado na subseção 2.5.4. Essa quantidade é muito importante no experimento da subseção 3.1, sendo calculada nas Medições de Calibração e Corrigida para comparação entre os resultados antes e depois da aplicação de correção. A determinação do *phase-mismatch* é feita através do uso da função *angle* do MATLAB, que pode ser expressada pela Eq. 4.12 e retorna valores de fase em radianos no intervalo $[-\pi, \pi]$.

$$angle(\tilde{G}_{xy}(f_k)) = atan2\left(imag\left(\tilde{G}_{xy}(f_k)\right), real\left(\tilde{G}_{xy}(f_k)\right)\right) \quad (4.12)$$

4.5 Coeficiente de pressão-intensidade residual

O coeficiente de pressão-intensidade residual (CPIR) é calculado usando os valores de NPS e NIS, porém é preciso que estas variáveis sejam passadas para bandas de um terço de oitava. O processo de cálculo do nível de pressão sonora em bandas de um terço de oitava é representado pelo diagrama da Fig. 4.10. Nessa figura usa-se de exemplo a banda de um terço de oitava de 50 [Hz], que possui os limites inferior e superior de 44,1942 e 55,6812 [Hz], respectivamente.

Esse diagrama retrata o processo em que se percorre todos os elementos do vetor de espectro de potência e se inclui no somatório somente aqueles referentes a frequências dentro do intervalo da banda em questão. Todo o processo de passagem de valores na resolução da frequência para bandas de um terço de oitava é implementado no *script* com auxílio de um ‘*nested for*’ e um ‘*if*’. O resultado desse somatório dentro de cada banda gera um valor que deve ser inserido na Eq. 2.4, como mostrado na Fig. 4.10.

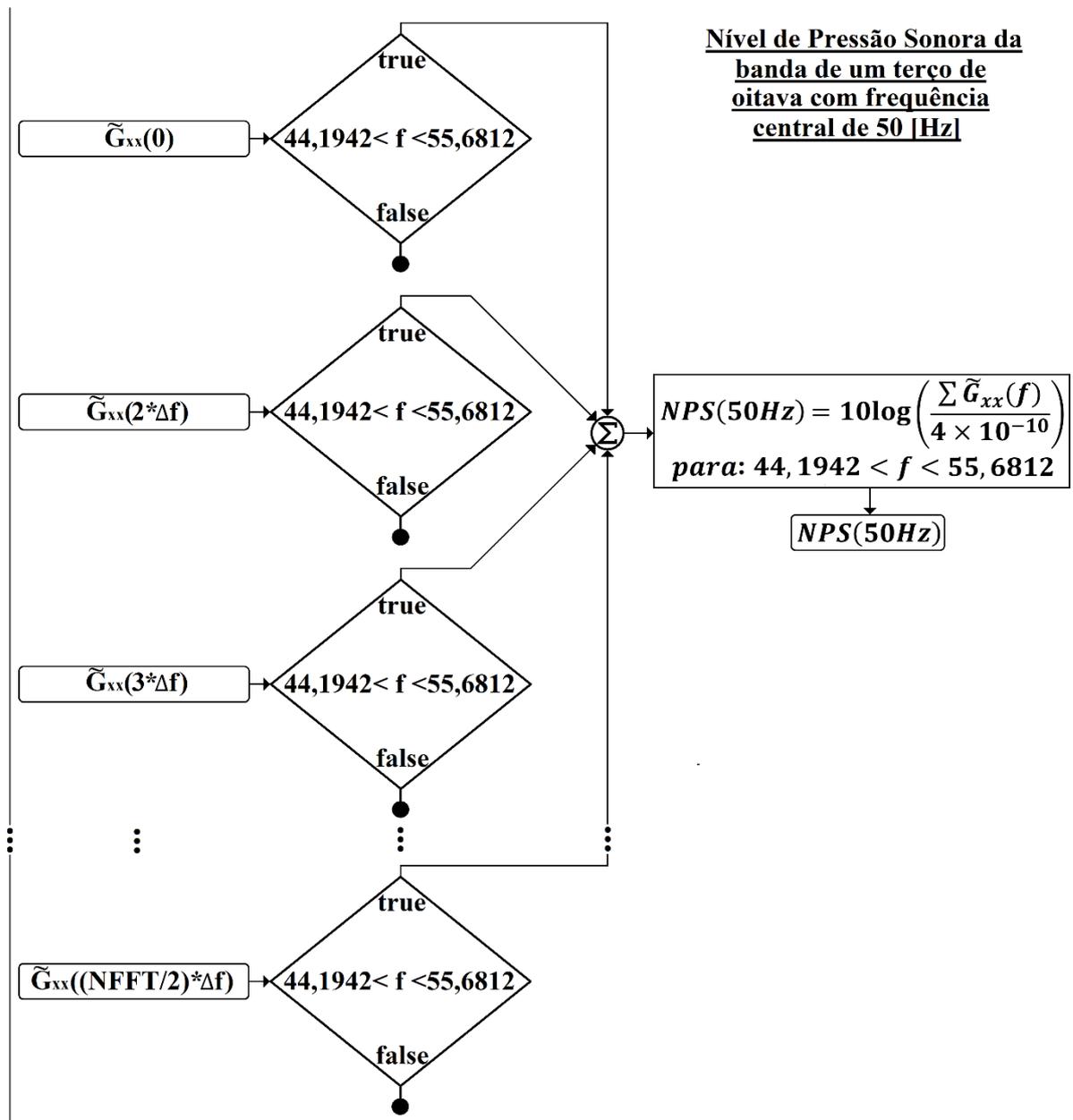


Figura 4.10: Cálculo do nível de pressão sonora da banda de um terço de oitava de 50 [Hz] representado por um diagrama.

O processo que passa o nível de intensidade sonora para bandas de um terço de oitava é muito semelhante ao usado para o nível de pressão sonora, porém, usa-se o espectro de potência cruzada (\tilde{G}_{xy}) ao invés dos espectros de potência (\tilde{G}_{xx} , \tilde{G}_{yy}) e a formulação, obviamente, também muda. Com o NIS e o NPS calculados em bandas de um terço de oitava, a determinação do coeficiente de pressão-intensidade residual é feita utilizando a Eq. 2.116.

4.6 Correção a partir da função de transferência

Em ambos os experimentos apresentados nas Subseções 3.1 e 3.2, existe uma Medição de Calibração, na qual as variáveis responsáveis por reter as funções de transferência são criadas, seguida por uma medição em que tais variáveis são utilizadas na aplicação de uma correção nos sinais captados. As figuras da subseção 4.2 representam essa dinâmica muito bem, pois nos fluxogramas que representam as Medições de Calibração, Fig. 4.4 e 4.6, o símbolo $H_{xy}(f)$, que representa as variáveis de função de transferência, é tido como uma saída do processamento, enquanto que nos fluxogramas da Fig. 4.5 (Medição Corrigida) e da Fig. 4.7 (Medição de Intensidades) $H_{xy}(f)$ é uma das entradas, junto com os sinais dos microfones, $x(t)$ e $y(t)$.

Na Fig. 4.8, que representa o cálculo do espectro de potência do sinal $x(t)$ em uma Medição de Calibração, é mostrada a montagem de uma matriz chamada $M1C$. No caso do sinal $y(t)$ é gerada a matriz $M2C$, de maneira análoga. Ambas fazem parte da construção de uma terceira matriz chamada HXY , que armazena segmentos de função de transferência a serem utilizados na correção da fase na Medição Corrigida e na Medição de Intensidades. O processo como um todo pode ser explicado da seguinte forma:

- 1 Como mostrado pela Fig. 4.8 de maneira detalhada, durante o cálculo do *power spectrum* do sinal $x(t)$, depois do sinal ter sido dividido em janelas e cada segmento ser multiplicado por um vetor *hanning*($NFFT$), realiza-se uma transformada rápida de Fourier em cada um desses segmentos e o resultado do processamento do sinal até este momento é armazenado em uma matriz chamada $M1C$. Essa matriz é organizada de maneira que sua primeira linha archive a primeira janela do sinal $x(t)$ no domínio da frequência $\rightarrow X_{Ch}(f)_1$, que a segunda linha archive a segunda janela $\rightarrow X_{Ch}(f)_2$ e assim por diante. Dessa forma, $M1C$ tem M linhas (número de janelas) e $NFFT$ colunas

(número de elementos de cada janela). Na representação mostrada abaixo (Eq. 4.13) os valores subscritos nos vetores $x(t)$ representam a numeração das janelas, $i = 1, 2, 3, \dots, M$, divididas seguindo a Eq. 2.90.

$$M1C = \begin{bmatrix} (fft(x_1(t) \times hanning(NFFT))) \\ (fft(x_2(t) \times hanning(NFFT))) \\ \vdots \\ (fft(x_M(t) \times hanning(NFFT))) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_Ch(f)_1 \\ X_Ch(f)_2 \\ \vdots \\ X_Ch(f)_M \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

- 2 A matriz $M2C$ é montada de maneira semelhante ao método mostrado no passo 1, porém o processamento é aplicado ao sinal do microfone ligado ao canal 1, como mostra a Eq. 4.14.

$$M2C = \begin{bmatrix} (fft(y_1(t) \times hanning(NFFT))) \\ (fft(y_2(t) \times hanning(NFFT))) \\ \vdots \\ (fft(y_M(t) \times hanning(NFFT))) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_Ch(f)_1 \\ Y_Ch(f)_2 \\ \vdots \\ Y_Ch(f)_M \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

- 3 A matriz HXY é criada a partir das matrizes $M1C$ e $M2C$, como é representado pela Eq. 4.15. Na equação abaixo foi usada a sintaxe de MATLAB, em que a linha i de uma matriz A é representada por $A(i, :)$ e a j -ésima coluna é representada por $A(:, j)$.

$$HXY = \begin{bmatrix} Y_Ch(f)_1./X_Ch(f)_1 \\ Y_Ch(f)_2./X_Ch(f)_2 \\ \vdots \\ Y_Ch(f)_M./X_Ch(f)_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M2C(1,:)./M1C(1,:) \\ M2C(2,:)./M1C(2,:) \\ \vdots \\ M2C(M,:)./M1C(M,:) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

- 4 Nas medições nas quais se aplica correção, Medição Corrigida e Medição de Intensidades, no mesmo ponto do processamento em que a matriz HXY foi criada na Medição de Calibração - após a realização das transformadas rápidas de Fourier - o sinal do microfone ligado ao canal 1 ($y_M(t)$) é corrigido. A matriz HXY passa a ser um dado de entrada nessas medições posteriores à Medição de Calibração. A Fig. 4.11 mostra através de um diagrama o uso dessa matriz.

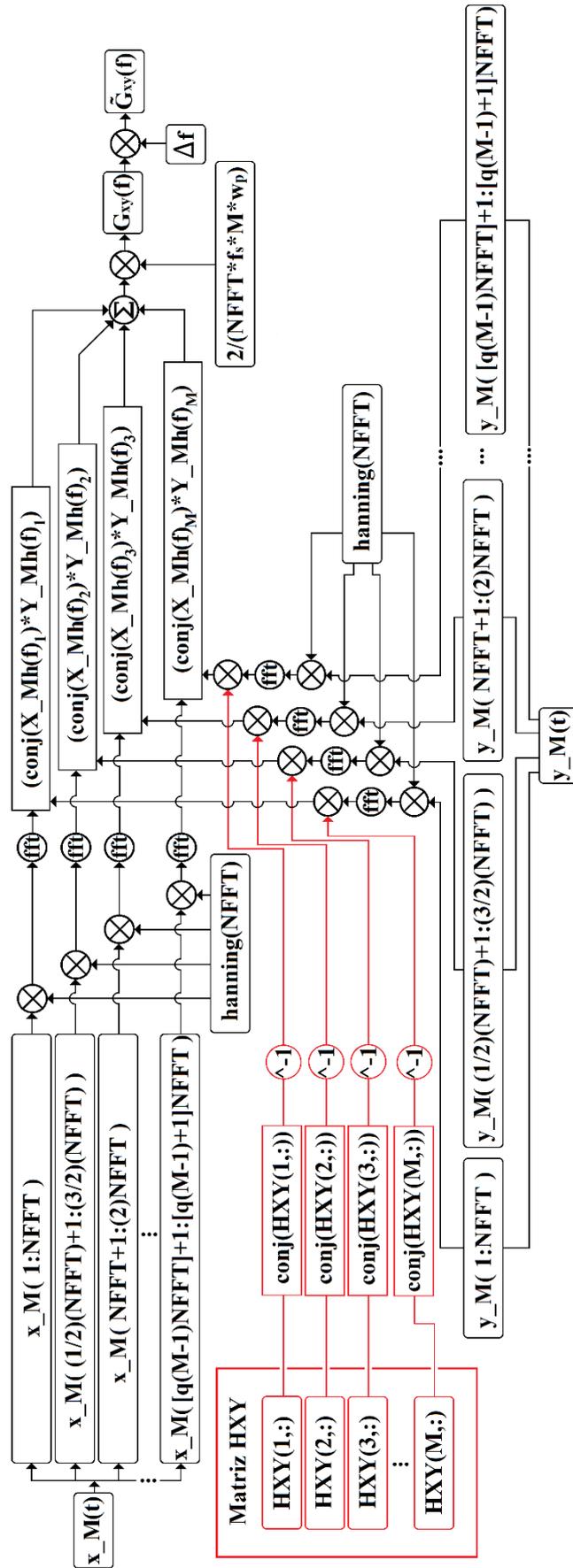


Figura 4.11 Diagrama do cálculo do espectro de potência cruzada com correção de fase.

Além da correção da diferença de fase entre os microfones, existe a correção da diferença de magnitude. Essa segunda é dispensável no caso em que se conheça a sensibilidade dos dois microfones de maneira precisa, o que é comum no uso de microfones de medição de alta qualidade, principalmente quando se tem à disposição calibradores comerciais. Porém, sob o intuito de abranger o maior número de casos possíveis, essa correção também foi implementada e testada. Levando em consideração a subseção 2.4.2.4, na qual apresentou-se a função de transferência através da Eq. 2.94, considera-se o espectro de potência \tilde{G}_{xx} como um sinal de entrada e \tilde{G}_{yy} como sinal de saída, para que a razão entre os dois dê origem à função de transferência H_{XY} :

$$H_{XY}(f_k) = \frac{\tilde{G}_{yy}(f_k)}{\tilde{G}_{xx}(f_k)}. \quad (4.16)$$

Dessa maneira, em uma medição posterior, o valor $\tilde{G}_{yy}(f_k)$ pode ser corrigido através da sua divisão por $H_{XY}(f_k)$. A correção da magnitude é mais direta se comparada com a correção da fase, pois não precisa ser feita janela a janela.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados do experimento para correção da diferença entre as fases dos microfones

Ao realizar o experimento apresentado na subseção 3.1, utilizando o processamento de sinais exposto no capítulo 4, foram obtidos resultados pertinentes com os teoricamente esperados. Neste experimento os dados de entrada para a aquisição dos sinais foram: $NFFT = 65536$, tempo de medição de 8 [seg], taxa amostral de 51.200 [amostras/seg] (maior taxa de aquisição que a placa usada permite) e fator de *overlapping* de 0,5. Com esses valores foram geradas onze janelas por sinal e é garantida uma resolução no domínio da frequência de 0.7813 [Hz], assegurando 15 linhas espectrais na banda de 50 [Hz] (menor banda de interesse), o que está acima do mínimo de 10 linhas que preconiza Frank Fahy (1995). Todos esses valores de entrada supracitados foram usados em todas as medições cujos resultados são aqui apresentados.

5.1.1 Dupla 1: Mic 1 e Mic 2

Para essa dupla fez-se vinte Medições K, divididas em dois grupos de dez e realizadas em dois dias diferentes: dia 1 e dia 2. O objetivo de se realizar esse número alto de ensaios é garantir a repetibilidade dos resultados obtidos experimentalmente. O Mic 1 foi ligado ao canal 0 da placa de aquisição de sinais acústicos e o Mic 2 ao canal 1.

Para facilitar a apresentação dos resultados são exibidos os gráficos de apenas uma Medição K específica e duas tabelas, uma de cada dia, que resumem os resultados de todas as demais medições. No Apêndice A são mostrados todos os gráficos de cada uma das vinte medições.

Um primeiro resultado que deve ser analisado diz respeito aos níveis de pressão sonora medidos nos dois canais em Medições de Calibração. A Fig. 5.1 mostra em azul os valores de NPS medidos no canal 0 e de vermelho os medidos pelo canal 1 em uma das medições. Salienta-se que todos os vinte resultados experimentais foram muito similares nas Medições de Calibração.

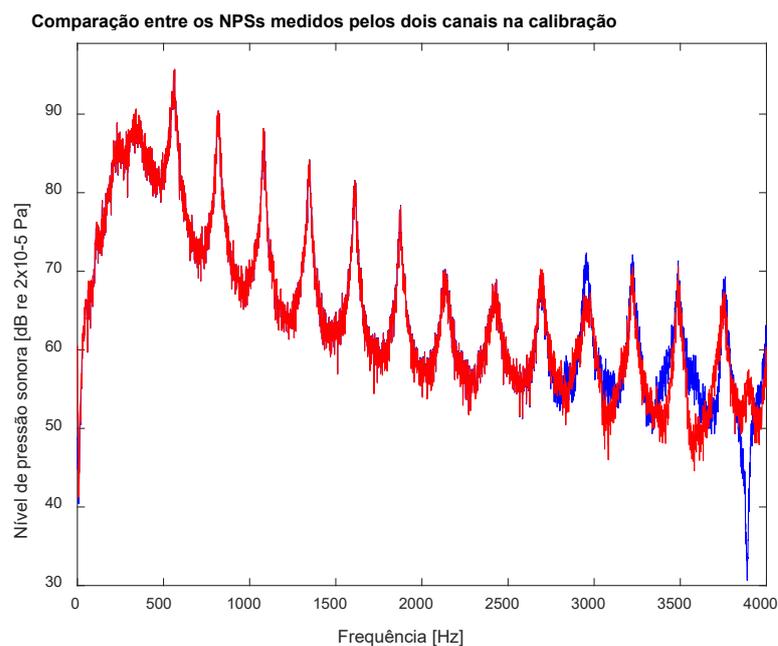


Figura 5.1: Valores do NPS: canal 0 (Mic 1) em azul e canal 1 (Mic 2) em vermelho. Dupla 1.

Utilizando a Eq. 2.31, sabendo-se que o diâmetro interno do tubo tem 72 [mm] e considerando que a velocidade do som é aproximadamente 340 [m/s], obtém-se um valor em torno de 2765 [Hz] para a frequência de corte do tubo. Esse valor teórico é confirmado pelos resultados obtidos experimentalmente, como mostra a Fig. 5.2, que é um zoom na região da frequência de corte. Nota-se que as respostas dos sinais medidos pelos dois microfones são praticamente superpostas até a frequência de corte calculada, na qual começam a divergir.

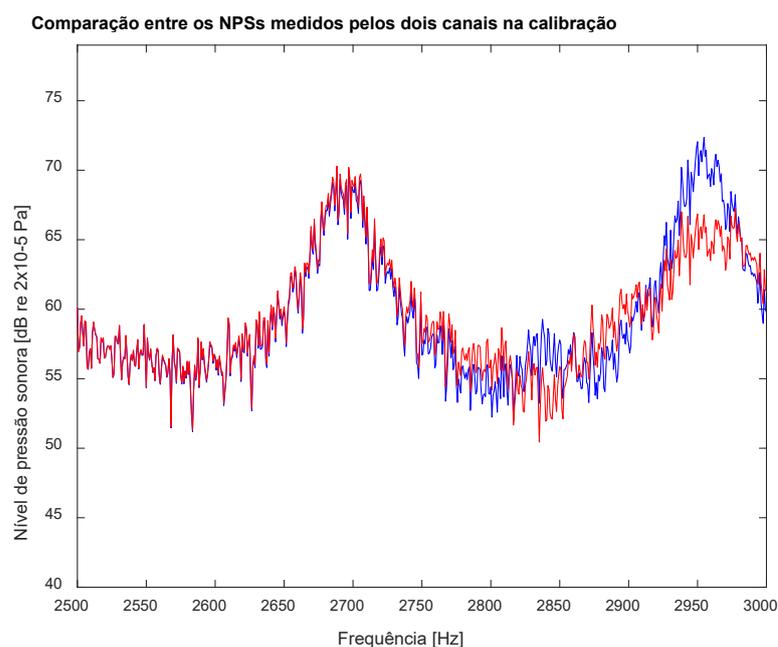


Figura 5.2: Mesmo gráfico da Fig. 5.1 com zoom na região da frequência de corte.

O fato dos dois microfones darem praticamente a mesma resposta para a mesma excitação sonora atesta a qualidade dos mesmos, além de evidenciar que as sensibilidades atribuídas a eles estão corretas e que de fato tratam-se, dentro da faixa de frequência estudada, de constantes de amplificação dos sinais. A premissa de que a planta de calibração submete os dois microfones à mesma excitação sonora também fica comprovada com estes resultados, desde que considerada a faixa abaixo da frequência de corte.

O outro parâmetro envolvendo as respostas dos microfones que deve ser analisado é a fase entre os mesmos. A Fig 5.3 mostra a diferença de fase analisada a partir dos dados da densidade espectral de potência cruzada de uma das Medições de Calibração. O gráfico tem no eixo das abcissas a frequência começando a partir de 44 [Hz], pois esse é o limite inferior da banda de um terço de oitava centrada em 50 [Hz]. Na Fig. 5.3 percebe-se que a diferença de fase aumenta, em módulo, de maneira aproximadamente linear até a frequência de corte, a partir da qual a diferença começa a se tornar maior e aleatória.

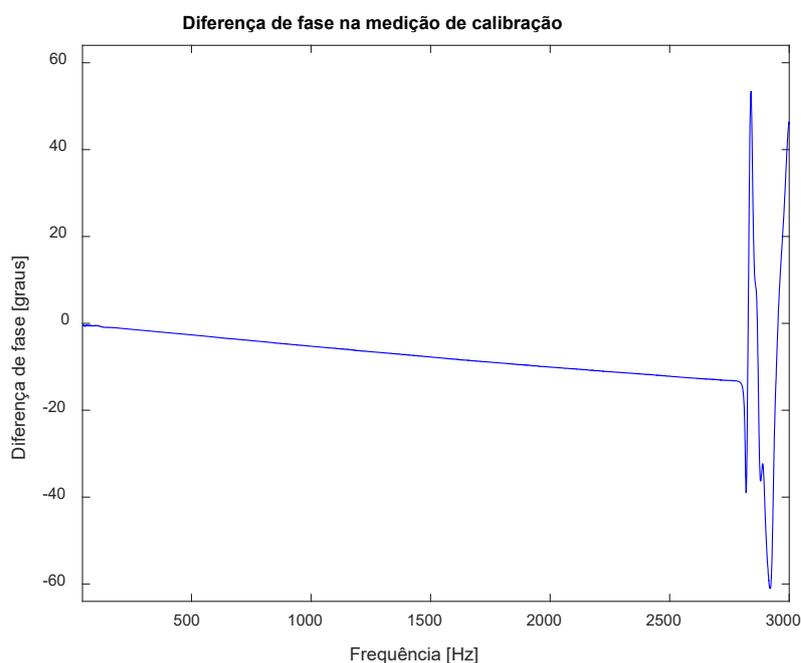


Figura 5.3: Diferença de fase analisada a partir dos dados da densidade espectral de potência cruzada na Medição de Calibração. Dupla 1.

A Fig. 5.4 é um zoom na região que contém as quatro primeiras bandas de um terço de oitava, 50, 63, 80 e 100 [Hz], começando de 44 [Hz] e chegando a 112 [Hz] no eixo das abcissas. Nessa região verifica-se que a diferença chega a ser quase 1 [grau], o que é preocupante tendo em vista que um valor dessa magnitude é alto para a diferença de fase que se deseja medir em

frequências tão baixas. Para se ter uma referência quantitativa da gravidade, supondo uma medição com uma distância entre microfones de 50 [mm], a diferença de fase que teoricamente deve ser medida em um campo sonoro de ondas planas para 50 [Hz] é de apenas 2,624 [graus]. Os comportamentos da diferença de fase mostrados nas Fig. 5.3 e Fig. 5.4 foram muito semelhantes em todas as vinte medições.

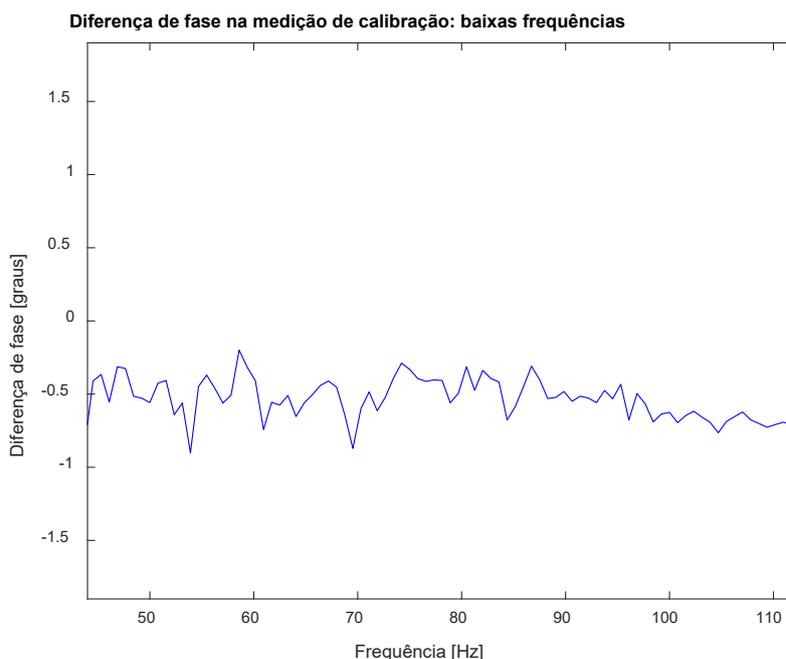


Figura 5.4: Mesmo gráfico da Fig. 5.3, porém com foco nas cinco primeiras bandas de um terço de oitava.

A outra maneira de analisar a diferença de fase é através dos coeficientes de pressão-intensidade residual (CPIR) em bandas de um terço de oitava. A Fig. 5.5 mostra os valores encontrados em uma das Medições de Calibração lado a lado com os sugeridos pela IEC 1043 para instrumentos classe 2, deixando claro que em nenhuma das bandas de um terço de oitava atingiu-se o mínimo estabelecido pela norma. Para essa dupla de microfones encontrou-se esse mesmo padrão em todas as Medições de Calibração: os valores de nenhuma das bandas atingem os valores da norma para a classe 2. Conclui-se que, sem nenhum tipo de correção do *phase-mismatch*, é inviável realizar uma medição de intensidade sonora com precisão de norma para essa dupla de microfones. Como a distância usada para separar os microfones foi de 28 [mm], os valores da Tab. 2.1 foram corrigidos por um fator de $+10\log(28/25) = 0,49218$.

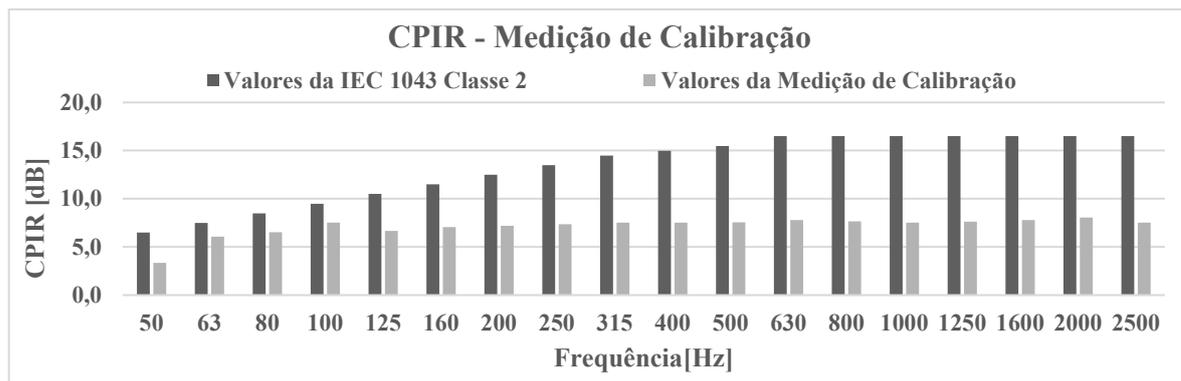


Figura 5.5: Gráfico comparativo entre os valores dos CIPR's da Medição de Calibração com os preconizados pela norma IEC 1043 para instrumentos classe 2. Dupla 1.

Em cada uma das vinte Medições K, após a Medição de Calibração, fez-se uma Medição Corrigida, na qual correções foram aplicadas na resposta do microfone ligado ao canal 1. A Fig. 5.6 mostra em azul os valores de NPS medidos no canal 0 e de vermelho os medidos pelo canal 1. Por conta da correção aplicada, os valores ficam ainda mais próximos do que nas Medições de Calibração, deixando o sinal azul fica completamente encoberto.

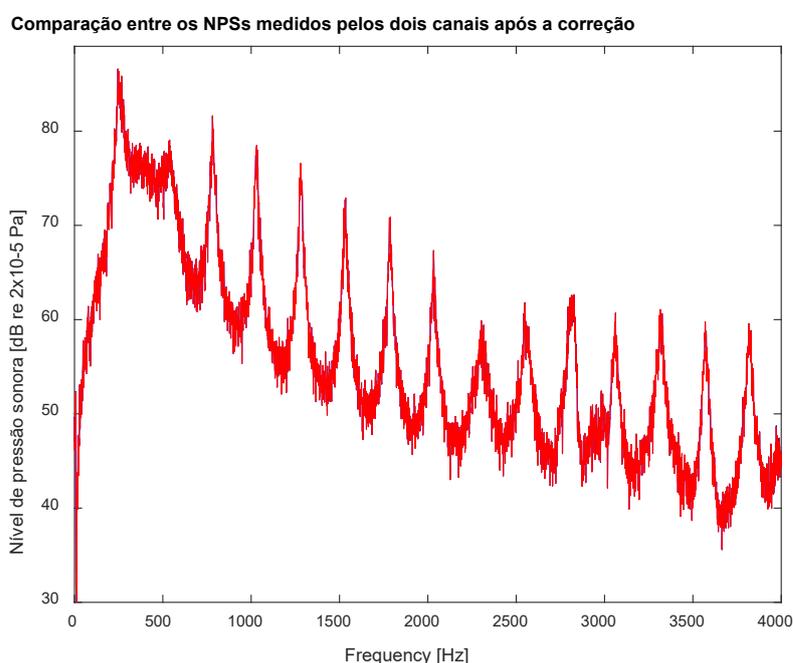


Figura 5.6: Comparação entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais na Medição Corrigida. Dupla 1.

Um cálculo realizado nos resultados das vinte Medições K, antes (Medição de Calibração) e depois da correção (Medição Corrigida), em que determinou-se a diferença média absoluta em [dB] entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais, gerou as Tab. 5.1 e 5.2. Nota-se que a correção da magnitude dos sinais medidos foi efetiva.

Tabela 5.1: Diferença média absoluta em [dB] entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais, antes e depois da correção. Dia 1, dupla 1.

Medição	Diferença Média [dB]	
	Calibração	Valores Corrigidos
1	0,281290	-0,001729
2	0,261670	0,001457
3	0,258325	-0,000451
4	0,260497	-0,000912
5	0,256400	0,001237
6	0,260445	-0,002063
7	0,256784	0,000102
8	0,254590	0,001438
9	0,254656	0,002830
10	0,253372	-0,000172

Tabela 5.2: A diferença média absoluta em [dB] entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais, antes e depois da correção. Dia 2, dupla 1.

Medição	Diferença Média [dB]	
	Calibração	Valores Corrigidos
1	-0,013365	-0,001175
2	-0,017798	-0,001432
3	-0,018546	0,000391
4	-0,020473	0,000369
5	-0,021349	0,000730
6	-0,021839	-0,005079
7	-0,029188	0,004166
8	-0,025681	-0,001423
9	-0,026856	-0,001827
10	-0,026108	-0,003386

As diferenças entre os níveis de pressão sonora dos dois microfones variou um pouco do grupo de Medições de Calibração feito no dia 1 para o grupo do dia 2, isso provavelmente se deve às pequenas mudanças no posicionamento relativo dos microfones. Independente disso, percebe-se que a correção foi efetiva nos dois grupos.

É preciso ressaltar que depois da correção, mesmo acima da frequência de corte, os sinais apresentaram valores muito próximos uns dos outros, mas isso não quer dizer que houve uma correção adequada acima de tal frequência.

Nas Medições Corrigidas, por conta das correções aplicadas, espera-se que ocorra uma diminuição da diferença entre as fases dos sinais. A Fig. 5.7 mostra a comparação entre a diferença de fase antes (azul) e depois (vermelho) da correção, em uma das Medições K. Nota-

se que a correção efetuada diminuiu o *phase-mismatch* entre os sinais, que passou a ter comportamento linear aproximadamente constante em torno do 0 [grau]. O resultado mostrado na Fig. 5.7 foi padrão em todas as vinte Medições K.

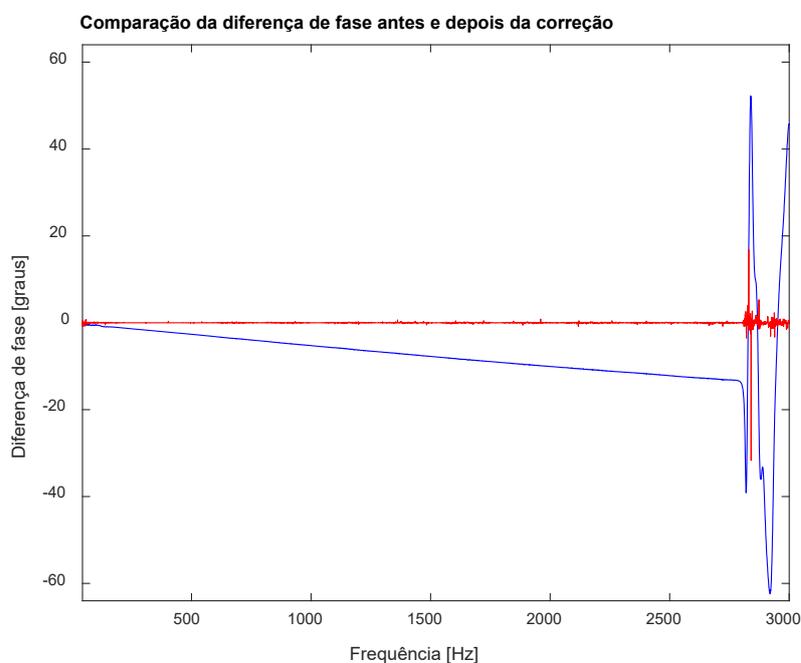


Figura 5.7: Comparação do *phase-mismatch* nas Medições de Calibração e Corrigida, ou seja, antes e depois da correção. Dupla 1.

A Fig. 5.8 é um zoom na região que contém as quatro primeiras bandas de um terço de oitava. Percebe-se que houve uma diminuição na diferença de fase, que antes girava em torno de 0,5 [grau] com alguns picos ocasionais e passa a girar em torno de 0 [grau], também com alguns picos. Alguns valores de *phase-mismatch* da Medição Corrigida chegam a ultrapassar os valores da Medição de Calibração, porém isso ocorre raramente e, de maneira geral, é notória a diminuição da diferença de fase. O gráfico da Fig. 5.8 serve de modelo para as outras vinte Medições K. No entanto, apesar da manutenção do padrão, é possível notar uma maior instabilidade dos resultados corrigidos no segundo dia de medição com essa dupla de microfones, ainda que a diferença tenha sido pequena. Atribui-se essa pequena mudança de um dia para o outro à pequenas diferenças nos posicionamentos dos microfones na montagem do experimento.

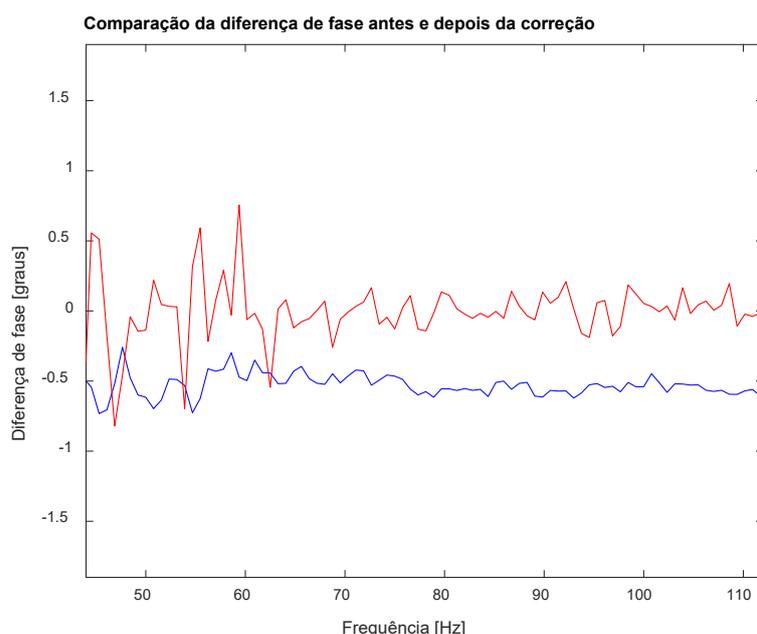


Figura 5.8: Mesmo gráfico da Fig. 5.7, com foco na faixa que contém as quatro primeiras bandas de um terço de oitava de interesse.

Apesar da análise do *phase-mismatch* realizada através dos dados da densidade de espectro de potência cruzada ter indicado que houve melhorias após a correção, fica a dúvida se elas foram o suficiente, principalmente nas baixas frequências, onde os erros causados pela diferença de fase são mais preocupantes. Os valores preconizados pela norma IEC 1043 servem como referência para tirar essa dúvida. A Fig. 5.9 apresenta os valores dos coeficientes de pressão-intensidade residual encontrados em uma das Medições Corrigidas ao lado dos recomendados pela IEC 1043 para instrumentos classe 2 e classe 1. Para essa medição em questão, os resultados foram excelentes, já que após a correção todas as bandas passaram a ter valores acima dos sugeridos para instrumentos classe 2 e classe 1, com a exceção da banda de 50 [Hz] que seria “reprovada”, por pouco, para a classe mais precisa.

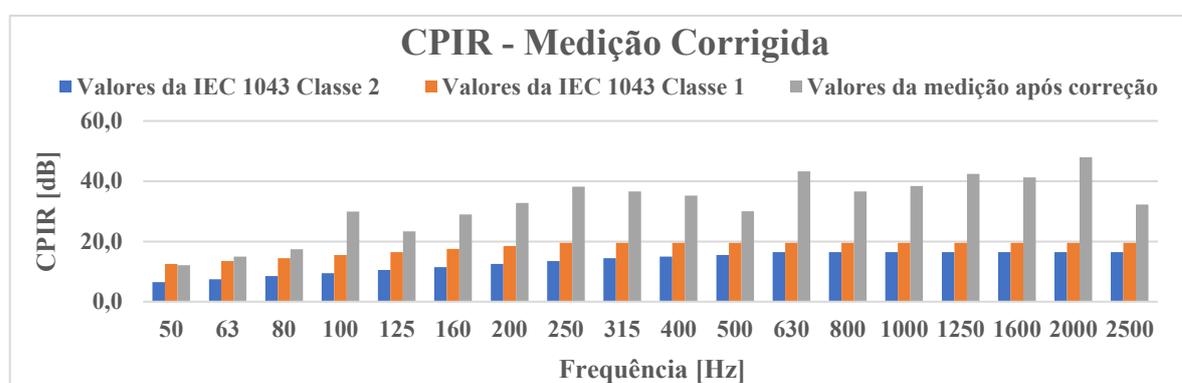


Figura 5.9: Comparação entre os valores de CPIR da Medição Corrigida com os preconizados pela norma IEC 1043 para instrumentos classe 1 e 2. Dupla 1.

Uma visão mais geral e sistematizada da efetividade da correção, feita a partir da comparação com os coeficientes preconizados na norma IEC 1043, é obtida através da observação das Tab. 5.3 e 5.4, que sumarizam os resultados obtidos nas Medições Corrigidas realizadas nos dia 1 e dia 2, respectivamente. Nessas tabelas colocou-se um sinal de ‘✓’ nas bandas em que a norma é atendida e um sinal de ‘x’ junto com um preenchimento da célula caso contrário. Nessas tabelas fica evidente a validade da correção aplicada, pois nas vinte medições todas as bandas atingiram valores acima dos sugeridos pela norma para instrumentos de classe 2, sendo que antes da correção em nenhuma das bandas se conseguia tal feito. Comparando os resultados corrigidos com os valores da norma para classe 1, também se constata o êxito da correção, pois em geral poucas bandas foram “reprovadas”, sendo sempre bandas de baixa frequência.

5.1.2 Dupla 2: Mic 2 e Mic 3

Para essa dupla foram realizadas dez Medições K, todas no mesmo dia, pois a repetibilidade do experimento já foi testada com a dupla anterior. O Mic 3 foi ligado ao canal 0 da placa de aquisição NI 9234 e o Mic 2 ao canal 1.

As medições para essa dupla de microfones seguiram a mesma estrutura das medições descritas para a dupla anterior. Assim como feito na subseção anterior, a fim de facilitar a apresentação dos resultados, são apresentados os gráficos de uma Medição K e uma tabela que resume os resultados de todas as Medições Corrigidas. No Apêndice A são mostrados todos os gráficos de cada uma das dez medições de maneira detalhada.

A análise para essa dupla também começa pela comparação dos níveis de pressão sonora medidos nos dois canais em uma Medição de Calibração. A Fig. 5.10 mostra em azul os valores de NPS medidos no canal 0 e de vermelho os medidos pelo canal 1 em uma das dez medições, sendo que esse resultado foi semelhante em todas as outras medições. A frequência de corte do tubo, 2765 [Hz], voltou a ser evidenciada nas dez medições dessa dupla de microfones, como exemplifica a Fig. 5.11, que é um zoom na região da frequência de corte, onde se vê um comportamento dos sinais semelhante ao da Fig. 5.2. As mesmas conclusões tiradas da comparação entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois microfones da dupla anterior se aplicam a essa dupla de microfones da BSWA: i) os microfones possuem alta qualidade; ii) as sensibilidades atribuídas aos mesmos estão corretas e de fato tratam-se de constantes de amplificação dos sinais; iii) a planta de calibração submete os dois microfones à mesma excitação sonora até a frequência de corte do tubo.

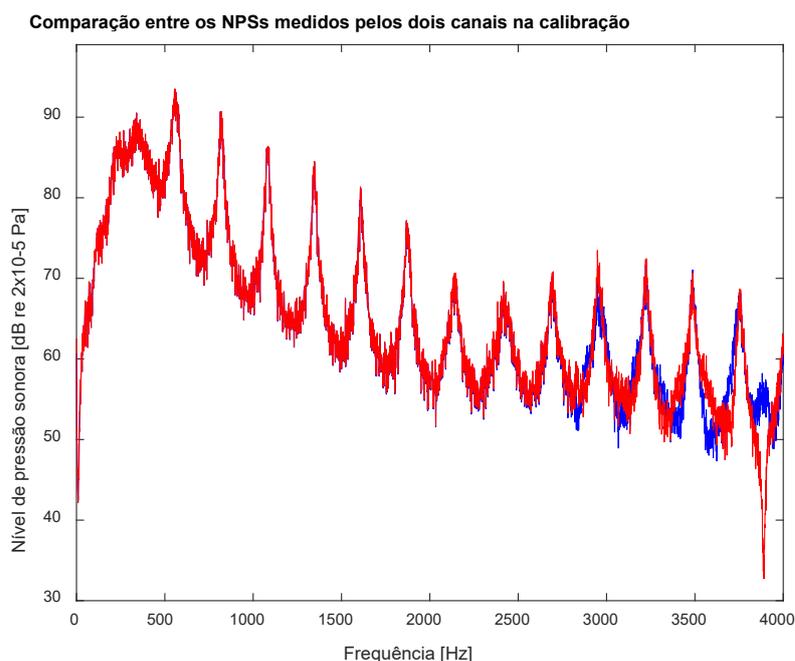


Figura 5.10: Valores do nível de pressão sonora medidos pelos dois canais de aquisição: canal 0 (Mic 3) em azul e canal 1 (Mic 2) em vermelho. Dupla 2.

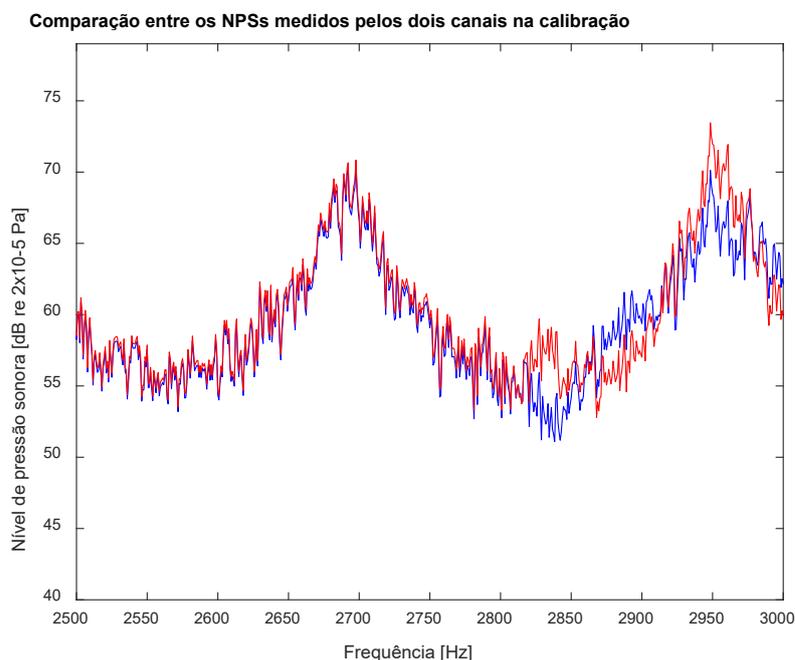


Figura 5.11: Mesmo gráfico da Fig. 5.10 com zoom na região da frequência de corte.

A Fig. 5.12 mostra a diferença de fase entre os canais de aquisição a partir dos dados da densidade espectral de potência cruzada de uma das Medições de Calibração. O gráfico tem o eixo das abcissas começando a partir de 44 [Hz]. Percebe-se que a diferença de fase aumenta, em módulo, de maneira aproximadamente linear até a frequência de corte, assim como ocorreu

com a dupla de microfones anterior, porém para a presente dupla esse aumento é muito menor, mantendo a diferença bem perto de 0 [grau].

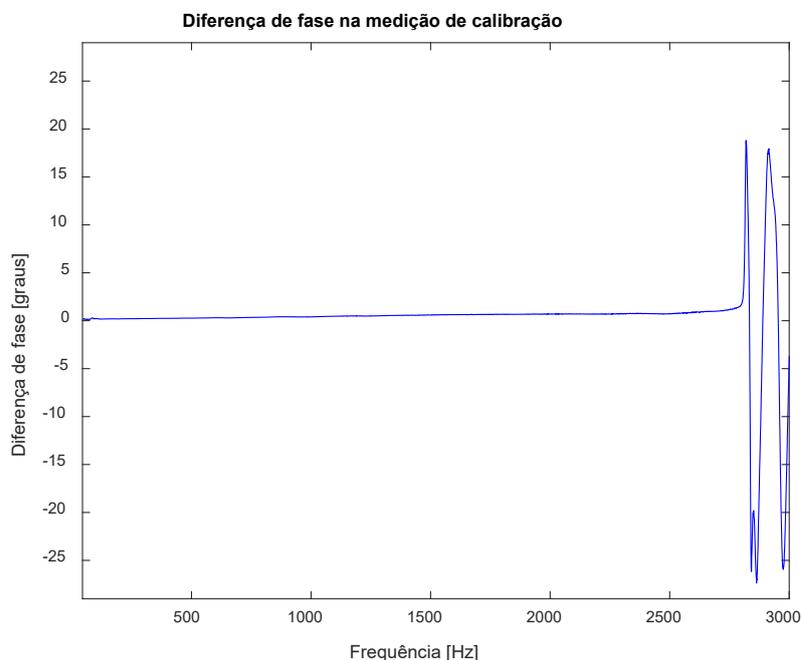


Figura 5.12: Diferença de fase analisada a partir dos dados da densidade espectral de potência cruzada na Medição de Calibração. Dupla 2.

A Fig. 5.13 é um zoom na região que contém as quatro primeiras bandas de um terço de oitava, na qual verifica-se que a diferença se mantém abaixo de 0,3 [graus], girando em torno de 0,2. Se comparado com os resultados da dupla anterior, conclui-se que a diferença de fase nas Medições de Calibração é bem menor, muito provavelmente devido ao fato dos dois microfones serem do mesmo modelo e fabricados pela mesma empresa. O comportamento da diferença de fase mostrado na Fig. 5.12 e a magnitude da diferença de fase mostrada pela Fig. 5.13 foi muito semelhante em todas as dez medições.

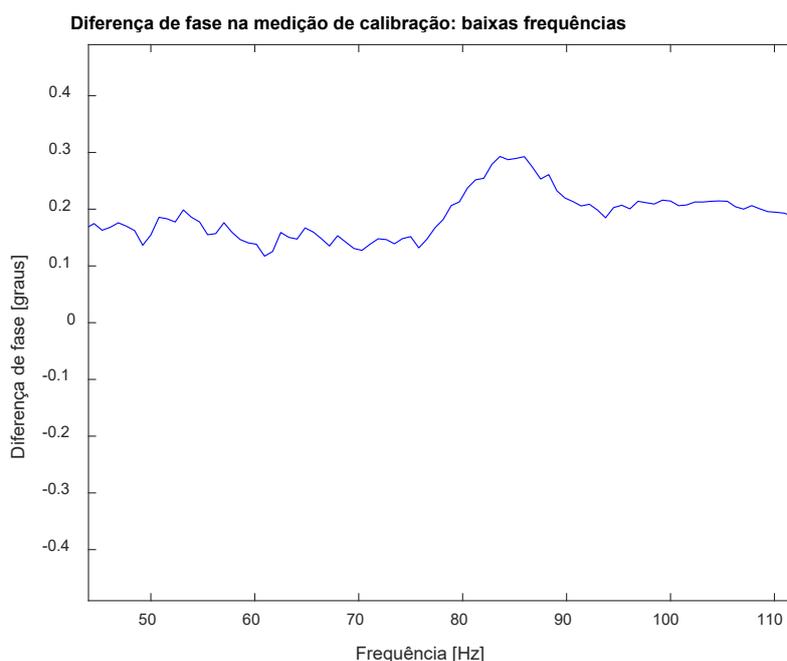


Figura 5.13: Mesmo gráfico da Fig. 5.12, porém com foco nas quatro primeiras bandas de um terço de oitava.

A Fig. 5.14 apresenta os valores dos coeficientes de pressão-intensidade residual encontrados em uma das Medições de Calibração lado a lado com os sugeridos pela IEC 1043 para instrumentos classe 2 e classe 1. Esse gráfico representa muito bem o padrão que se repetiu em todas as dez Medições de Calibração dessa dupla de microfones, em resumo:

- Os valores do coeficiente de pressão-intensidade residual de todas as bandas de um terço de oitava satisfazem a norma para classe 2;
- Comparando com os valores para classe 1: os resultados das bandas até 1250 [Hz] não foram suficientes em nenhuma das medições e a partir da banda de 1600 [Hz] os valores dos CPIR eventualmente ultrapassam os da IEC 1043.

Fica evidente que para essa dupla de microfones se consegue realizar medições de intensidade sonora com precisão de norma sem aplicar qualquer correção, já que os valores encontrados de CPIR atendem os requisitos para instrumentos classe 2.

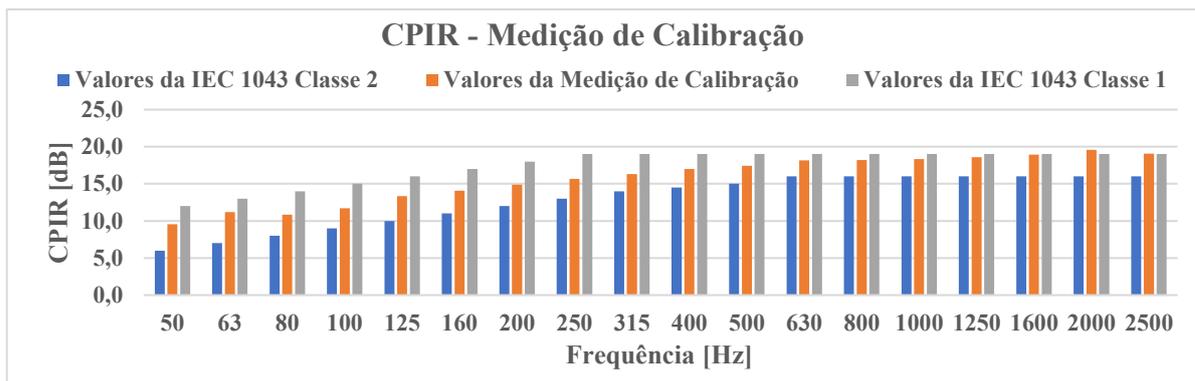


Figura 5.14: Gráfico comparativo entre os valores dos CPIR's da Medição de Calibração com os preconizados pela norma IEC 1043 para instrumentos classe 2 e classe 1. Dupla 2.

Em cada uma das dez Medições K, após a Medição de Calibração, fez-se uma Medição Corrigida na qual aplicou-se uma correção no sinal captado pelo canal 1. Começando pela análise da correção da magnitude, tem-se a Fig. 5.15, que mostra em azul os valores de NPS medidos no canal 0 e de vermelho os medidos pelo canal 1. Por conta da correção aplicada os sinais ficam praticamente sobrepostos (sinal azul fica imperceptível), repetindo o resultado encontrado para a dupla de microfones anteriormente testada. A Tab. 5.5 apresenta a diferença média absoluta em [dB] entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais, antes e depois da correção. Confirma-se, mais uma vez, que a correção da magnitude foi efetiva.

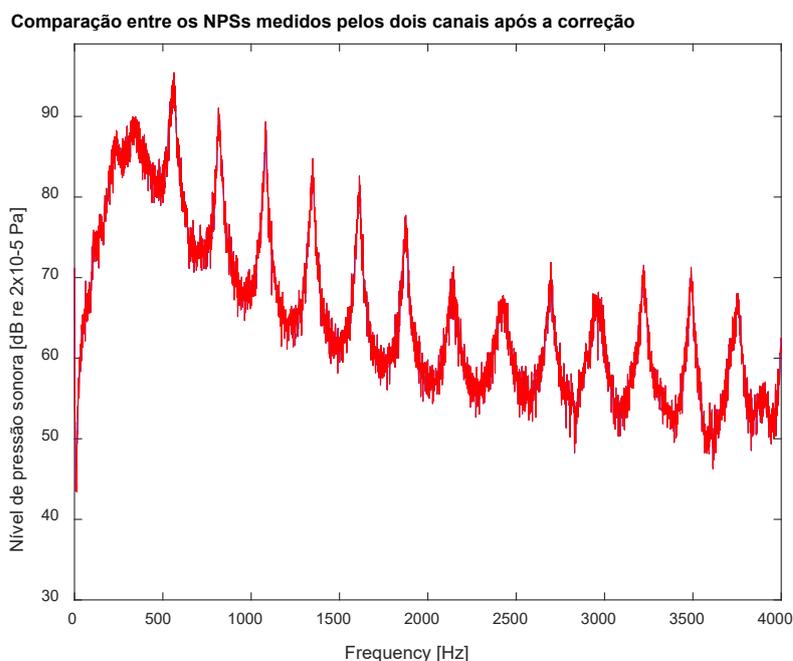


Figura 5.15: Comparação entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais na Medição Corrigida. Dupla 2.

Tabela 5.5: A diferença média absoluta em [dB] entre os níveis de pressão sonora medidos pelos dois canais, antes e depois da correção. Dupla 2.

Medição	Diferença Média [dB]	
	Calibração	Valores Corrigidos
1	-0,129513	0,000195
2	-0,128952	0,001144
3	-0,127111	0,000495
4	-0,127771	0,000369
5	-0,128406	0,000948
6	-0,127135	0,000261
7	-0,128164	0,001864
8	-0,126142	-0,001385
9	-0,125678	0,000011
10	-0,127119	0,001361

Partindo para a avaliação da correção da diferença de fase, espera-se que nas Medições Corrigidas ocorra menor diferença entre as fases dos sinais. A Fig. 5.16 apresenta a comparação entre o *phase-mismatch* antes (azul) e depois (vermelho) da correção, em uma das dez Medições K. Nela percebe-se que a correção conseguiu diminuir a diferença de fase original, que já era pequena.

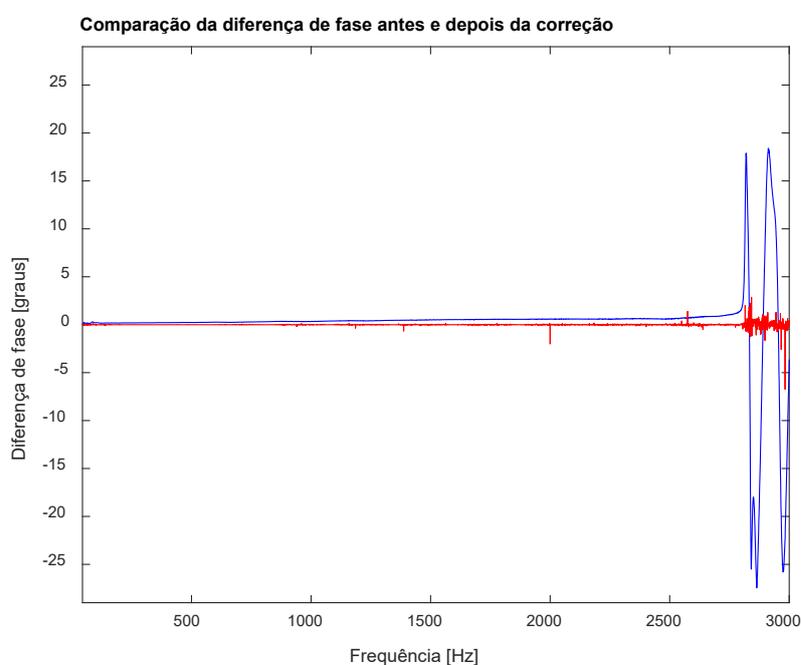


Figura 5.16: Comparação do *phase-mismatch* nas Medições de Calibração e Corrigida, ou seja, antes e depois da correção. Dupla 2.

Como a região mais preocupante é a das baixas frequências, amplificou-se a faixa que contém as quatro primeiras bandas de um terço de oitava, gerando a Fig. 5.16. Nessa figura nota-se que a diferença de fase, que antes da correção se mantinha entre 0,1 e 0,3 [grau], passa a ficar mais próxima de 0 [grau], deixando evidente a melhora após a correção aplicada. As Fig. 5.16 e 5.17 representam bem todas as dez medições da dupla 2 de microfones.

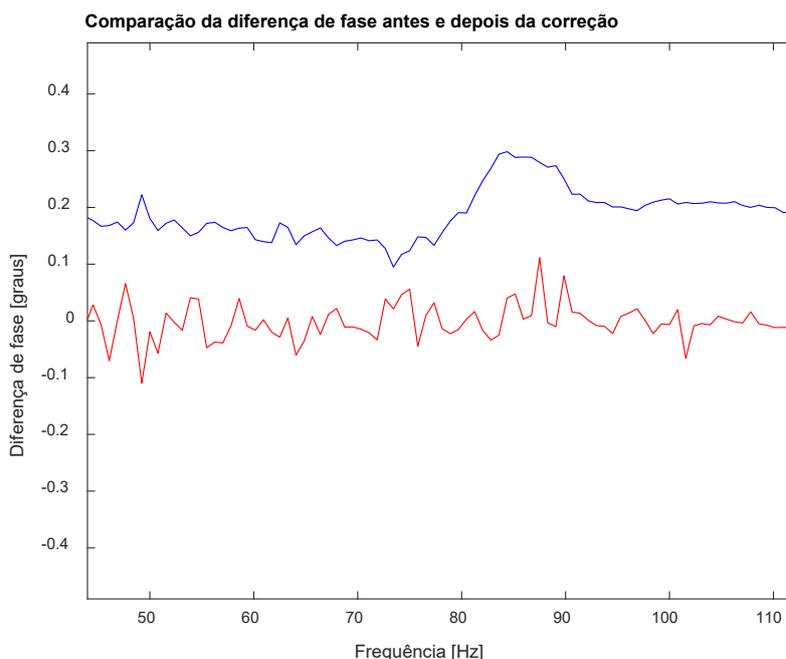


Figura 5.17: Mesmo gráfico da Fig. 5.16, com foco na faixa que contém as quatro primeiras bandas de um terço de oitava de interesse.

Para complementar as conclusões retiradas da avaliação do *phase-mismatch* realizada através dos dados da densidade de espectro de potência cruzada, faz-se agora uma análise baseada nos coeficientes de pressão-intensidade residual, utilizando os valores preconizados pela norma IEC 1043 como referência. A Fig. 5.18 apresenta os valores dos coeficientes de pressão-intensidade residual encontrados em uma das dez Medições Corrigidas ao lado dos recomendados pela IEC 1043 para instrumentos classe 2 e classe 1. Os resultados desse gráfico comprovam mais uma vez o êxito da correção, já que todas as bandas passam a ter valores acima dos sugeridos para classe 1. Os valores de CPIR em todas as dez Medições Corrigidas ultrapassaram os preconizados pela norma para as duas classes, indicando que o método de correção é válido mesmo para o caso de microfones que possuam pequena diferença de fase antes de qualquer interferência corretiva.

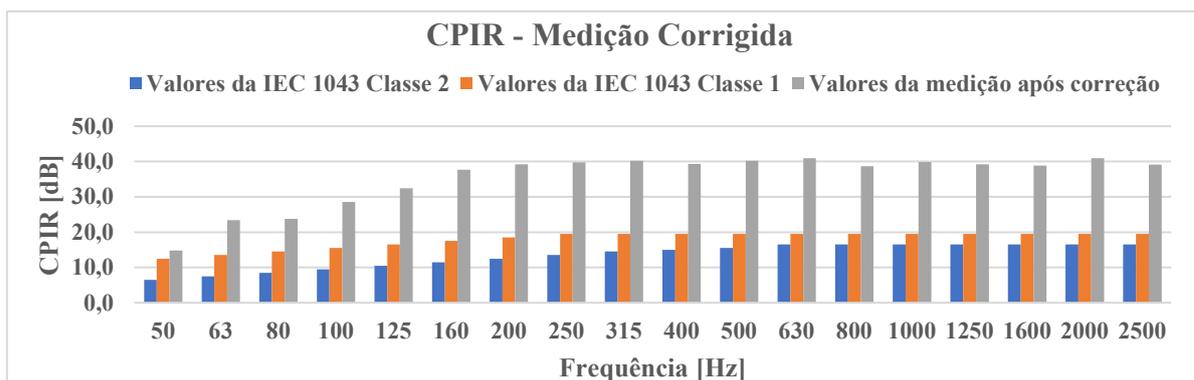


Figura 5.18: Gráfico comparativo entre os valores dos coeficientes de pressão intensidade residual da Medição Corrigida com os preconizados pela norma IEC 1043. Dupla 2.

Uma visão mais geral e sistematizada da efetividade da correção, feita a partir da comparação dos coeficientes da norma IEC 1043, é dada pela Tab. 5.6, que sumariza todos valores dos coeficientes de pressão-intensidade residual após a correção. Todas as bandas de um terço de oitava de todas as dez medições possuem valores superiores aos preconizados em norma para as duas classes de instrumentos.

5.2 Resultados do experimento para comparação de métodos de medição de intensidade sonora

O experimento apresentado na subseção 3.2 tem os seus resultados expostos aqui. Os dados de entrada para o processamento de sinais neste experimento foram os mesmos utilizados no da subseção anterior: $NFFT = 65536$, tempo de medição de 8 [seg], taxa amostral de 51.200 [amostras por segundo] e fator de *overlapping* de 0,5. Manteve-se o ruído rosa como sinal a ser reproduzido no alto-falante na Medição de Calibração, porém, nas Medições de Intensidades utilizou-se outros quatro sinais além do ruído rosa: ruído branco, um sinal tonal de 1000 [Hz] e dois ruídos de maquinário industrial retirados de um banco de dados da internet. Esses últimos serão chamados a partir de agora de Ruído Industrial 1 e Ruído Industrial 2. A utilização dos outros sinais nas medições de intensidade sonora analítico-experimentais, surge da necessidade de testar se a calibração funciona para qualquer tipo de sinal sonoro a ser medido após uma Medição de Calibração em que se usou o ruído rosa.

5.2.1 Dupla: Mic 1 e Mic 2

O resultado a ser analisado para esse experimento é a diferença entre os valores do nível de intensidade sonora em [dB] encontrados utilizando os Métodos p-p e Analítico. A fim de testar mais uma vez a eficiência da correção de *phase-mismatch* implementada, o Método p-p será subdividido em grupos de valores com e sem correção de fase. Objetivando concisão, a presente subseção apresentará graficamente somente os resultados do teste em que se utilizou o ruído branco como fonte de excitação na Medição de Intensidades. Todos os gráficos obtidos com o uso dos outros quatro sinais são mostrados no Apêndice B.

A Medição de Intensidades em que se usou o ruído branco como sinal de excitação tem seus resultados apresentados pelas Fig. 5.19, 5.20 e 5.21, nas quais tem-se a comparação entre os valores de nível de intensidade sonora (NIS) encontrados através do: i) Método p-p com correção; ii) Método p-p sem correção; iii) Método Analítico. Os três gráficos têm o eixo das abcissas partindo de 44 [Hz] e chegando a 3000 [Hz], um pouco acima da frequência de corte do tubo.

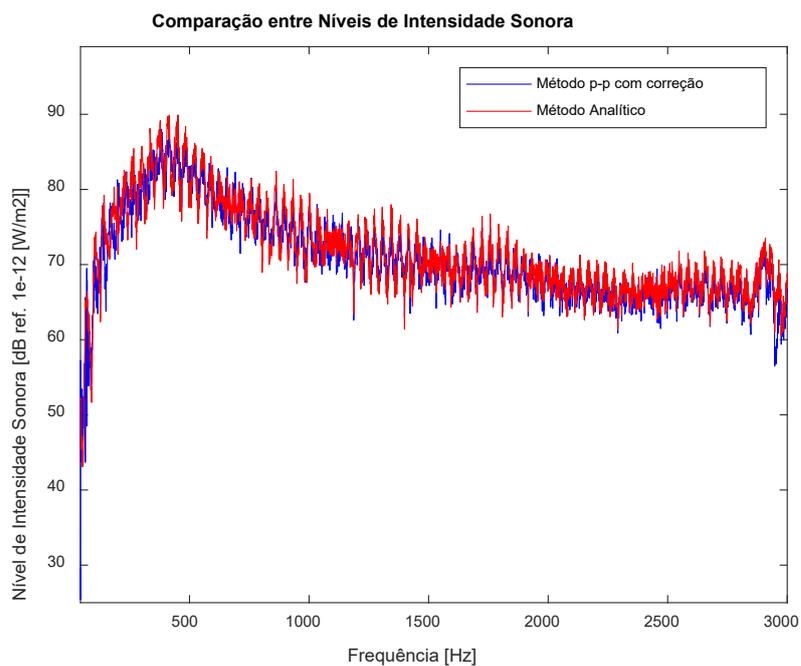


Figura 5.19: Comparação entre o Método p-p com correção e o Método Analítico. Dupla 1.

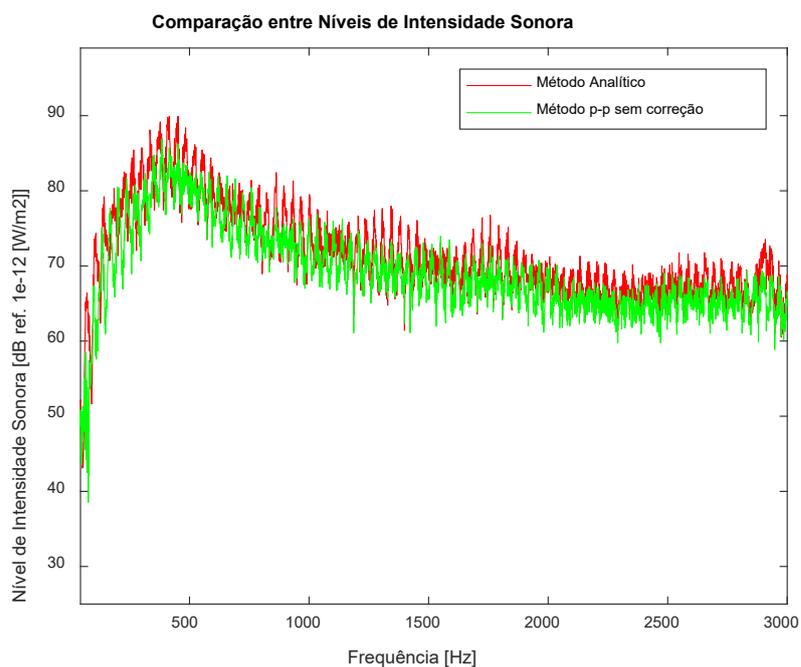


Figura 5.20: Comparação entre o Método p-p sem correção e o Método Analítico. Dupla 1.

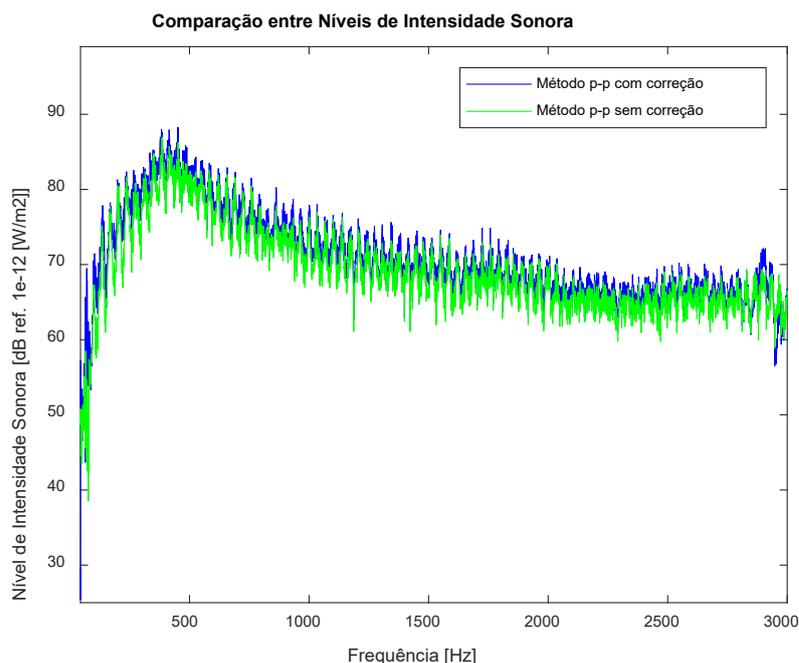


Figura 5.21: Comparação entre o Método p-p com e sem correção. Dupla 1.

Percebe-se pelas Fig. 5.19, 5.20 e 2.21 que os três métodos geram valores de NIS próximos uns dos outros. O mesmo ocorre nos gráficos correspondentes dos outros quatro sinais utilizados. Apenas por essa observação sobre a proximidade entre os resultados dos métodos, pode-se tirar algumas conclusões importantes: i) existem fortes evidências de que a implementação dos três métodos foi realizada de maneira correta; ii) o processamento de sinais que aplica a correção na resposta de um dos microfones possui estabilidade fora da planta experimental em que as variáveis de função de transferência são captadas.

Ainda na análise gráfica das Fig. 5.19 e 5.20, usando o Método Analítico como referência, tem-se a impressão de que o Método p-p com correção gerou melhores resultados do que o sem correção. Para facilitar essa avaliação e apresentar os resultados da maneira como é feita por sondas comerciais, os valores obtidos foram passados para bandas de um terço de oitava, sendo os novos valores apresentados pela Fig. 5.22. Por esse gráfico fica mais claro a melhoria dos resultados alcançados utilizando a correção, já que a apresentação em bandas facilita a percepção de que o Método p-p com correção produz valores mais próximos dos obtidos através do Método Analítico do que o Método p-p sem correção.

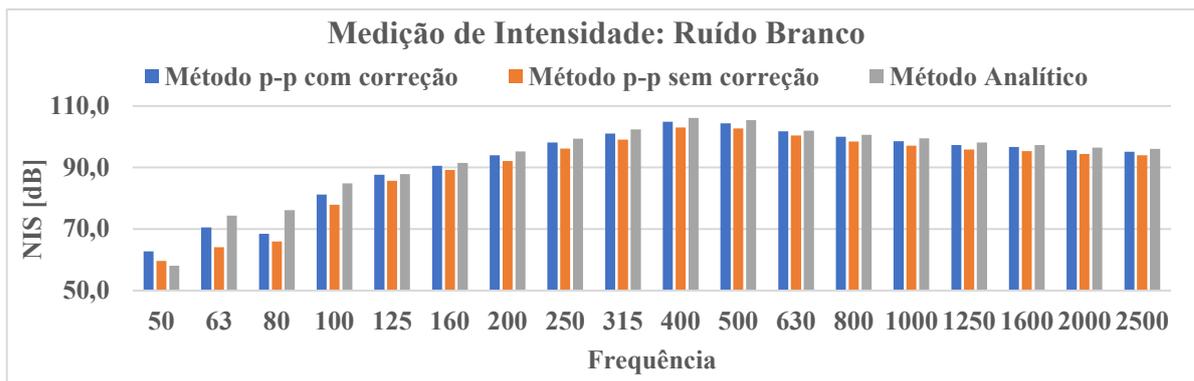


Figura 5.22: Comparação em bandas de um terço de oitava entre os métodos. Dupla 1.

Os gráficos dos demais sinais utilizados tiveram comportamento muito parecido ao mostrado na Fig. 5.22 nas bandas a partir de 125 [Hz], sempre com os valores corrigidos mais próximos do Método Analítico. Houve uma maior discordância entre os resultados abaixo de 100 [Hz], o que é esperado, pois em frequências muito baixas a terminação anecóica feita com materiais absorventes perde eficiência, portanto, o Método Analítico para de funcionar como uma boa referência, uma vez que a suposição de propagação de ondas “puramente” progressivas já não é mais válida. Usando o Método Analítico como referência, fez-se um gráfico com os erros dos resultados obtidos com o Método p-p a partir da banda de 125 [Hz] (Fig. 5.23).

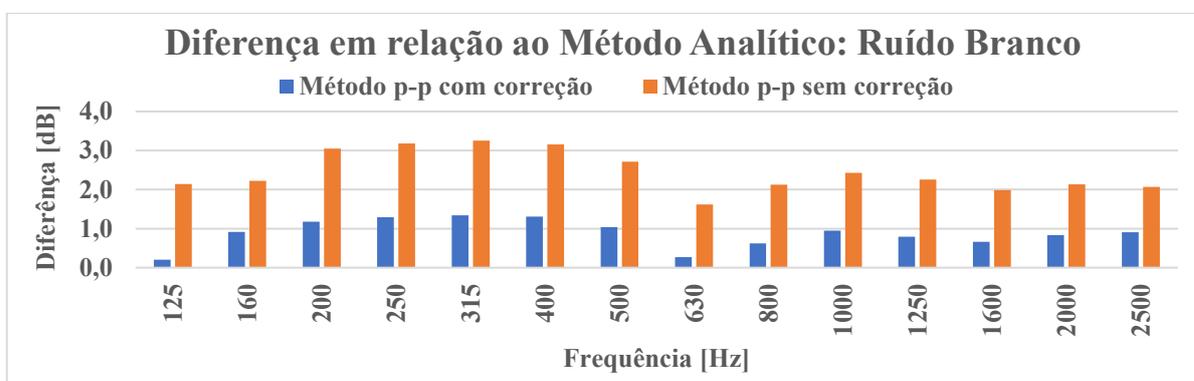


Figura 5.23: Comparação entre os erros do Método p-p com e sem correção. Dupla 1.

Na Fig. 5.23 fica ainda mais claro que a correção deixou os resultados do Método p-p mais próximos aos do Método Analítico, o que mais uma vez evidencia a efetividade da correção feita na resposta de um dos dois microfones. Esse comportamento de diminuição do erro nos resultados influenciados pela correção foi geral para todos os cinco sinais de excitação utilizados, das setenta bandas de um terço de oitavas analisadas - quatorze bandas (125 a 2500 [Hz]) de cinco sinais - somente em duas o erro aumentou com a correção: banda de

630 [Hz] do Ruído Industrial 2 e a banda de 200 [Hz] para o sinal tonal de 1000 [Hz], sendo que em ambas os erros dos resultados corrigidos não passaram de 1 [dB].

De maneira geral, os resultados foram muito bons. Ao usar o Método p-p com correção, a diferença máxima em relação ao Método Analítico foi de 1,7 [dB] para todas as bandas de um terço de oitava de todos os sinais de excitação. O comportamento semelhante dos métodos nos gráficos em que a intensidade sonora foi apresentada em linhas espectrais também é um resultado importante. Isso porque mostra que o Método p-p corrigido, além de ter concordância com o Analítico em bandas de um terço de oitava, é capaz de determinar de maneira precisa frequências tonais, como fica especialmente evidenciado nas medições com um sinal de excitação tonal de 1000 [Hz] (Fig. B.11, B.12 e B.13 do Apêndice B).

5.2.2 Dupla 2: Mic 2 e Mic 3

Para essa dupla de microfones da BSWA, os resultados a serem analisados são os mesmos da dupla anterior: a diferença entre os valores dos níveis de intensidade sonora encontrados utilizando os Métodos p-p e Analítico. Para a Dupla 2 também foi realizada a subdivisão dos resultados alcançados com o Método p-p em dois grupos, com e sem correção de diferença de fase. Nesta subseção são apresentados os gráficos dos resultados referentes ao teste em que usou o sinal chamado Ruído Industrial 2 na Medição de Intensidades, os demais sinais sonoros têm todos os seus resultados gráficos apresentados no Apêndice B.

As Fig. 5.24, 5.25 e 5.26 mostram as comparações entre os valores encontrados com os três métodos: p-p, com e sem correção, e Analítico. Manteve-se nesses três gráficos o padrão de limitar o eixo das abcissas entre 44 e 3000 [Hz].

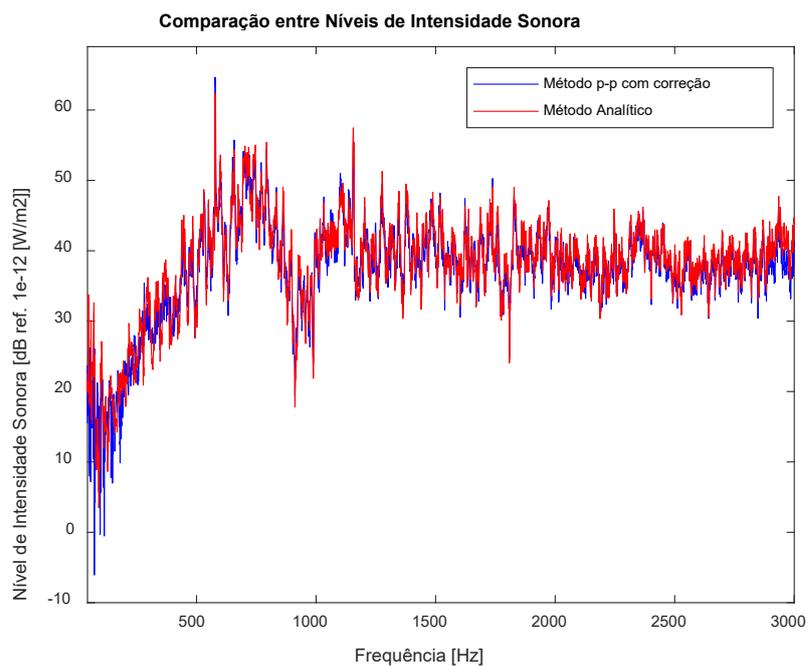


Figura 5.24: Comparação entre o Método p-p com correção e o Método Analítico. Dupla 2.

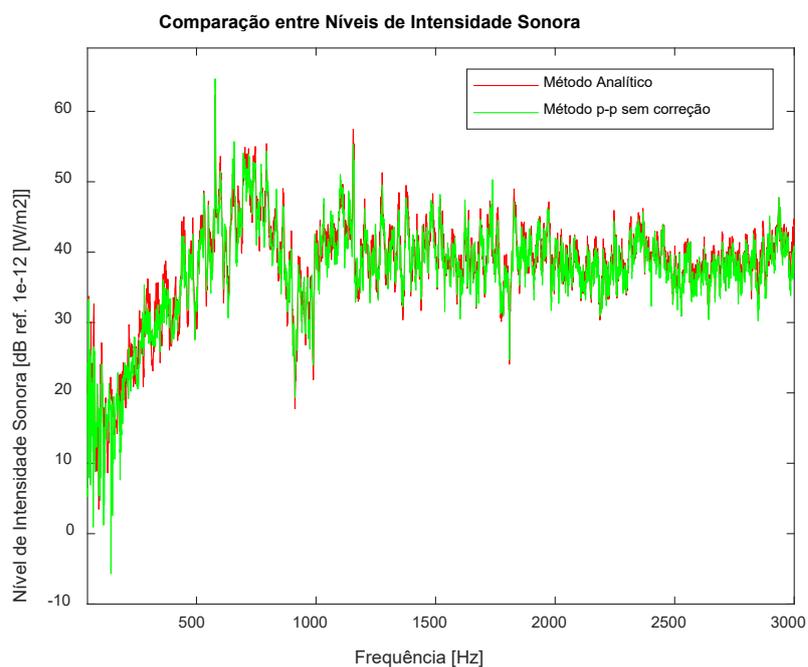


Figura 5.25: Comparação entre o Método p-p sem correção e o Método Analítico. Dupla 2.

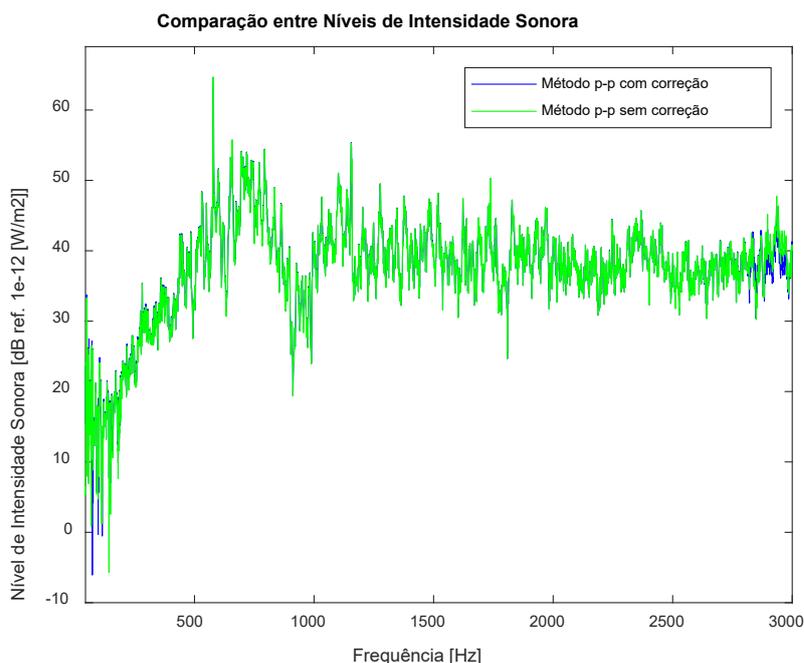


Figura 5.26: Comparação entre o Método p-p com e sem correção. Dupla 2.

Assim como ocorreu com os resultados da dupla de microfones anterior, os gráficos das Fig. 5.24, 5.25 e 5.26 mostram que os valores de NIS alcançados com os Métodos p-p e Analítico apresentam comportamentos dentro do esperado e desejado, ou seja, muito parecidos entre si. O mesmo ocorre nos gráficos correspondentes dos outros quatro sinais utilizados. Apesar da semelhança com os resultados da subseção anterior, na qual se usou a outra dupla de microfones, com a Dupla 2 percebe-se visualmente que a diferença entre os resultados gerados com os Métodos p-p com e sem correção é bem menor, e que ambos encontram valores mais próximos do Método Analítico. Não é possível afirmar objetivamente, somente pela análise visual dos gráficos acima, se a correção da diferença de fase melhora os resultados e quão próximos são os valores obtidos com os três métodos. Para melhor avaliar os resultados, plotou-se o gráfico com os níveis de intensidade sonora em bandas de um terço de oitava (Fig. 5.27).

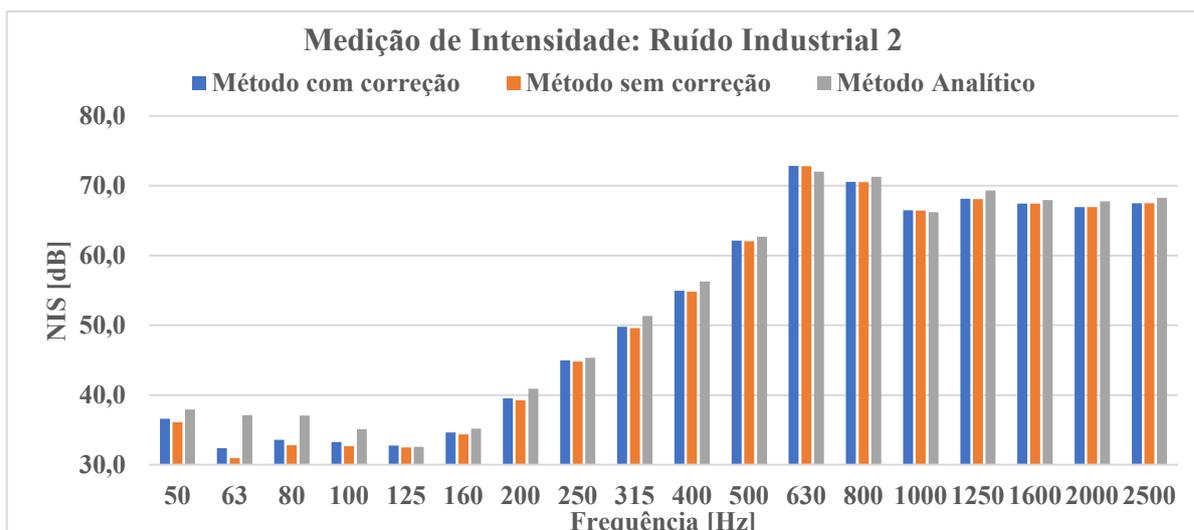


Figura 5.27: Comparação em bandas de um terço de oitava entre os métodos. Dupla 2.

A análise dos resultados em bandas de um terço de oitava não gera a clareza desejada, isso porque para a Dupla 2 os métodos utilizados alcançaram respostas muito próximas acima de 125 [Hz]. Para clarear, usando o Método Analítico como referência, fez-se um gráfico com os erros dos resultados obtidos com o Método p-p a partir da banda de 125 [Hz] (Fig. 5.28).

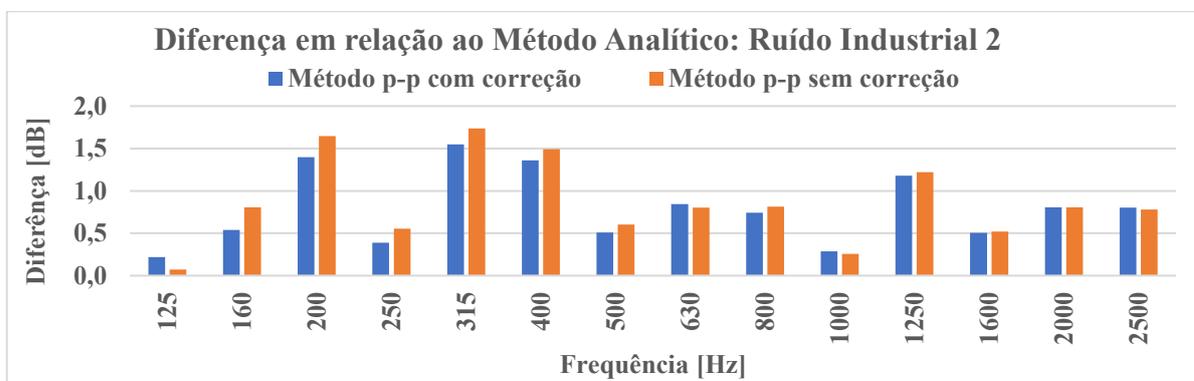


Figura 5.28: Comparação entre os erros do Método p-p com e sem correção. Dupla 2.

Percebe-se que há uma tendência das medições feitas sem correção possuírem erros menores quando comparados com os da dupla anterior e que, quando há aplicação de correção, existe uma propensão à diminuição desses erros, porém sem uma queda brusca. Para a Dupla 2, das setenta bandas analisadas (quatorze bandas de cinco sinais), em 56 o erro é menor no Método p-p com correção quando comparado com o Método p-p sem correção. Nas vezes em que o erro é maior, a diferença dos resultados com e sem correção é muito baixa, sempre menor de 0,3 [dB].

A melhoria causada pela correção do *phase-mismatch* na Dupla 2 é menor, então para que se tenha resultados mais absolutos, seria preciso um experimento acusticamente mais controlado. Apesar dessa ponderação feita, os resultados foram muito bons e evidenciam, mais uma vez, a eficácia do método de correção aplicada. De maneira geral, o padrão de resultados das medições com o Ruído Industrial 2 mostrados na presente subseção se repetiu para os outros quatro sinais de excitação.

As conclusões quanto a eficiência da implementação dos métodos e da estabilidade da correção implementadas, tiradas dos resultados da Dupla 1, são reafirmadas pelos resultados da Dupla 2.

6 ESTRUTURA SUPORTE DO PROTÓTIPO DE SONDA

Após a validação da implementação computacional, seguiu-se para a elaboração de uma “estrutura suporte” para o protótipo de sonda. Dentre as configurações mais utilizadas em sondas p-p (Fig. 2.23), pelo fato dos microfones utilizados na presente pesquisa serem acoplados às cápsulas que contém pré-amplificadores, descarta-se os arranjos *tandem* e *back-to-back* por incompatibilidade geométrica. Dessa forma restam os arranjos *face-to-face* e *side-by-side*. A escolha entre essas duas opções deve se basear em vários fatores, a seguir são levantadas algumas ponderações que foram levadas em consideração.

Quanto ao erro causado pela aproximação do gradiente de pressão pela diferença finita, como já se explicou, quanto menor a distância (d) entre os microfones, maior a faixa de frequência passível de medições precisas. A limitação desse tipo de erro a um máximo de 1 [dB] é dada por $kd < 1,2$ e para um limite de 0,5 [dB] é preciso ter $kd < 0,8$. Nessas circunstâncias, como a configuração *side-by-side*, utilizando-se dois microfones de meia polegada, tem um d mínimo de 13 [mm], para um erro de 1 [dB] o limite é de 5.230,78 [Hz] e para 0,5 [dB] tem-se 3.307,70 [Hz]. Essa limitação não existe na configuração *face-to-face*, pois os microfones podem ficar tão perto um do outro quanto se deseje.

No que tange o erro causado pela dispersão e difração sonora, como explicado na subseção 2.5.3, a configuração *side-by-side* tem um limite superior de aproximadamente 3 [kHz]. A dispersão sonora causada ao utilizar o arranjo *face-to-face* é um tema já muito pesquisado e testado, por isso, a maioria das sondas comerciais utilizam essa configuração. No entanto, em sondas comerciais são tomadas várias medidas para minimizar a difração e dispersão sonora causada pela presença do equipamento, como o uso de cápsulas de microfones separadas dos pré-amplificadores e cabos finos, enquanto que a presente pesquisa contempla microfones ligados aos pré-amplificadores de maneira fixa, como normalmente são fabricados a grande parte de microfones de medição, e cabos genéricos. Essas limitações do protótipo de sonda que se deseja construir podem fazer aumentar os erros causados por dispersão e difração sonora na montagem *face-to-face*.

A configuração *side-by-side* possui algumas vantagens mecânicas: i) nesse arranjo é possível se chegar bem próximo de uma superfície radiante; ii) é uma montagem mais fácil de ser rotacionada em torno do seu eixo de simetria, o que facilita a implementação da correção do erro de *phase-mismatch* pelo método do Chung (1978) e a checagem de medições; iii) há maior facilidade de se utilizar uma espuma protetora, necessária para evitar interferência do vento e para proteção contra danos mecânicos e térmicos.

Com as ponderações levantadas, optou-se pela configuração *side-by-side*, pelos seguintes motivos:

- A distância mínima entre os microfones neste arranjo – 13 [mm] – permite realizar medições dentro da faixa de frequência de interesse do trabalho, até 2765 [Hz], com um erro causado pela aproximação do gradiente de pressão pela diferença finita de no máximo 0,5 [dB].
- O erro causado pela difração e dispersão sonora na montagem *side-by-side* é conhecido, controlado e baixo dentro da faixa de frequência estudada. No caso da *face-to-face*, tem-se uma bibliografia vasta a respeito deste erro, porém tais estudos levam em conta particularidades de equipamentos e design que são usados em sondas comerciais e de difícil reprodução em um protótipo de sonda de baixo custo. Usando os equipamentos e materiais disponíveis para o presente projeto, o erro esperado para o caso de sondas comerciais pode aumentar de maneira significativa. Como a configuração *side-by-side*, utilizando os equipamentos e materiais disponíveis, pode ser usada com erro previsível e baixo, acredita-se que esta seja a melhor das opções.
- Os ensaios experimentais apresentados na seção 3, realizados para validação do processamento de sinais, foram feitos usando o arranjo *side-by-side*. Apesar do processamento, a princípio, poder ser utilizado em qualquer configuração, acredita-se que a escolha pela montagem *side-by-side* seja a mais segura.

O suporte construído materializou-se através do uso de impressora 3D, após modelagem computacional. Nesse primeiro protótipo de suporte procurou-se facilitar a mudança de distância entre os microfones (d), de maneira a minimizar os erros causados pela aproximação da diferença finita e pela diferença de fase entre os canais de medição. Fez-se então uma estrutura de encaixe, na qual a peça que define d pode ser facilmente trocada. Na Fig. 6.1 tem-

se os desenhos das peças que formam a estrutura do protótipo feitos em *SolidWorks*. As peças das Fig. 6.1-c) e 6.1-d) formam uma haste e as duas peças superiores, 6.1-a) e 6.1-b), possuem a função de posicionar os microfones com distâncias de 15 e 50 [mm] entre si.

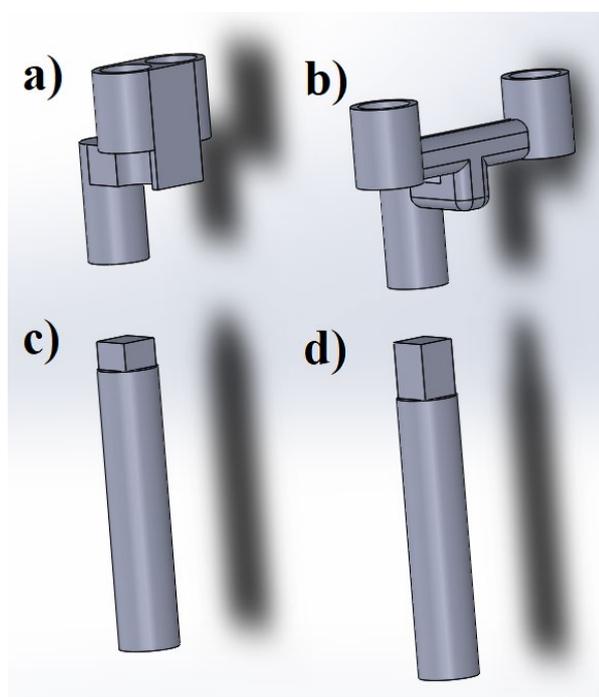


Figura 6.1: Peças, desenvolvidas em *SolidWork*, da estrutura suporte do protótipo de sonda.

A Fig. 6.2 mostra as mesmas peças da Fig. 6.1 após a impressão 3D.

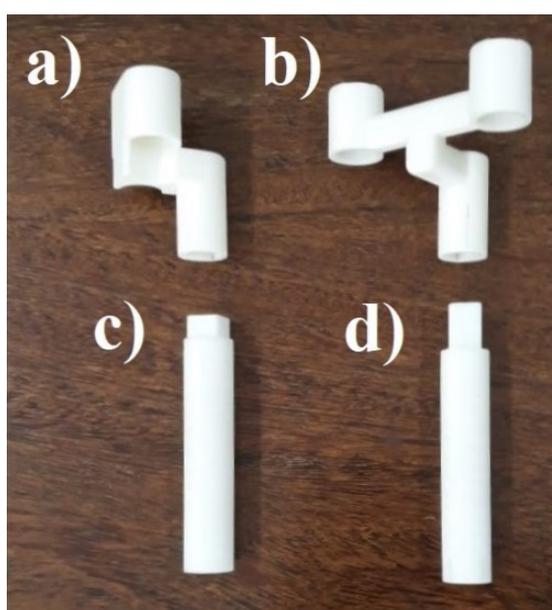


Figura 6.2: Mesmas peças da Fig. 6.1 materializadas através de impressão 3D.

A seguir são apresentadas as Fig. 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6, que expõem fotos do protótipo de sonda já montado e com os microfones posicionados.



Figura 6.3: Protótipo de sonda montado no arranjo *side-by-side* e $d = 50$ [mm]. Visão frontal.



Figura 6.4 Protótipo de sonda montado no arranjo *side-by-side* e $d = 50$ [mm]. Visão lateral.



Figura 6.5: Protótipo de sonda montado no arranjo *side-by-side* e $d = 15$ [mm]. Visão frontal.



Figura 6.6: Protótipo de sonda montado no arranjo *side-by-side* e $d = 15$ [mm]. Visão lateral.

A Fig. 6.7 mostra um protótipo de sonda na posição *face-to-face*, sendo que em relação ao protótipo *side-by-side* trocou-se somente a peça de suporte dos microfones. Nessa imagem nota-se um maior potencial de interferência no campo sonoro medido para o arranjo *face-to-face* quando comparado com o *side-by-side*, já que no eixo que liga os centros dos microfones, no qual se deseja medir a intensidade sonora, para os tipos de microfones e cabos usados, há uma maior presença física de equipamentos/materiais.



Figura 6.7: Protótipo de sonda montado no arranjo *face-to-face*. Visão frontal.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Contribuições deste trabalho

Este trabalho apresentou o processo de desenvolvimento de um protótipo de sonda de intensidade sonora de baixo custo. Nele uma bibliografia robusta foi elaborada, na qual encontram-se os principais conceitos sobre a intensidade sonora e os equipamentos capazes de medi-la, além de uma revisão sobre conceitos base de acústica e de processamento de sinais. Tomou-se especial cuidado de abranger todas as várias áreas do conhecimento presentes no projeto, tendo como principal propósito gerar uma base completa dos conhecimentos mais importantes para reprodução e aprimoramento do protótipo de sonda construído.

O processamento de sinais necessário para a utilização do método p-p, incluindo o método de correção do *phase-mismatch*, assim como todo o processamento necessário para obter as respostas dos experimentos realizados, foram implementados com sucesso em linguagem MATLAB. O êxito proclamado foi atestado pelos resultados experimentais obtidos, que tiveram grande coerência com o que se esperava a partir da teoria.

Assim como os resultados experimentais corroboraram a teoria acústica e a implementação do processamento de sinais, é possível afirmar também que tais resultados validaram os próprios ensaios experimentais concebidos neste trabalho. Como exemplos, pode-se citar o fato de que as duas plantas experimentais tiveram as premissas sobre as quais foram construídas confirmadas: a planta experimental de calibração (Fig. 3.3) se mostrou capaz de submeter dois microfones à mesma pressão sonora e a montagem mostrada pela Fig. 3.4 produziu um campo com propagação de ondas planas “puramente” progressivas.

O objetivo do estudo de contribuir para que se diminua a dependência de sondas de intensidade sonora comerciais, que possuem altos preços e tecnologia fechada, foi atingido, na medida que gerou evidências de que é possível medir intensidade sonora com razoável precisão usando equipamentos de medição acústica acessíveis. O protótipo de sonda de intensidade sonora desenvolvido já é capaz de suprir algumas demandas de medição de intensidade sonora, como por exemplo: ranqueamento, localização e caracterização de fontes sonoras. No entanto, o

maior valor da presente pesquisa está no fato de que se iniciou uma investigação base sobre sondas de intensidade sonora de baixo custo sobre a qual pode-se desenvolver pesquisas que complementem o protótipo desenvolvido de maneira livre, até que se tenha um produto final alternativo às sondas comerciais.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Melhorias na planta de calibração: maior sistematização na construção da planta, talvez com o uso de maior número de peças concebidas em *software* de modelagem e materializados através de impressora 3D e/ou máquinas CNC; tornar a montagem mais portátil; diminuir o diâmetro do tubo de propagação de ondas sonoras, de maneira a aumentar a frequência de corte.
- Investigar a possibilidade de se inserir no processamento de dados correções que diminuam a influência dos erros causados pela aproximação do gradiente de pressão e pela difração sonora.
- Investigar a possibilidade de se realizar medições precisas de intensidade sonora com equipamentos ainda mais baratos, como microfones de eletreto e microcontroladores fazendo a função de aquisição de sinais.
- Criação de uma interface para o *script* de processamento de sinais.
- Comparar o protótipo de sonda desenvolvido com uma sonda comercial.
- Aprimorar o design do protótipo de sonda desenvolvido.

APÊNDICE A - RESULTADOS DA SUBSEÇÃO 5.1

Para complementar os resultados mostrados pela subseção 5.1, referentes ao experimento exposto na subseção 3.1, são apresentados nesse apêndice todos os resultados de todos os ensaios. A fim de manter esse apêndice sucinto e claro, vamos separar os resultados de acordo com: a dupla de microfones, o dia de medição (no caso da Dupla 1), o número da medição e o conteúdo gráfico. Os dois primeiros critérios já foram explicados no corpo do trabalho. A numeração será feita da seguinte forma: para a Dupla 1 de microfones foram feitas 20 medições em dois dias, a numeração irá de 1 até 10 para cada dia, já a Dupla 2 teve 10 medições que são enumeradas de 1 a 10. Em relação ao conteúdo do gráfico, serão feitos agrupamentos de gráficos que recebem os seguintes nomes:

- **Resultado 1:** gráficos que mostram em azul os valores de NPS medidos no canal 0 e de vermelho os medidos pelo canal 1 nas Medições de Calibração. No eixo das ordenadas tem-se o nível de pressão sonora em [dB] e no eixo das abcissas tem-se uma faixa de frequência que vai de 44 até 4000 [Hz].
- **Resultado 2:** representam zooms dos gráficos que formam o grupo Resultado 1 na região da frequência de corte. No eixo das ordenadas tem-se o nível de pressão sonora em [dB] e no eixo das abcissas representa-se a faixa de frequência começando em 2000 e indo até 3000 [Hz].
- **Resultado 3:** apresentam os resultados das Medições Corrigidas, nas quais as correções foram aplicadas na resposta do microfone ligado ao canal 1. Estão em azul os valores de NPS medidos no canal 0 e de vermelho os medidos pelo canal 1 após a correção. No eixo das ordenadas tem-se o nível de pressão sonora em [dB] e no eixo das abcissas tem-se uma faixa de frequência que vai de 44 até 4000 [Hz].
- **Resultado 4:** exposição, através de gráficos, dos valores de coeficiente de pressão-intensidade residual encontrados em Medições de Calibração lado a lado com os sugeridos pela IEC 1043. No eixo das ordenadas está o CPIR em [dB] e no eixo das abcissas estão as frequências centrais em [Hz] das bandas de um terço de oitava, com valores de 50 a 2500 [Hz].

- **Resultado 5:** comparação entre a diferença de fase antes (azul) e depois (vermelho) da aplicação de uma correção. A análise realizada do *phase-mismatch* nesse grupo de resultados foi feita através dos dados de espectro de potência cruzada. No eixo das ordenadas tem-se a diferença de fase entre os canais de aquisição em [graus] e no eixo das abcissas localiza-se uma faixa de frequências que começa em 44 e termina em 3000 [Hz].
- **Resultado 6:** zooms dos gráficos do Resultado 5 na região que contém as quatro primeiras bandas de um terço de oitava, 50, 63, 80 e 100 [Hz], começando em 44 [Hz] e chegando a 112 [Hz] no eixo das abcissas.
- **Resultado 7:** gráficos que comparam os valores de coeficiente de pressão-intensidade residual encontrados em Medições Corrigidas com os sugeridos pela IEC 1043. No eixo das ordenadas está o CPIR em [dB] e no eixo das abcissas estão as frequências centrais em [Hz] das bandas de um terço de oitava, indo de 50 até 2500 [Hz].

Quando conveniente, se usará as seguintes abreviações nas legendas das figuras: R.1 para abreviar Resultado 1 e M.1 para abreviar Medição 1.

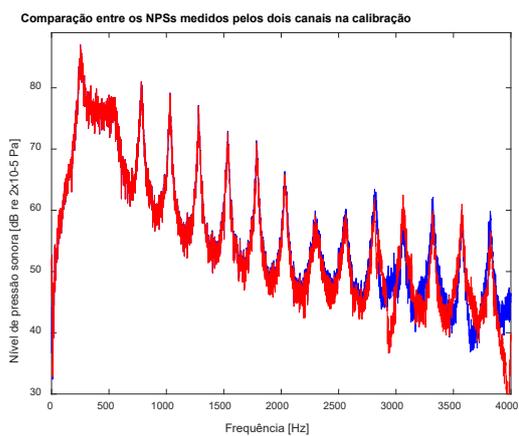


Figura A.1: R.1; M.1; dupla 1; dia 1.

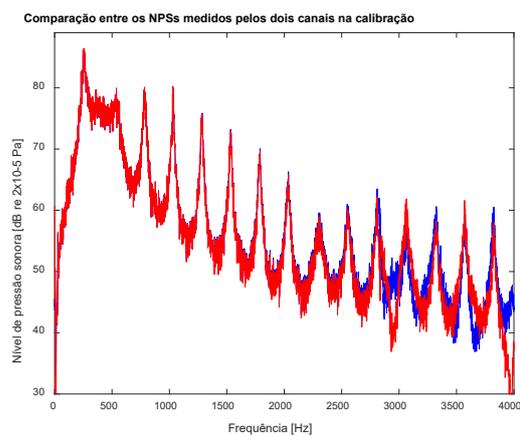


Figura A.2: R.1; M.1; dupla 1; dia 1.

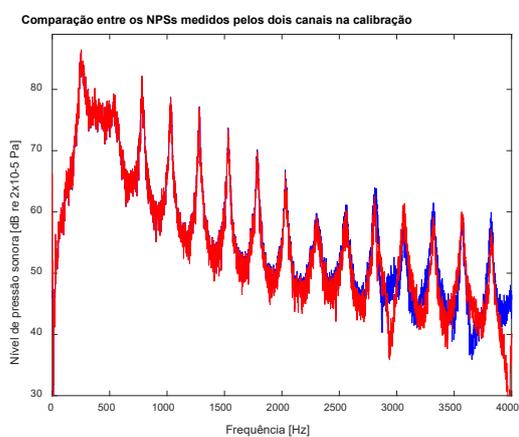


Figura A.3: R.1; M.3; dupla 1; dia 1.

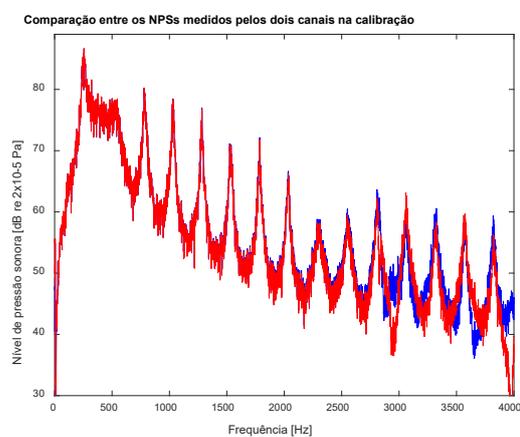


Figura A.4: R.1; M.4; dupla 1; dia 1.

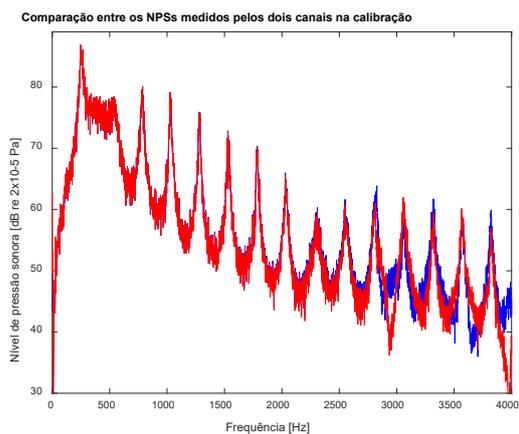


Figura A.5: R.1; M.5; dupla 1; dia 1.

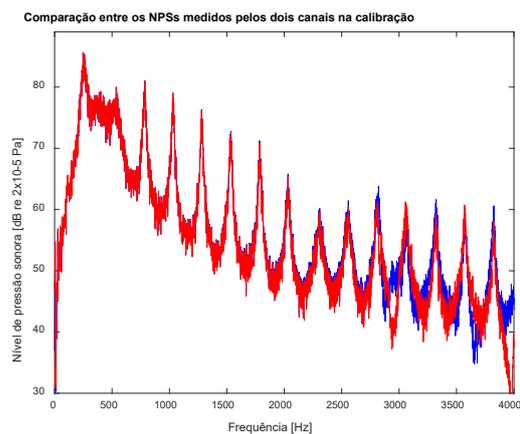


Figura A.6: R.1; M.6; dupla 1; dia 1.

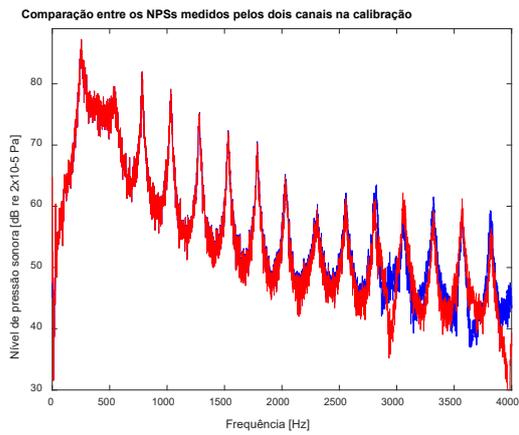


Figura A.7: R.1; M.7; dupla 1; dia 1.

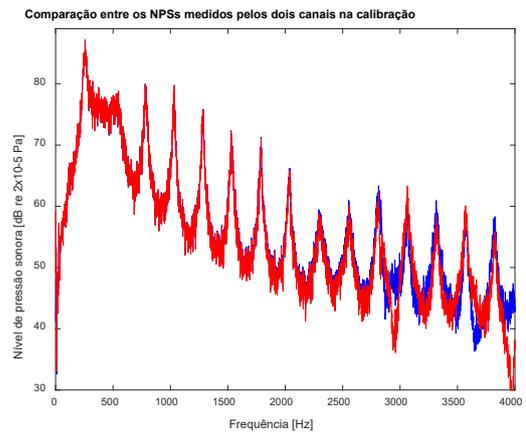


Figura A.8: R.1; M.8; dupla 1; dia 1.

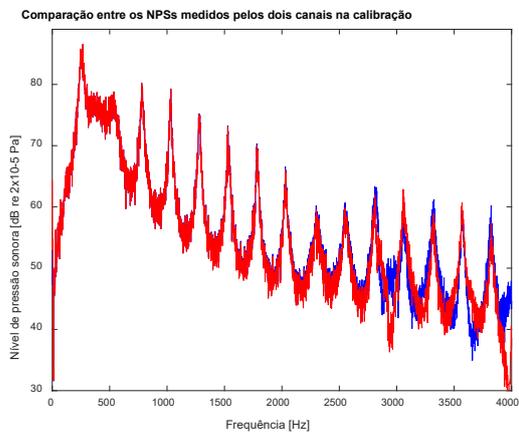


Figura A.9: R.1; M.9; dupla 1; dia 1.

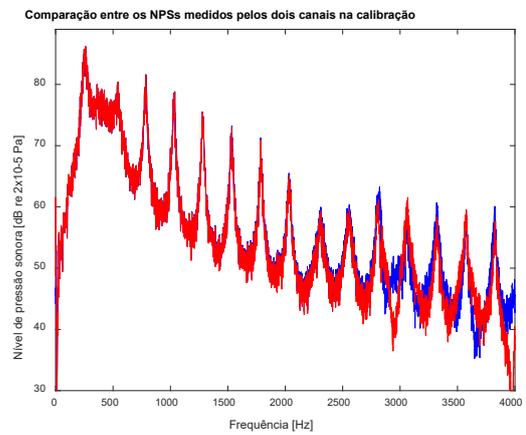


Figura A.10: R.1; M.10; dupla 1; dia 1.

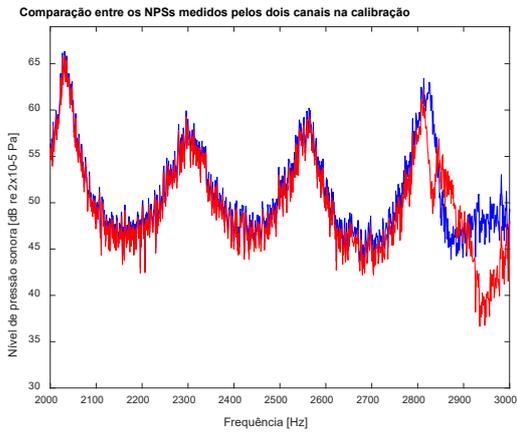


Figura A.11: R.2; M.1; dupla 1; dia 1.

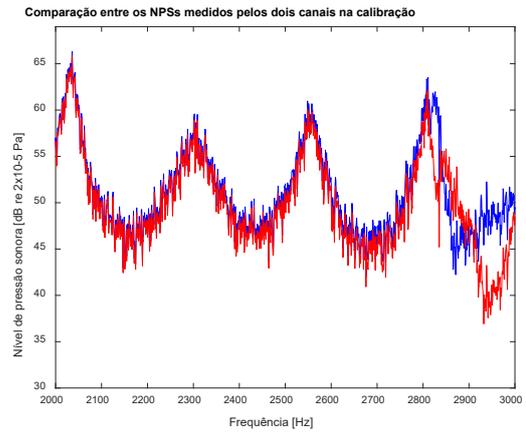


Figura A.12: R.2; M.2; dupla 1; dia 1.

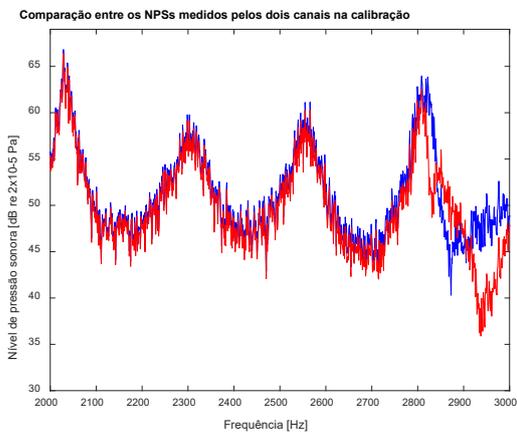


Figura A.13: R.2; M.3; dupla 1; dia 1.

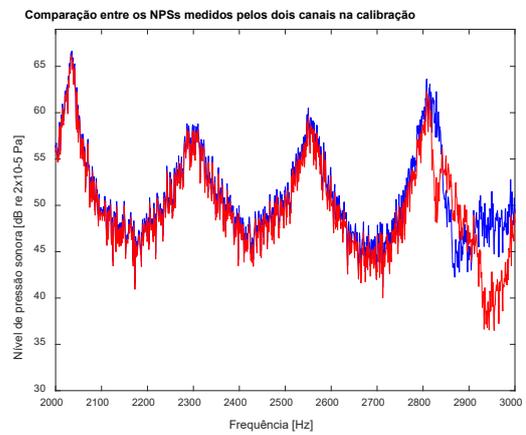


Figura A.14: R.2; M.4; dupla 1; dia 1.

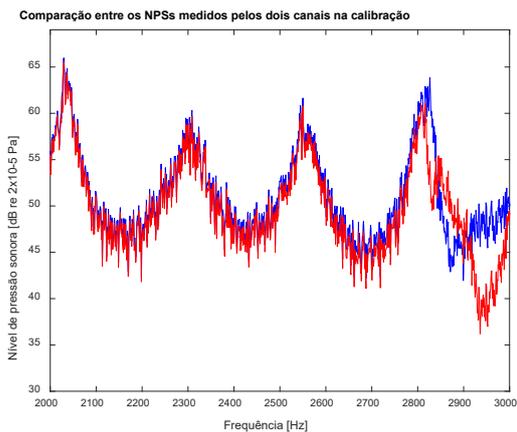


Figura A.15: R.2; M.5; dupla 1; dia 1.

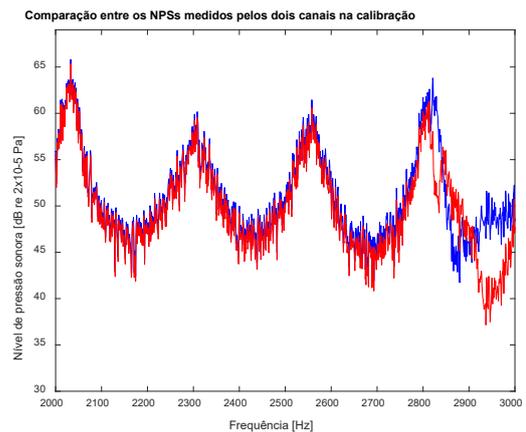


Figura A.16: R.2; M.6; dupla 1; dia 1.

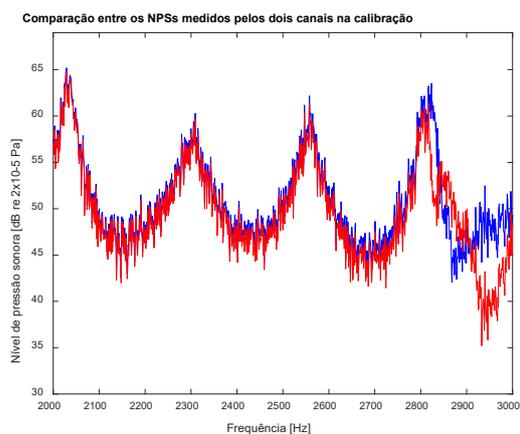


Figura A.17: R.2; M.7; dupla 1; dia 1.

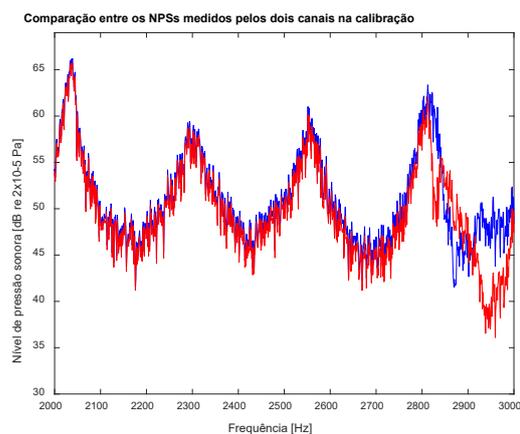


Figura A.18: R.2; M.8; dupla 1; dia 1.

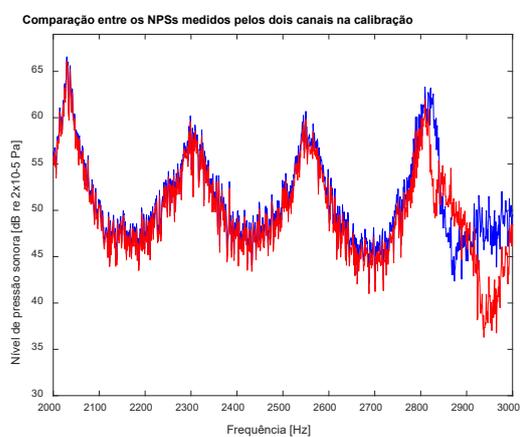


Figura A.19: R.2; M.9; dupla 1; dia 1.

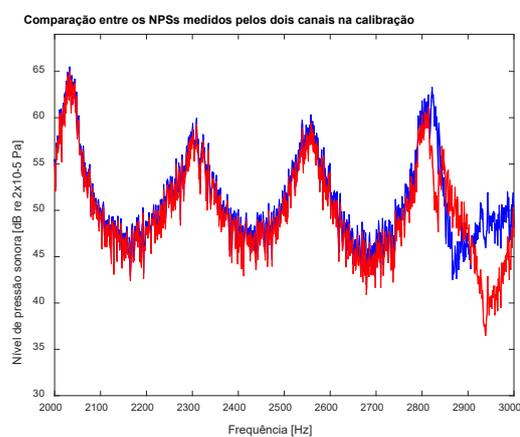


Figura A.20: R.2; M.10; dupla 1; dia 1.

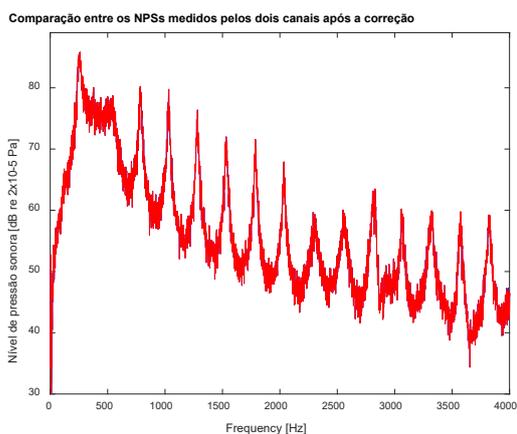


Figura A.21: R.3; M.1; dupla 1; dia 1.

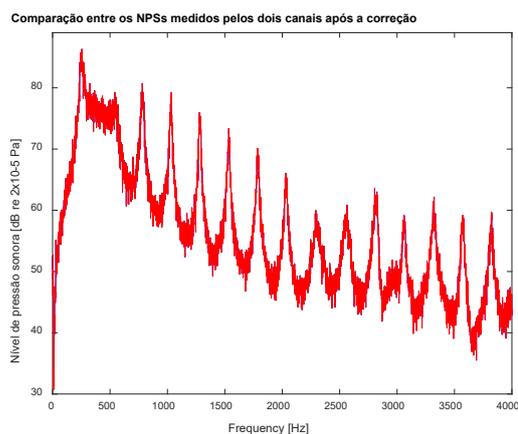


Figura A.22: R.3; M.2; dupla 1; dia 1.

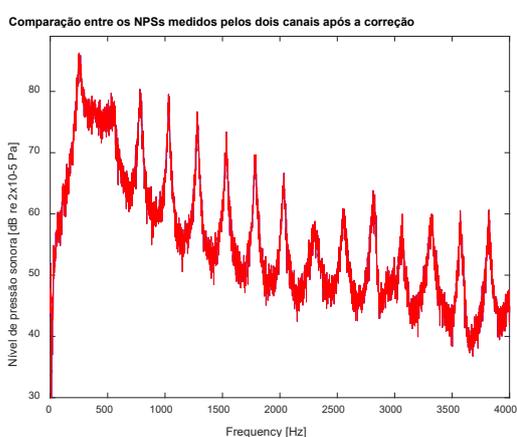


Figura A.23: R.3; M.3; dupla 1; dia 1.

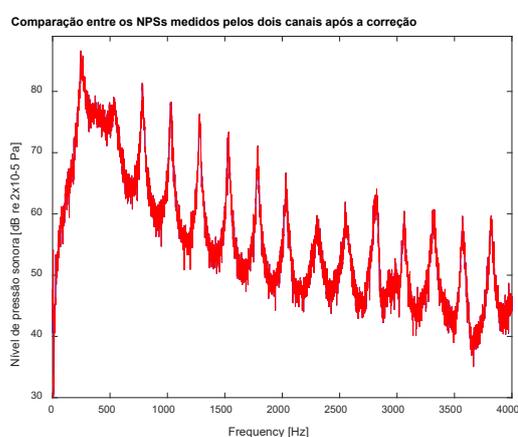


Figura A.24: R.3; M.4; dupla 1; dia 1.

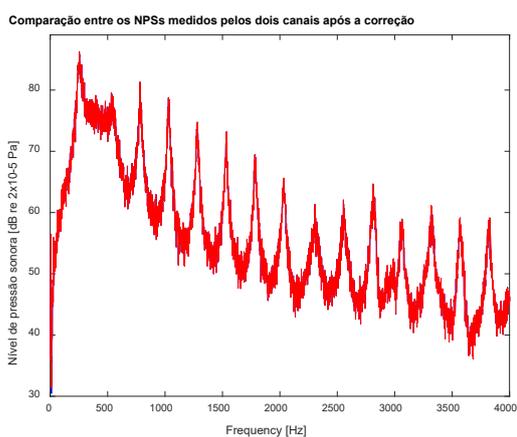


Figura A.25: R.3; Medição 5; dupla 1; dia 1.

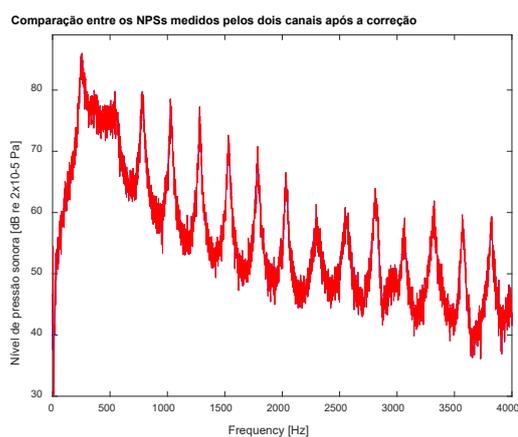


Figura A.26: R.3; Medição 6; dupla 1; dia 1.

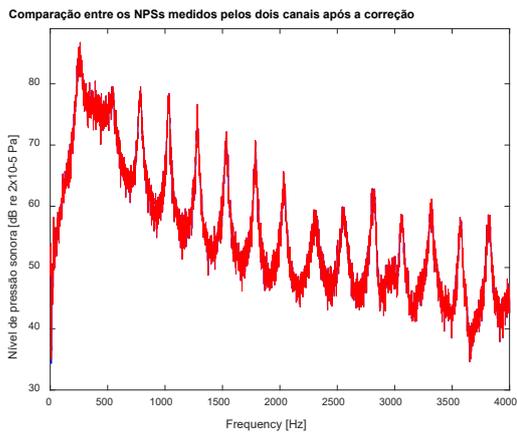


Figura A.27: R.3; M.7; dupla 1; dia 1.

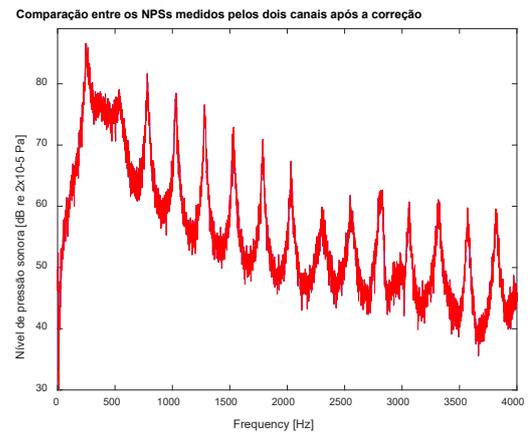


Figura A.28: R.3; M.8; dupla 1; dia 1.

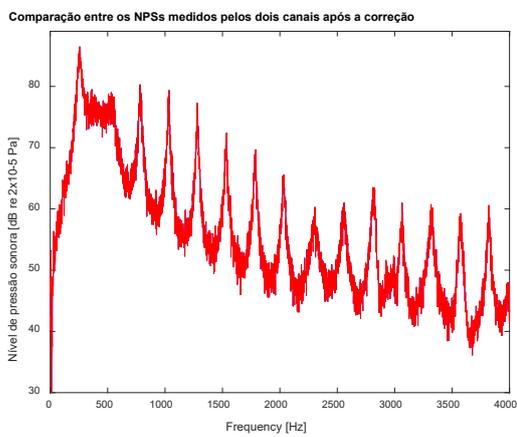


Figura A.29: R.3; M.9; dupla 1; dia 1.

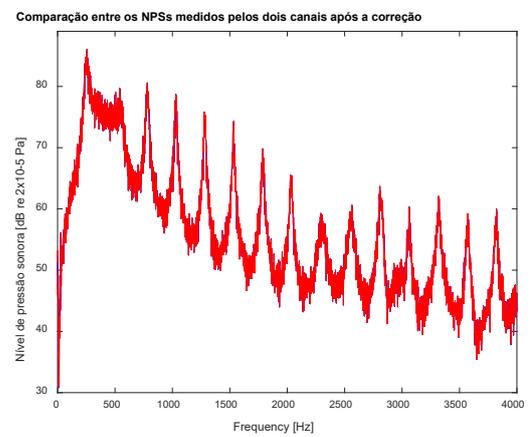


Figura A.30: R.3; M.10; dupla 1; dia 1.

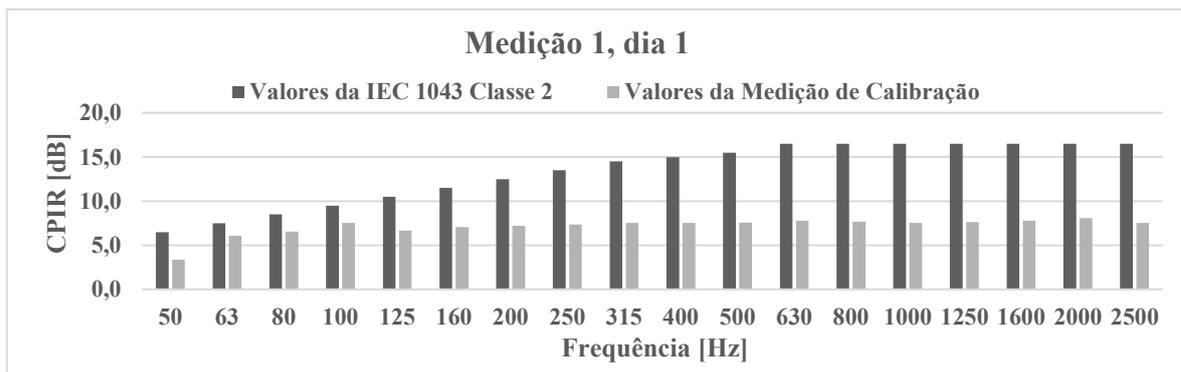


Figura A.31: Resultado 4; Medição 1; dupla 1; dia 1.

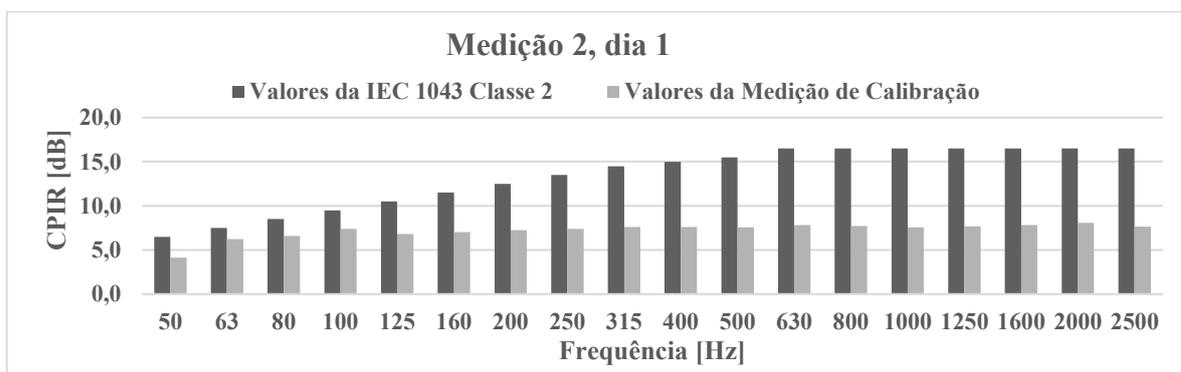


Figura A.32: Resultado 4; Medição 2; dupla 1; dia 1.

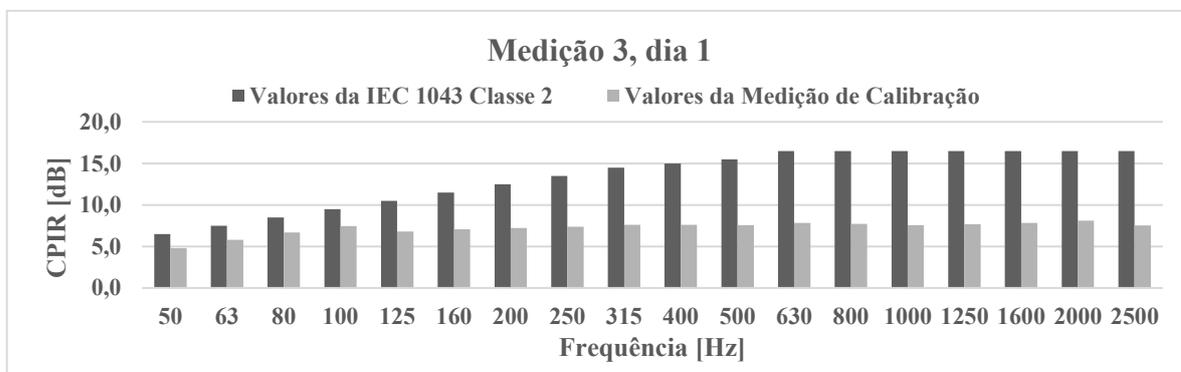


Figura A.33: Resultado 4; Medição 3; dupla 1; dia 1.

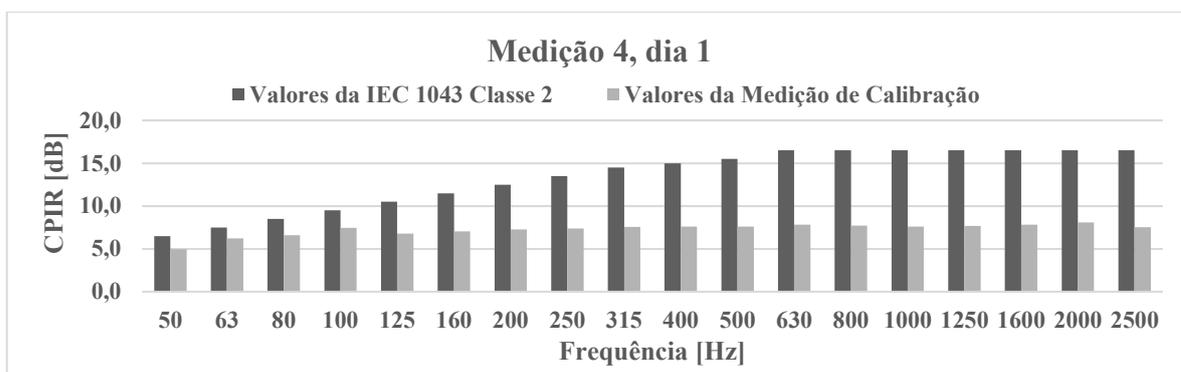


Figura A.34: Resultado 4; Medição 4; dupla 1; dia 1.

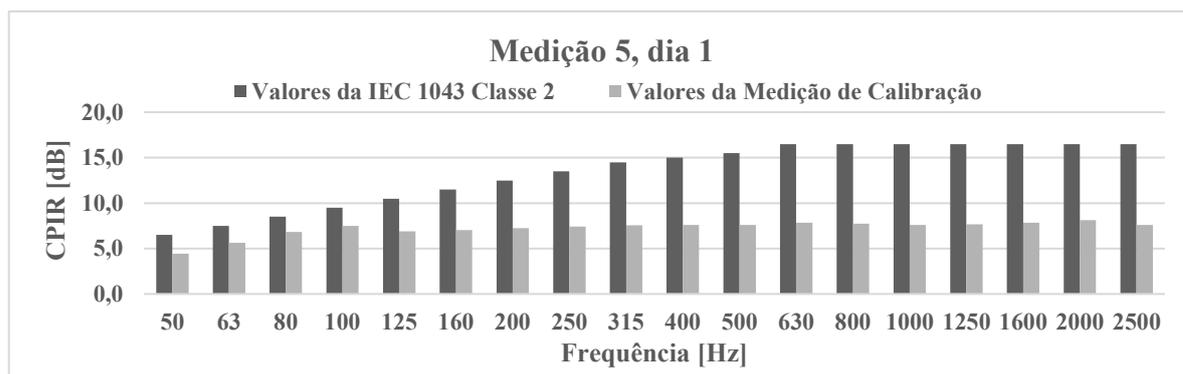


Figura A.35: Resultado 4; Medição 5; dupla 1; dia 1.

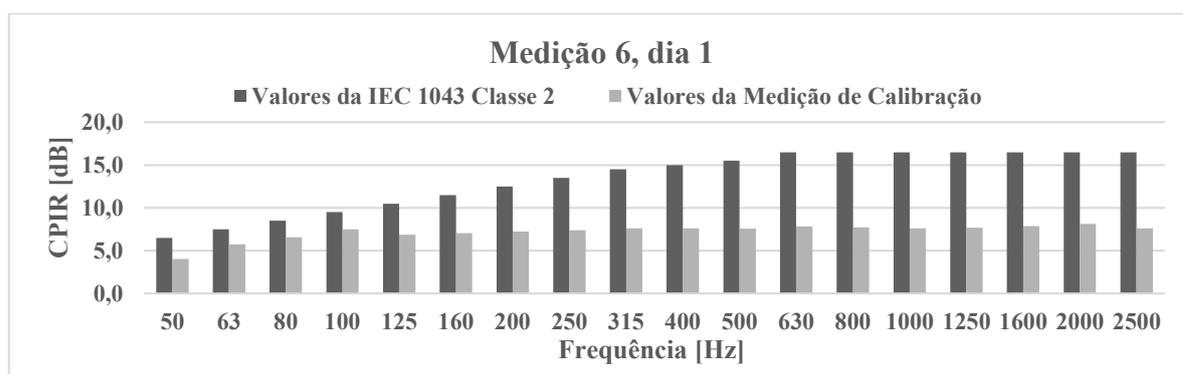


Figura A.36: Resultado 4; Medição 6; dupla 1; dia 1.

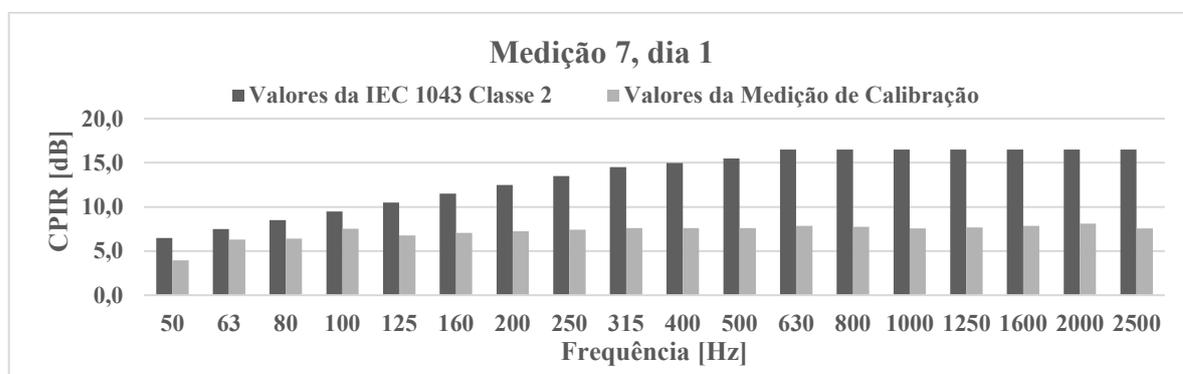


Figura A.37: Resultado 4; Medição 7; dupla 1; dia 1.

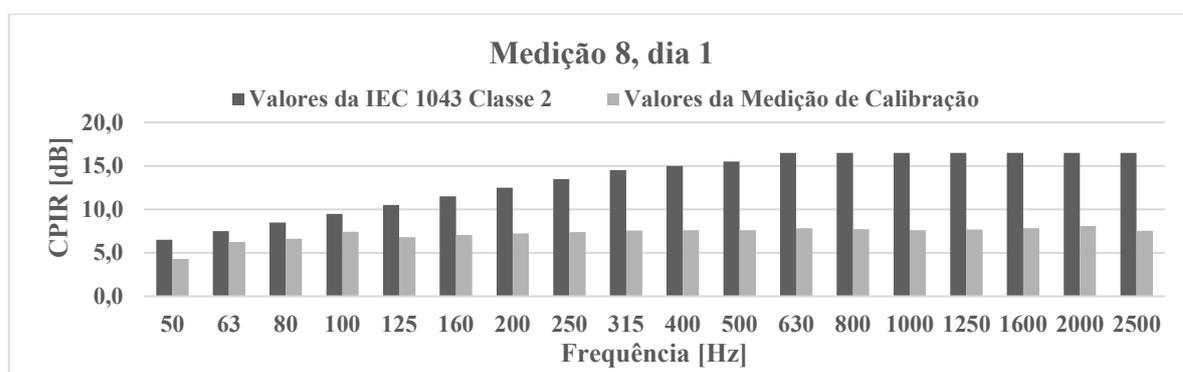


Figura A.38: Resultado 4; Medição 8; dupla 1; dia 1.

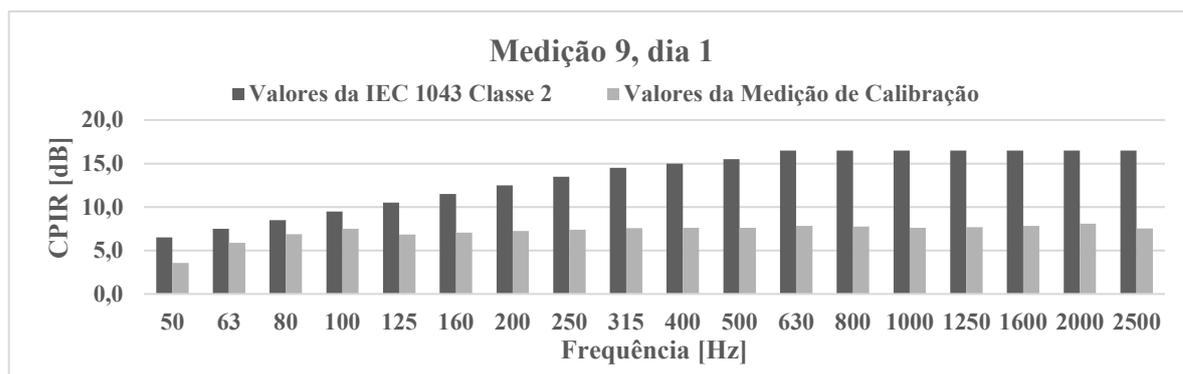


Figura A.39: Resultado 4; Medição 9; dupla 1; dia 1.

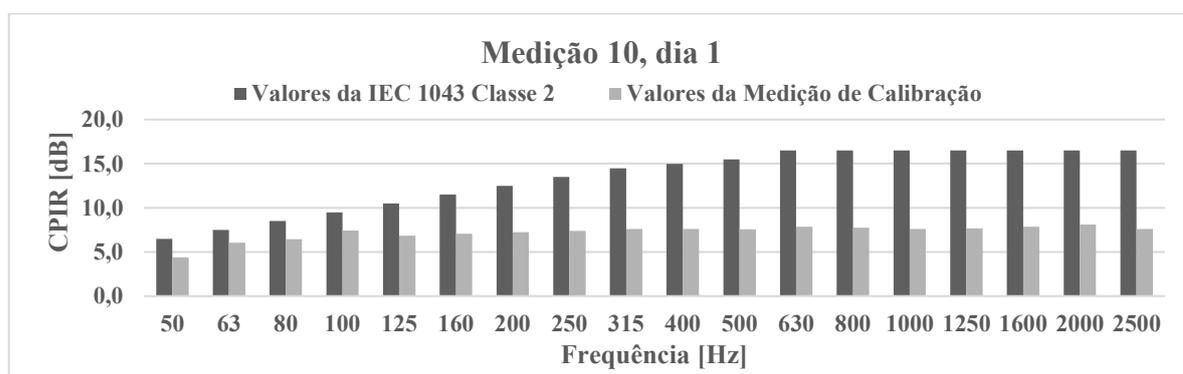


Figura A.40: Resultado 4; Medição 10; dupla 1; dia 1.

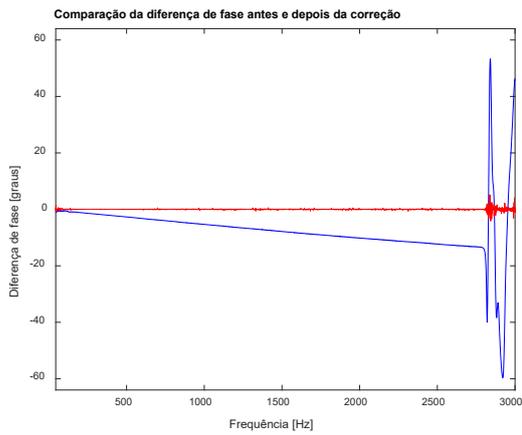


Figura A.41: R.5; M.1; dupla 1; dia 1.

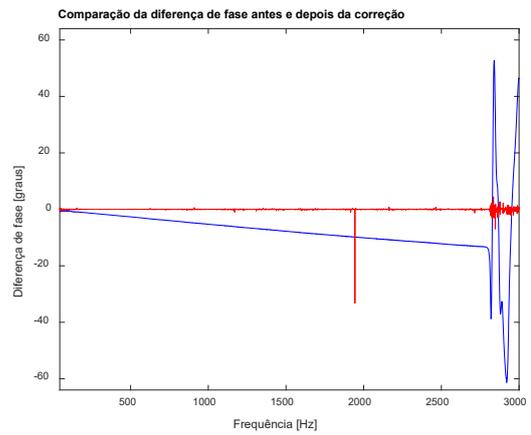


Figura A.42: R.5; M.2; dupla 1; dia 1.

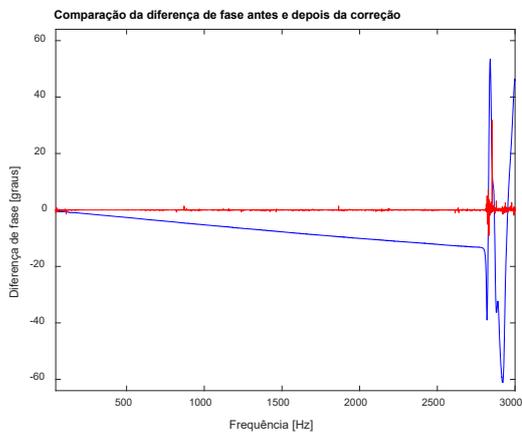


Figura A.43: R.5; M.3; dupla 1; dia 1.

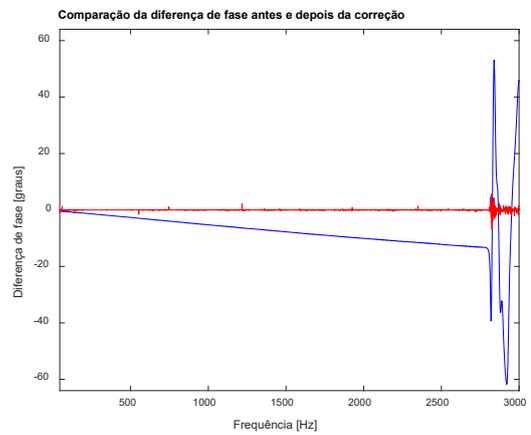


Figura A.44: R.5; M.4; dupla 1; dia 1.

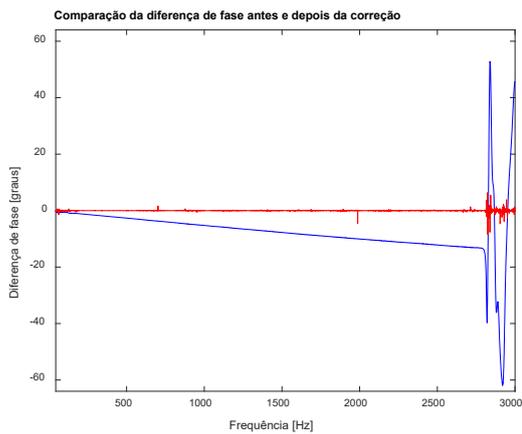


Figura A.45: R.5; M.5; dupla 1; dia 1.

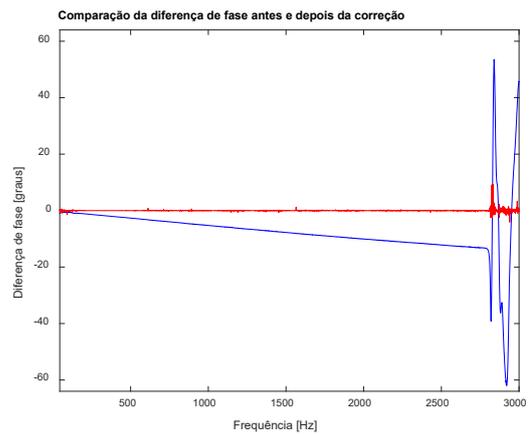


Figura A.46: R.5; M.6; dupla 1; dia 1.

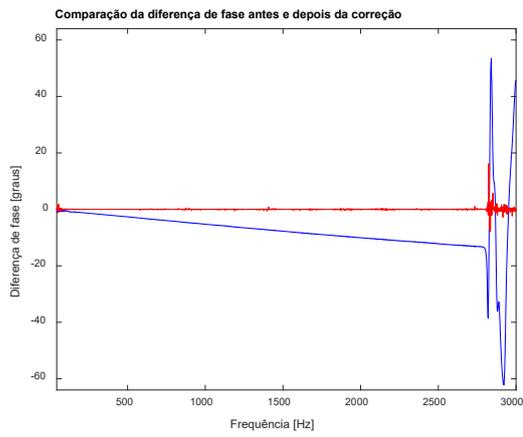


Figura A.47: R.5; M.7; dupla 1; dia 1.

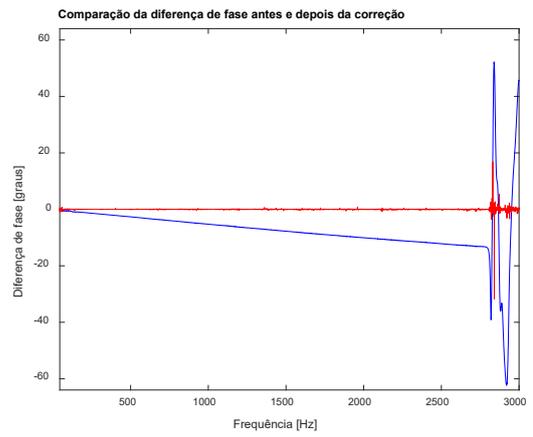


Figura A.48: R.5; M.8; dupla 1; dia 1.

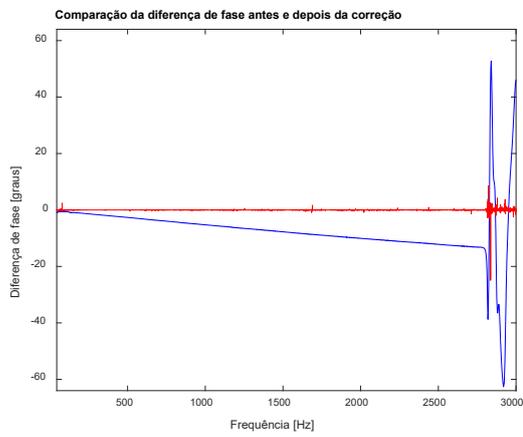


Figura A.49: R.5; M.9; dupla 1; dia 1.

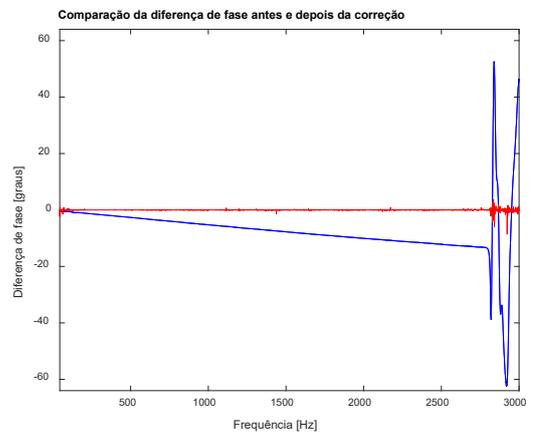


Figura A.50: R.5; M.10; dupla 1; dia 1.

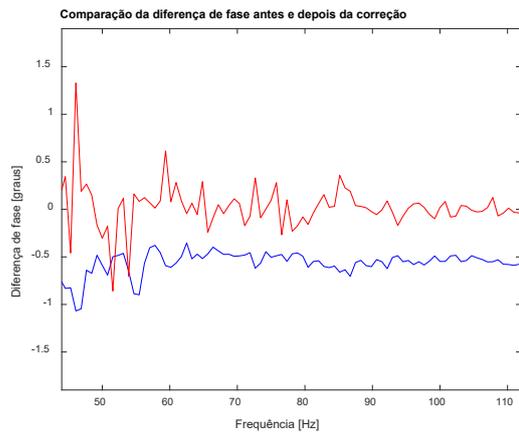


Figura A.51: R.6; M.1; dupla 1; dia 1.

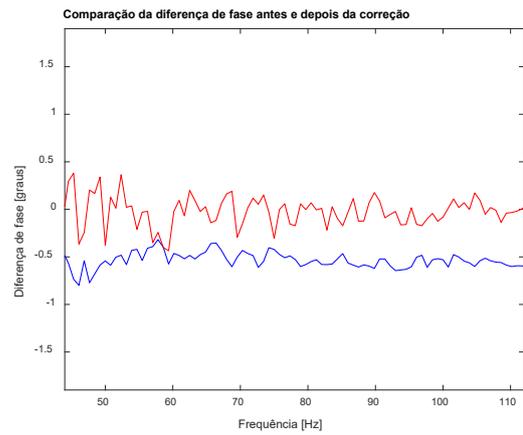


Figura A.52: R.6; M.2; dupla 1; dia 1.

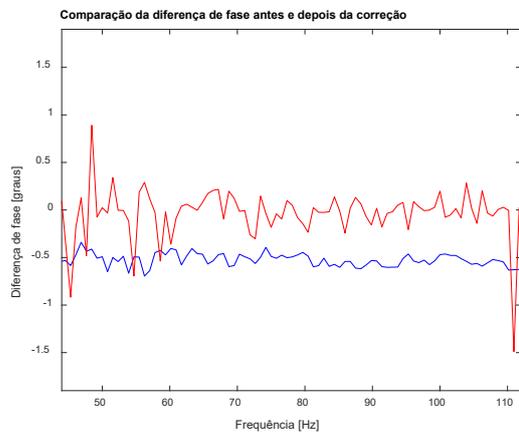


Figura A.53: R.6; M.3; dupla 1; dia 1.

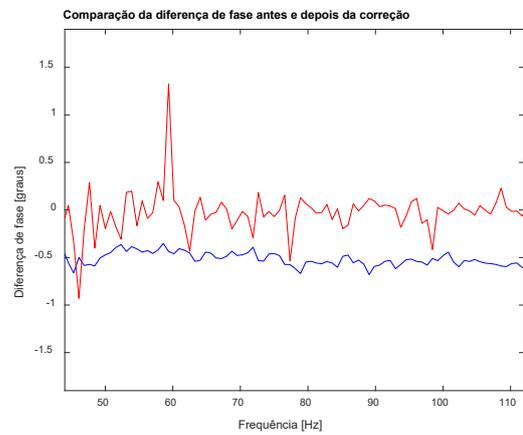


Figura A.54: R.6; M.4; dupla 1; dia 1.

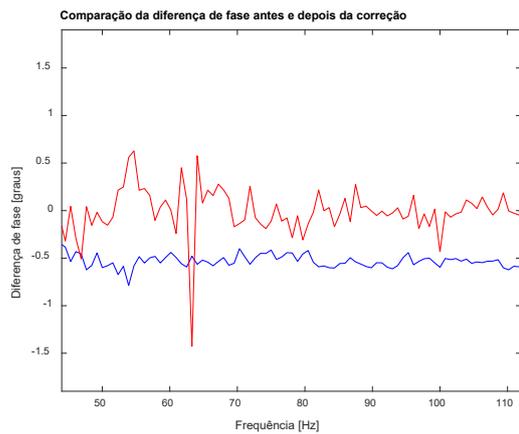


Figura A.55: R.6; M.5; dupla 1; dia 1.

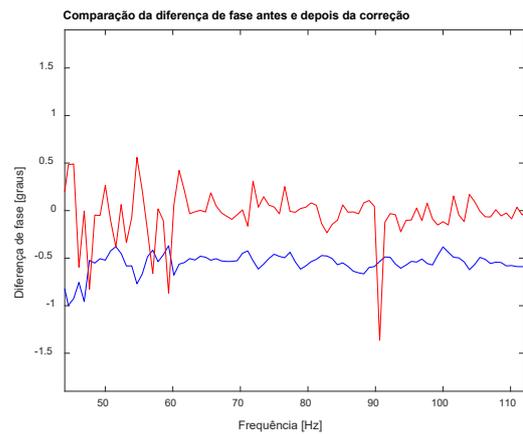


Figura A.56: R.6; M.6; dupla 1; dia 1.

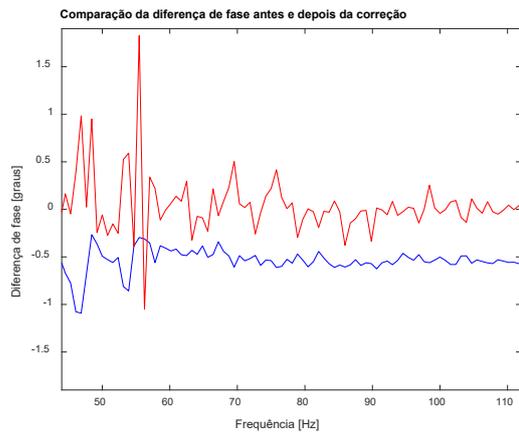


Figura A.57: R.6; M.7; dupla 1; dia 1.

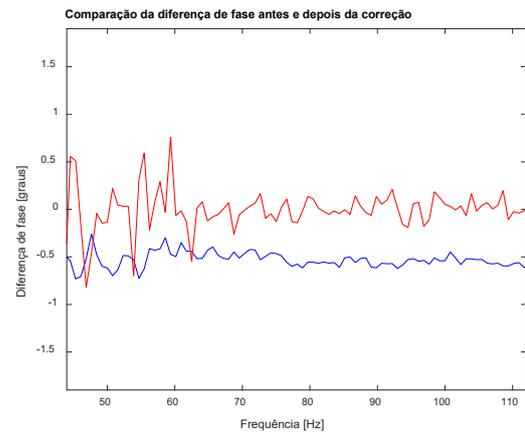


Figura A.58: R.6; M.8; dupla 1; dia 1.

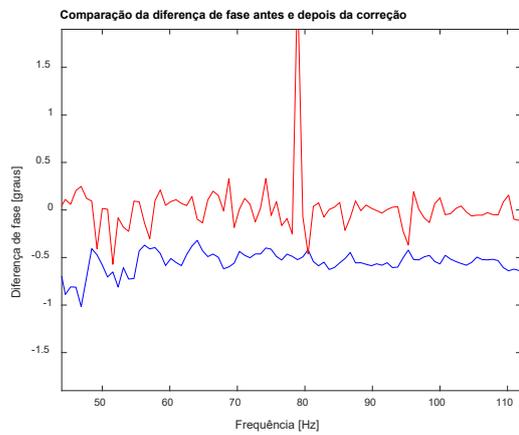


Figura A.59: R.6; M.9; dupla 1; dia 1.

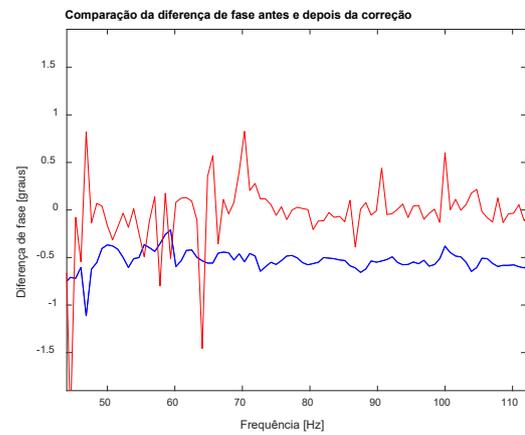


Figura A.60: R.6; M.10; dupla 1; dia 1.

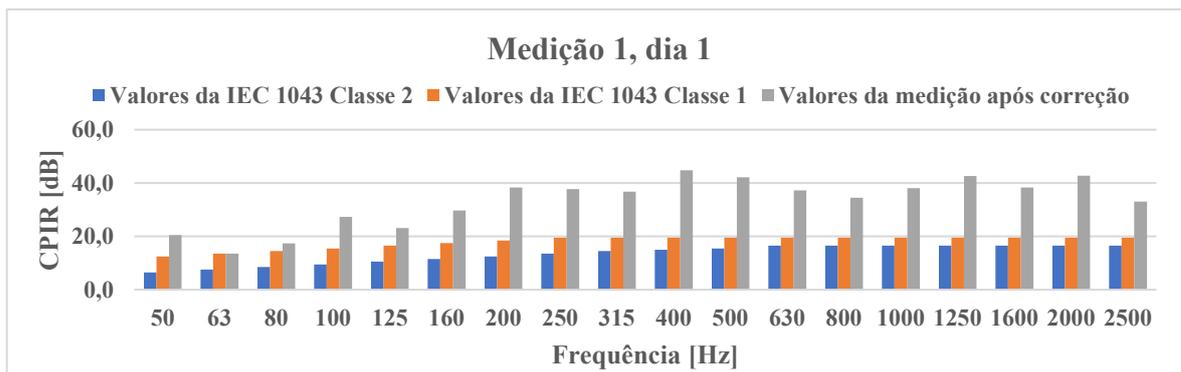


Figura A.61: Resultado 7; Medição 1; dupla 1; dia 1.

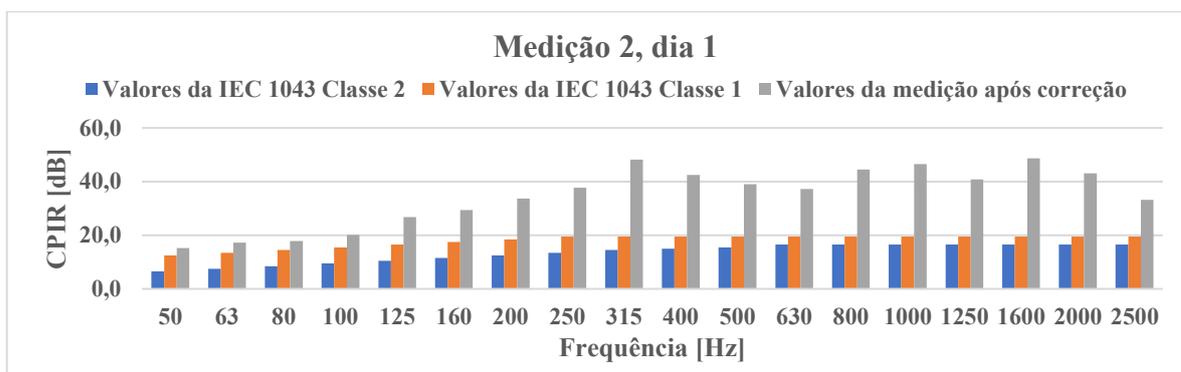


Figura A.62: Resultado 7; Medição 2; dupla 1; dia 1.

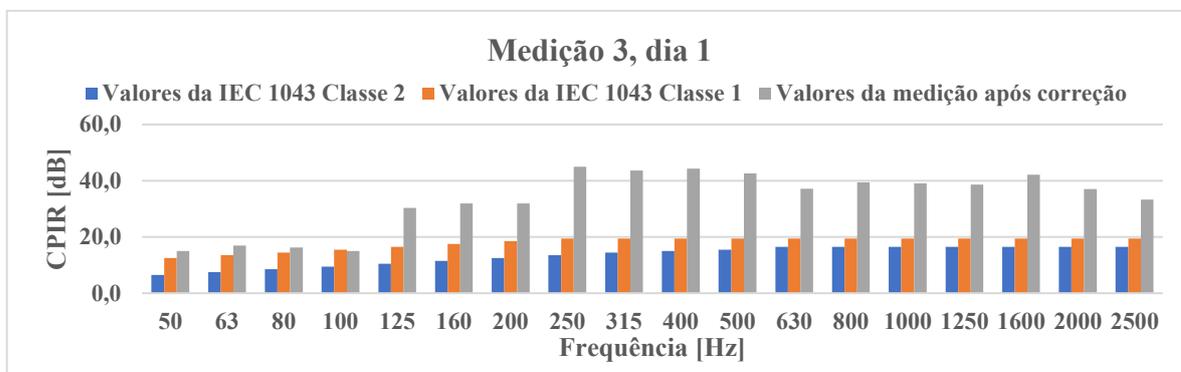


Figura A.63: Resultado 7; Medição 3; dupla 1; dia 1.

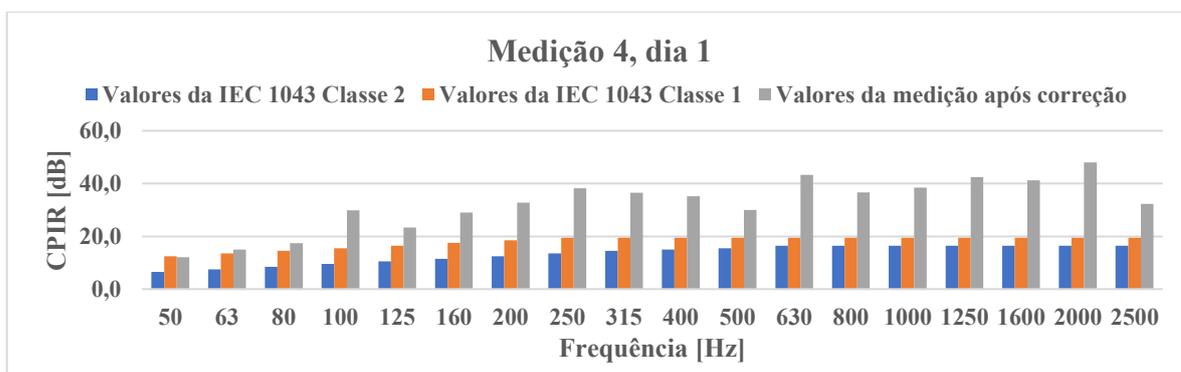


Figura A.64: Resultado 7; Medição 4; dupla 1; dia 1.

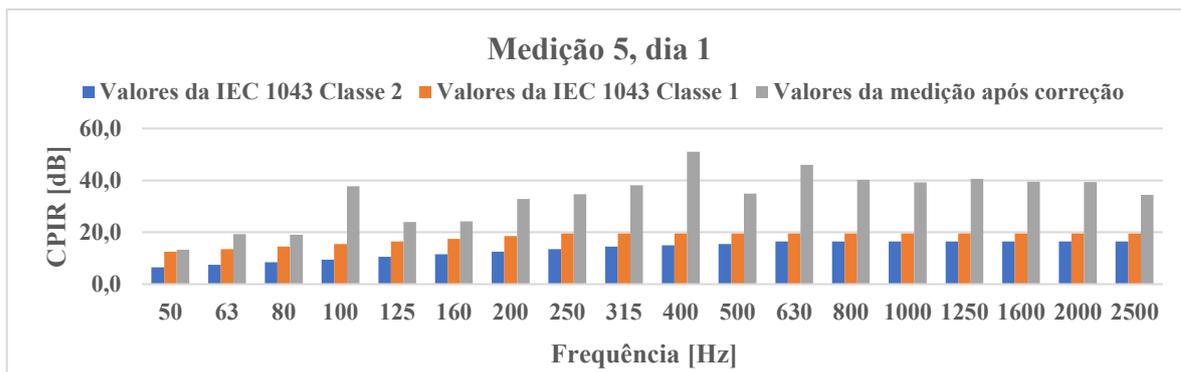


Figura A.65: Resultado 7; Medição 5; dupla 1; dia 1.

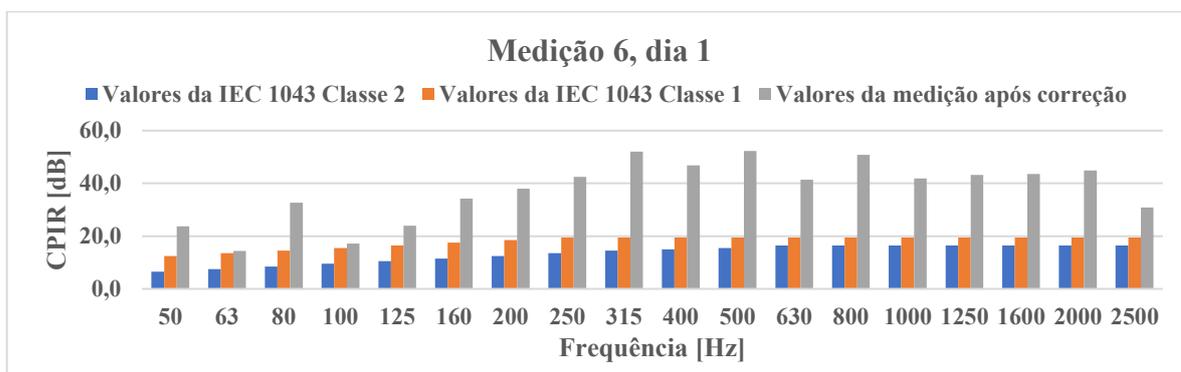


Figura A.66: Resultado 6; Medição 6; dupla 1; dia 1.

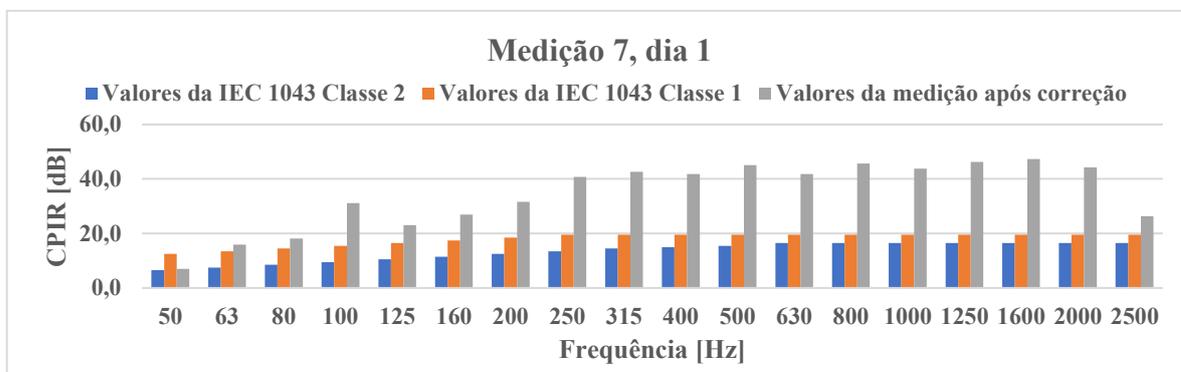


Figura A.67: Resultado 7; Medição 7; dupla 1; dia 1.

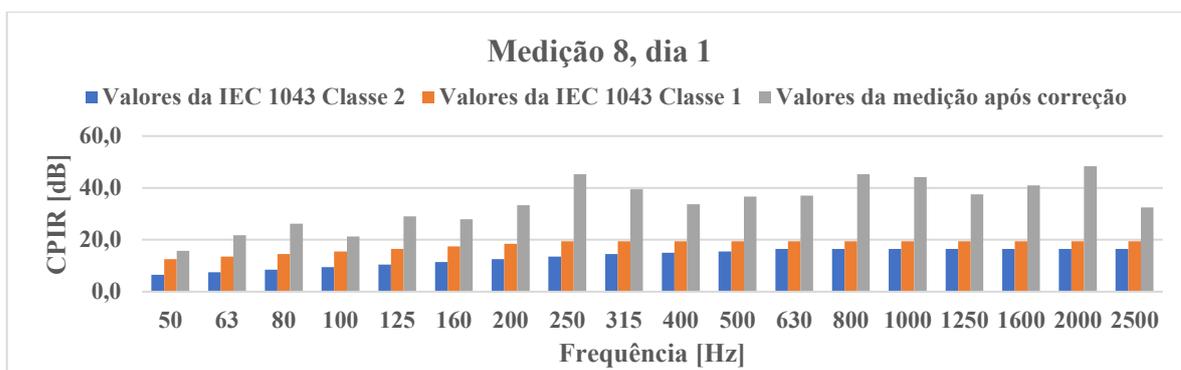


Figura A.68: Resultado 7; Medição 8; dupla 1; dia 1.

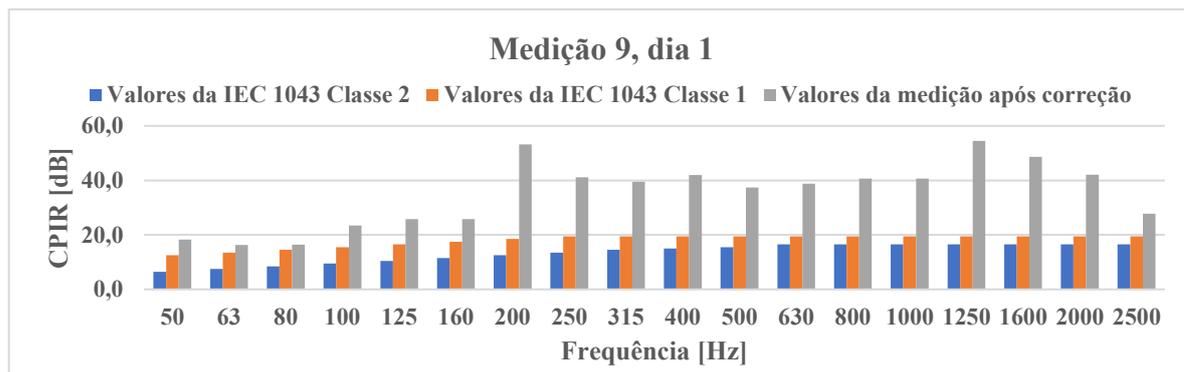


Figura A.69: Resultado 7; Medição 9; dupla 1; dia 1.

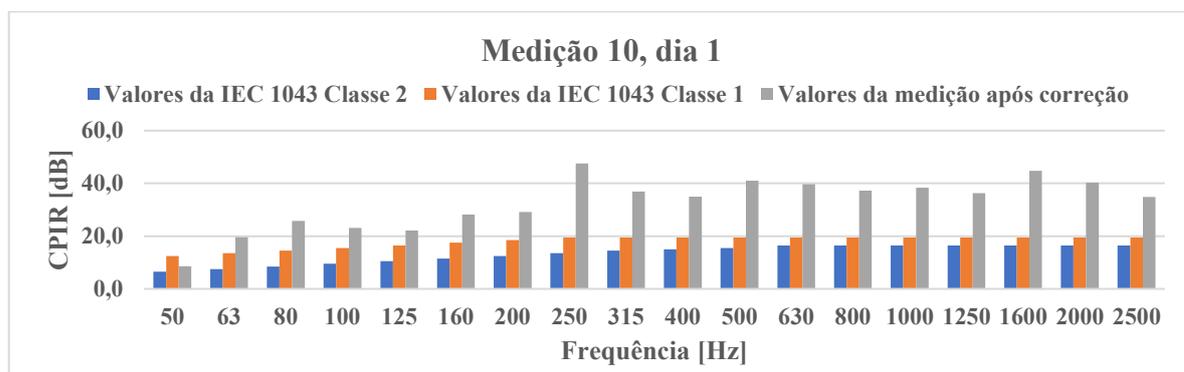


Figura A.70: Resultado 7; Medição 10; dupla 1; dia 1.

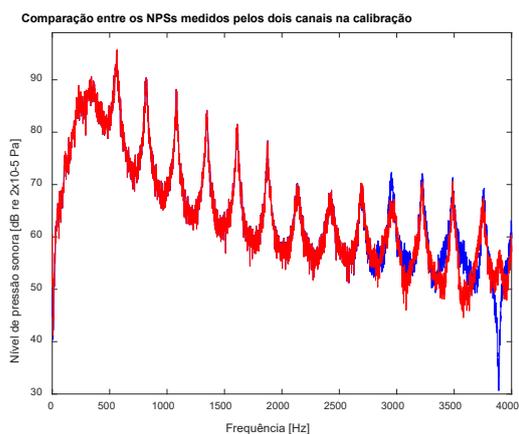


Figura A.71: R.1; M.1; dupla 1; dia 2.

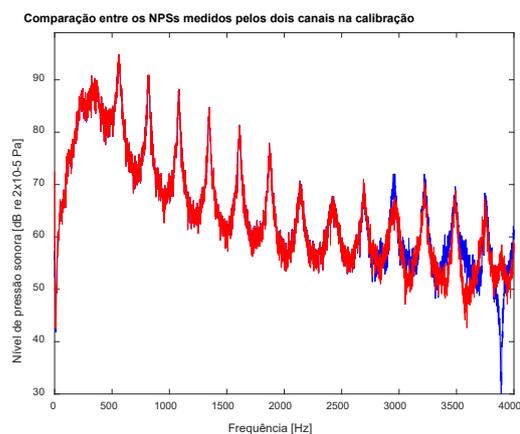


Figura A.72: R.1; M.2; dupla 1; dia 2.

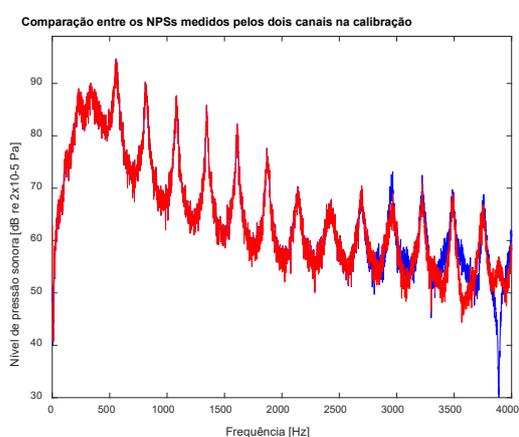


Figura A.73: R.1; Medição 3; dupla 1; dia 2.

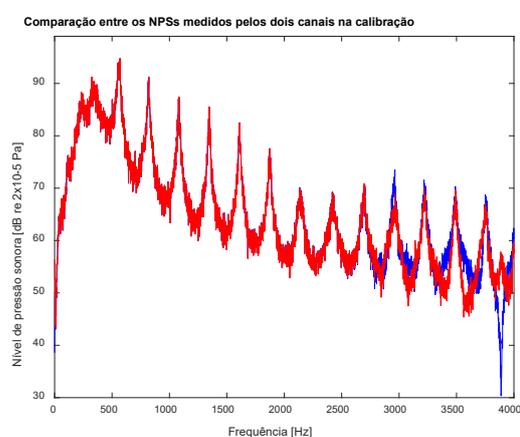


Figura A.74: R.1; M.4; dupla 1; dia 2.

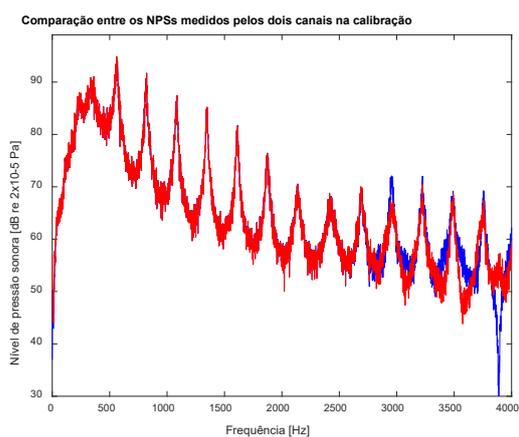


Figura A.75: R.1; M.5; dupla 1; dia 2.

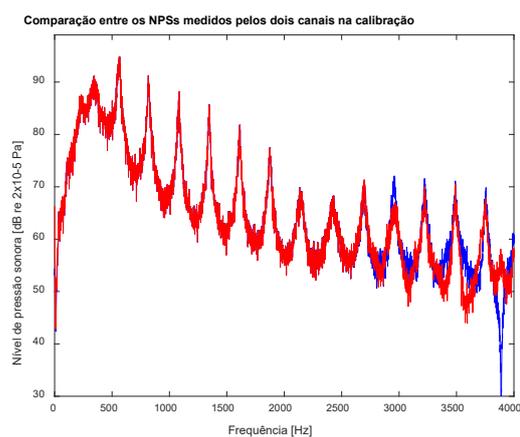


Figura A.76: R.1; M.6; dupla 1; dia 2.

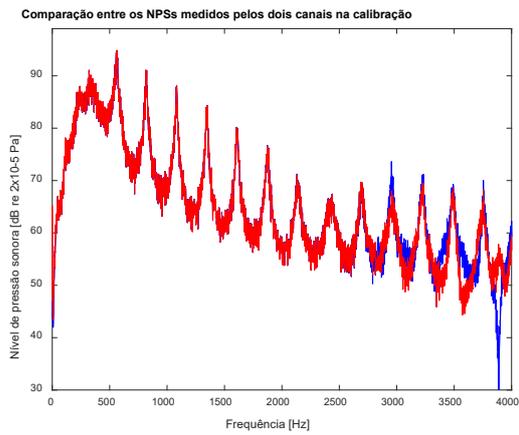


Figura A.77: R.1; M.7; dupla 1; dia 2.

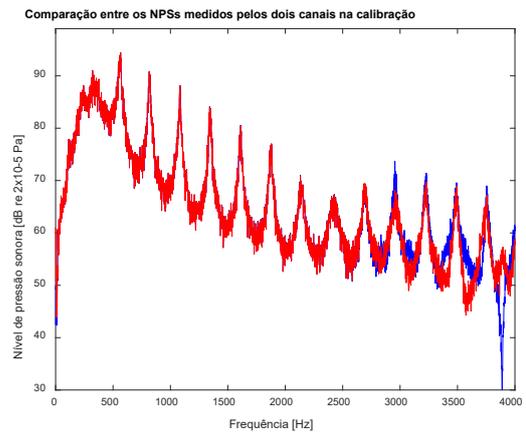


Figura A.78: R.1; M.8; dupla 1; dia 2.

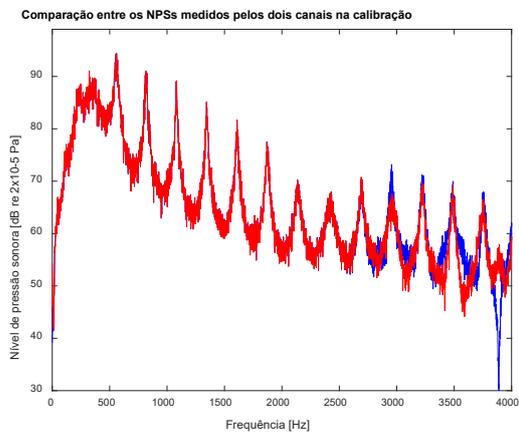


Figura A.79: R.1; M.9; dupla 1; dia 2.

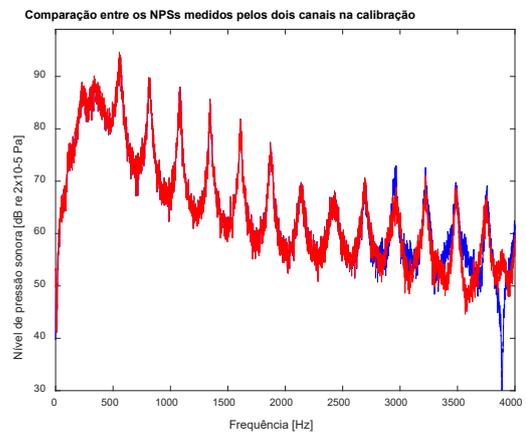


Figura A.80: R.1; M.10; dupla 1; dia 2.

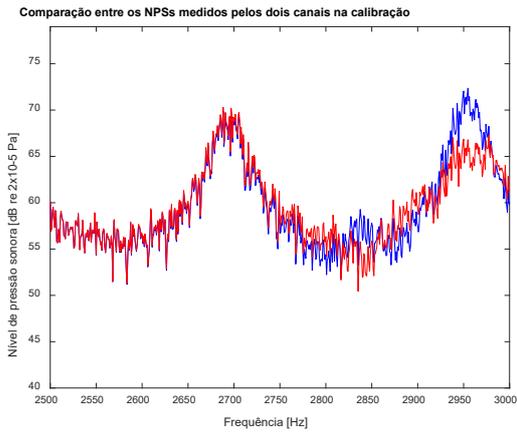


Figura A.81: R.2; M.1; dupla 1; dia 2.

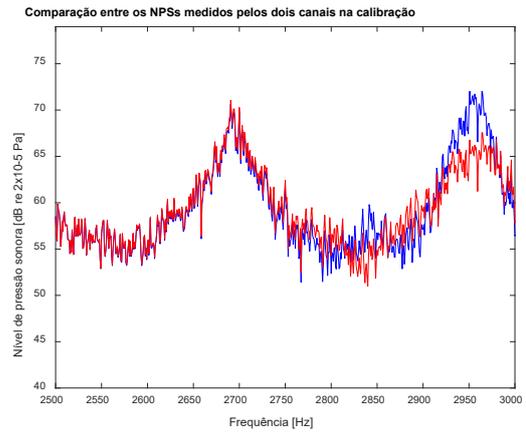


Figura A.82: R.2; M.2; dupla 1; dia 2.

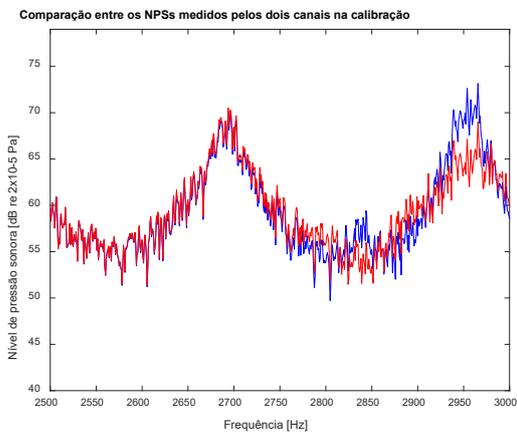


Figura A.83: R.2; M.3; dupla 1; dia 2.

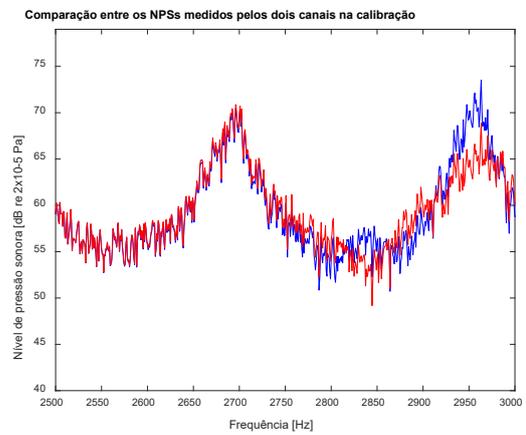


Figura A.84: R.2; M.4; dupla 1; dia 2.

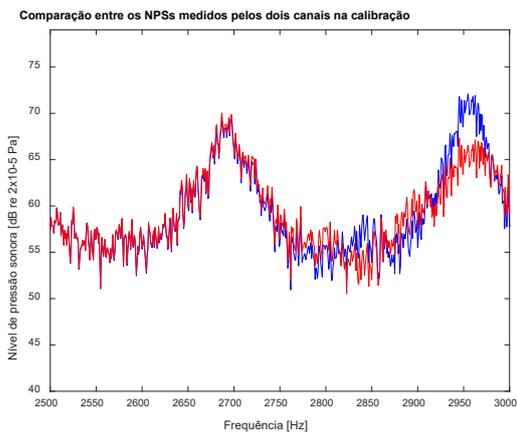


Figura A.85: R.2; M.5; dupla 1; dia 2.

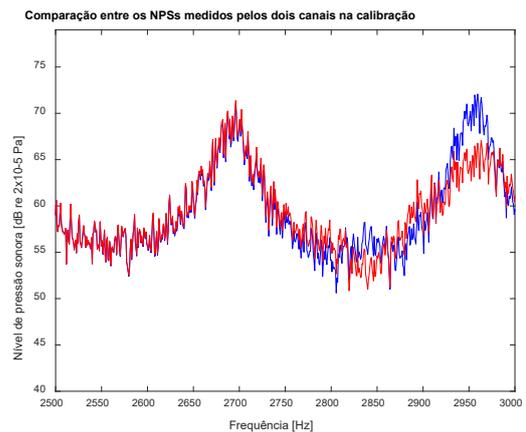


Figura A.86: R.2; M.6; dupla 1; dia 2.

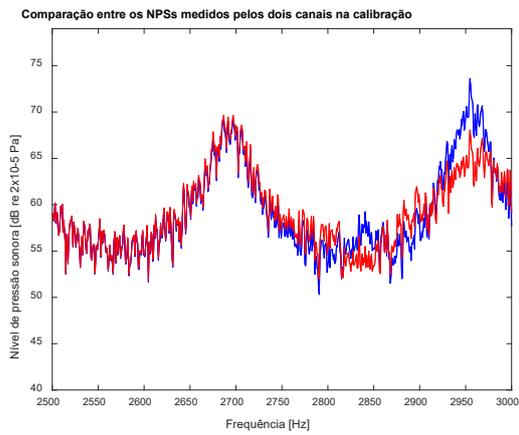


Figura A.87: R.2; M.7; dupla 1; dia 2.

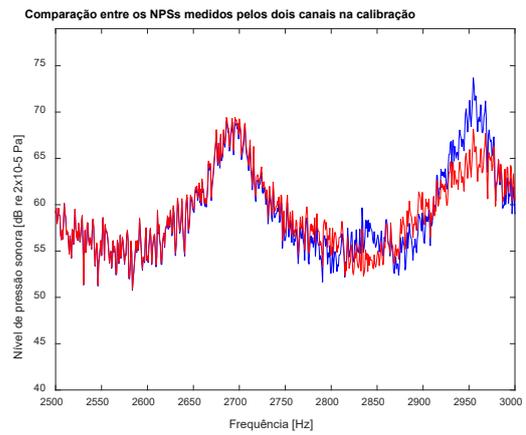


Figura A.88: R.2; M.8; dupla 1; dia 2.

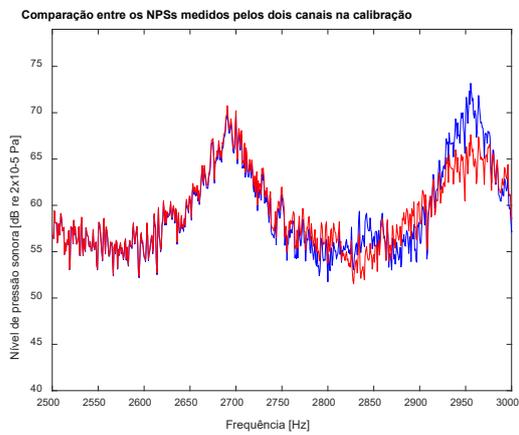


Figura A.89: R.2; M.9; dupla 1; dia 2.

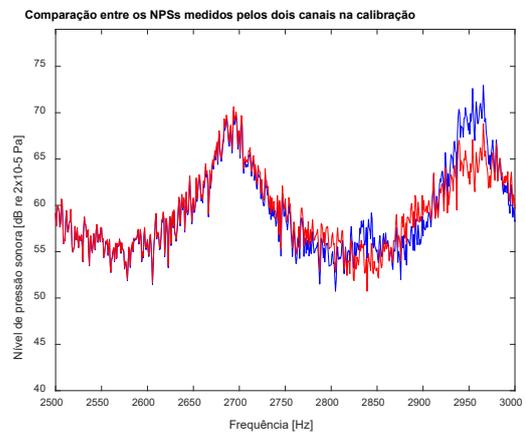


Figura A.90: R.2; M.10; dupla 1; dia 2.

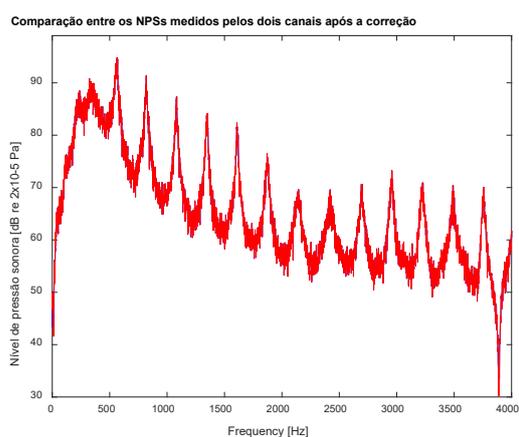


Figura A.91: R.3; M.1; dupla 1; dia 2.

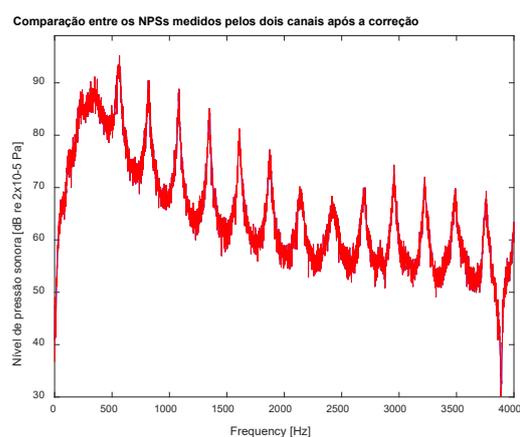


Figura A.92: R.3; M.2; dupla 1; dia 2.

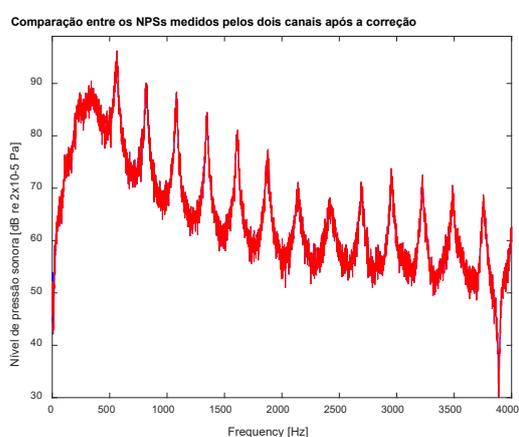


Figura A.93: R.3; M.3; dupla 1; dia 2.

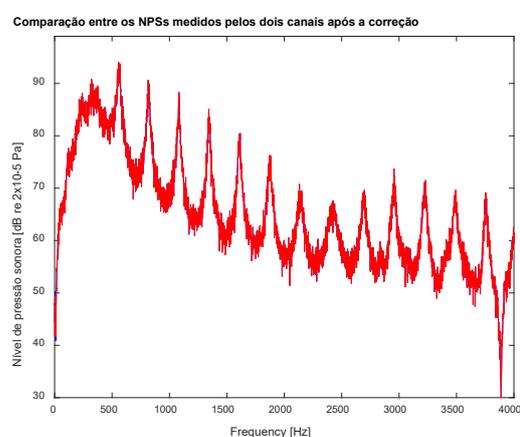


Figura A.94: R.3; M.4; dupla 1; dia 2.

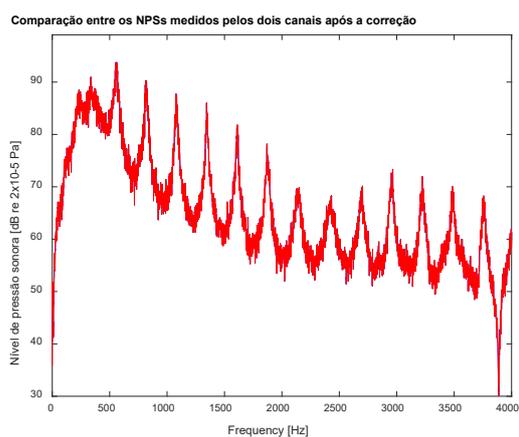


Figura A.95: R.3; M.5; dupla 1; dia 2.

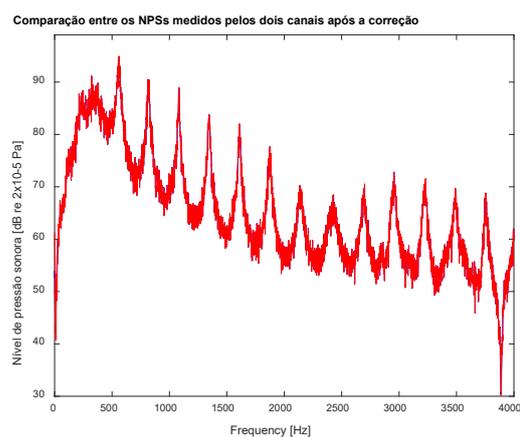


Figura A.96: R.3; M.6; dupla 1; dia 2.

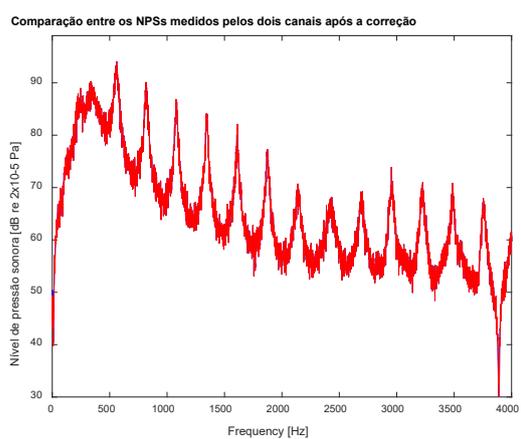


Figura A.97: R.3; M.7; dupla 1; dia 2.

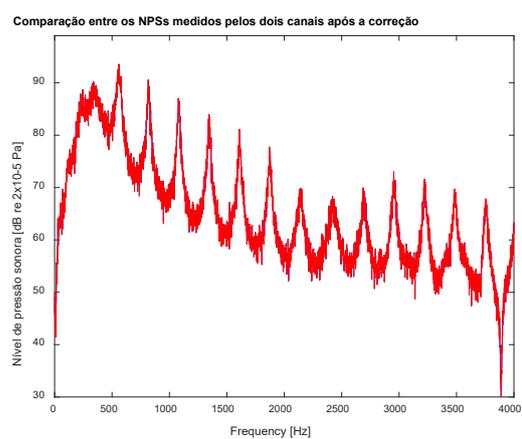


Figura A.98: R.3; M.8; dupla 1; dia 2.

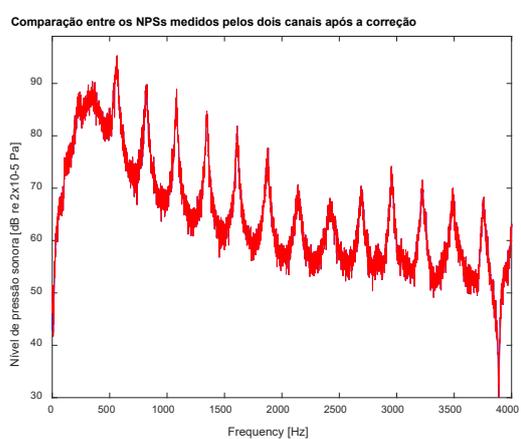


Figura A.99: R.3; M.9; dupla 1; dia 2.

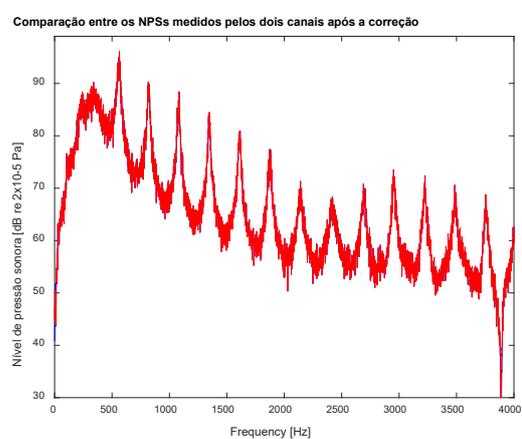


Figura A.100: R.3; M.10; dupla 1; dia 2.

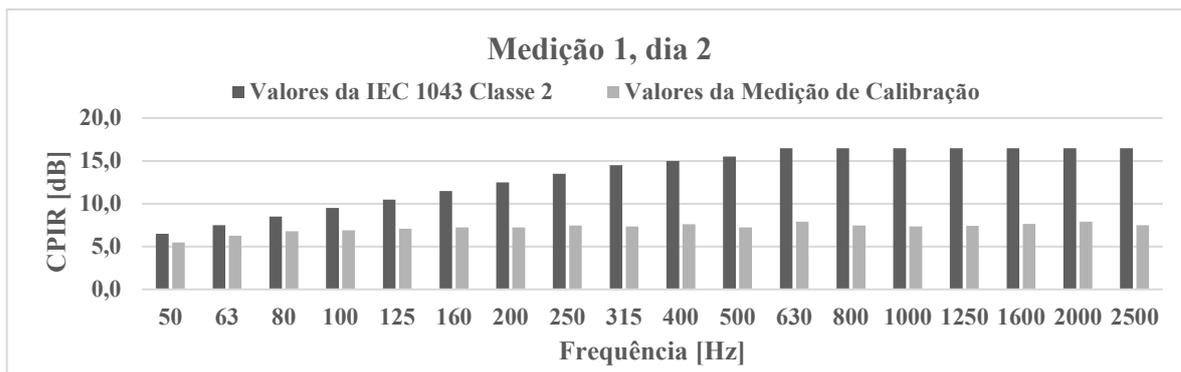


Figura A.101: Resultado 4; Medição 1; dupla 1; dia 2.

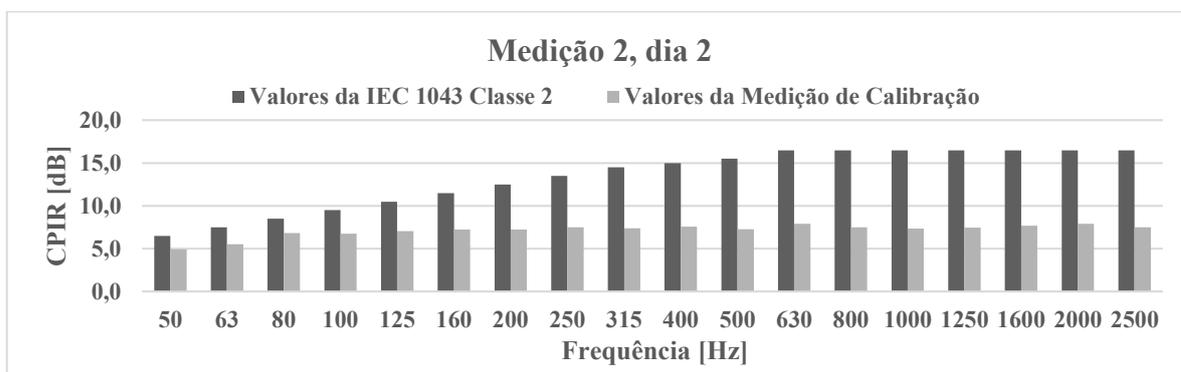


Figura A.102: Resultado 4; Medição 2; dupla 1; dia 2.

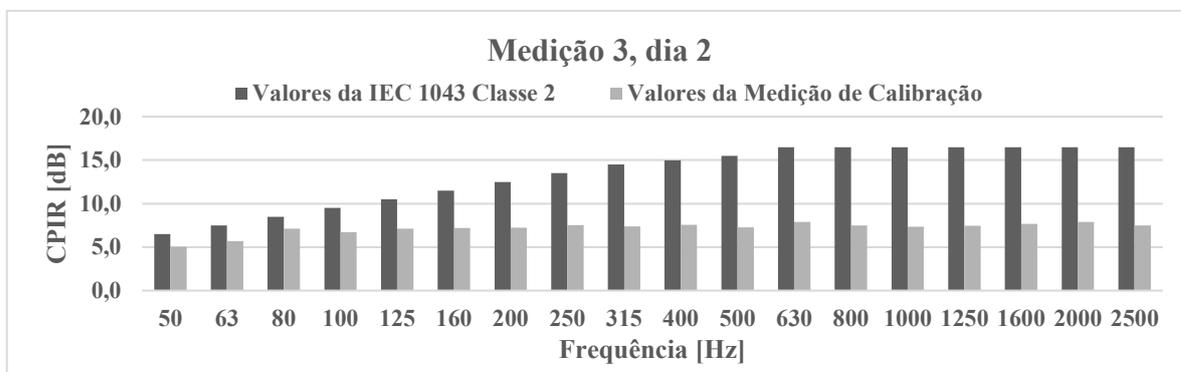


Figura A.103: Resultado 4; Medição 3; dupla 1; dia 2.

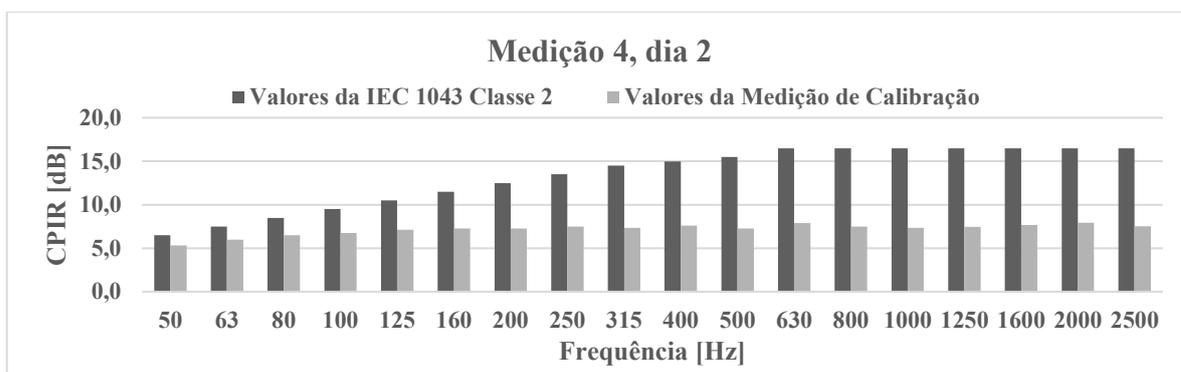


Figura A.104: Resultado 4; Medição 4; dupla 1; dia 2.

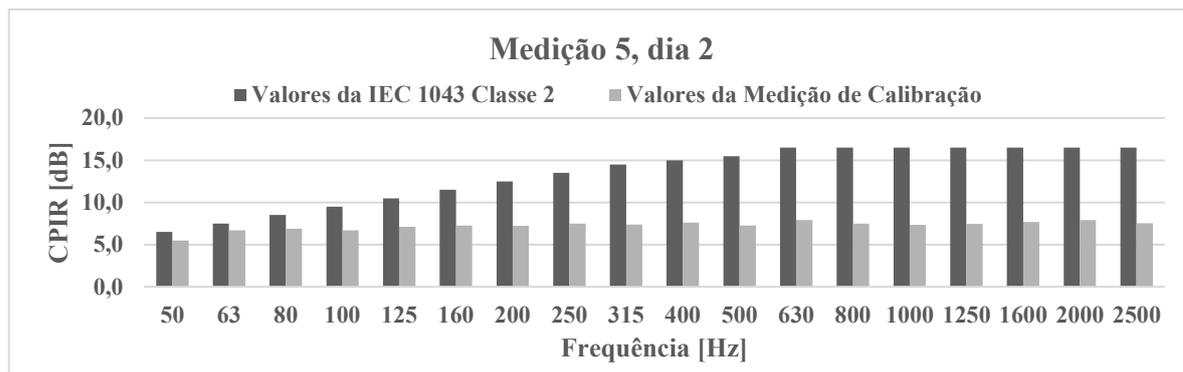


Figura A.105: Resultado 4; Medição 5; dupla 1; dia 2.

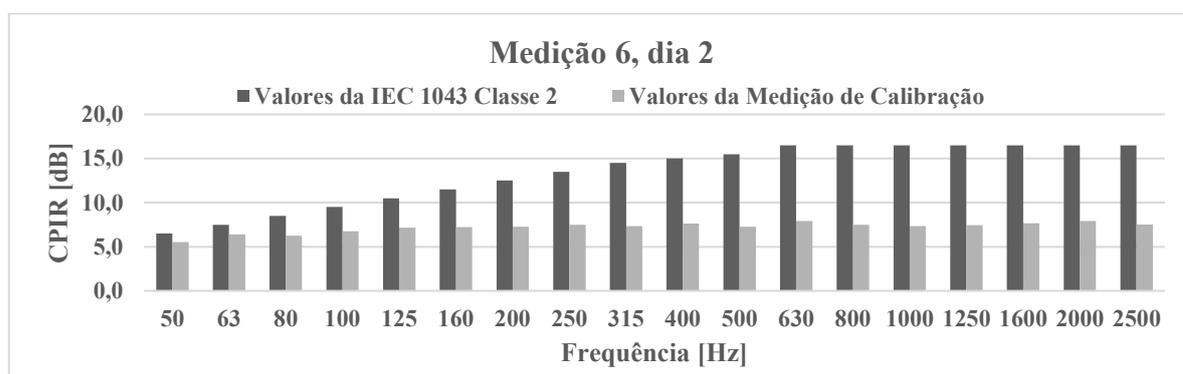


Figura A.106: Resultado 4; Medição 6; dupla 1; dia 2.

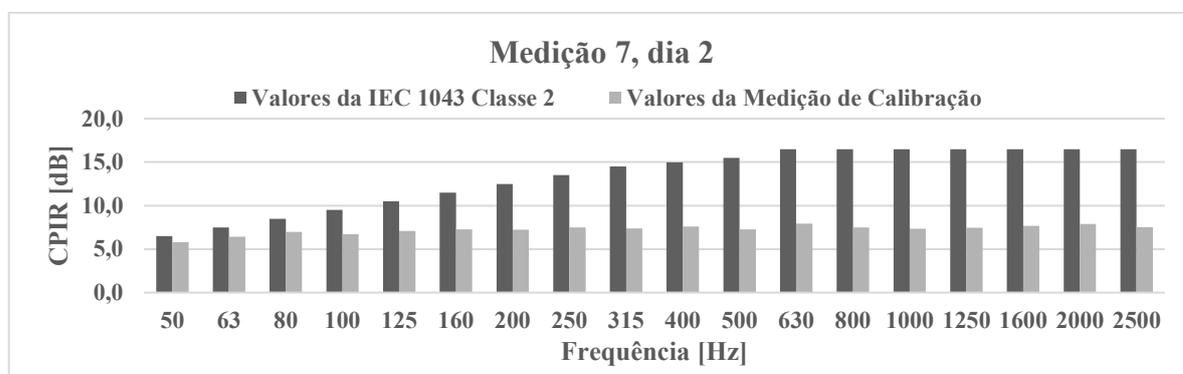


Figura A.107: Resultado 4; Medição 7; dupla 1; dia 2.

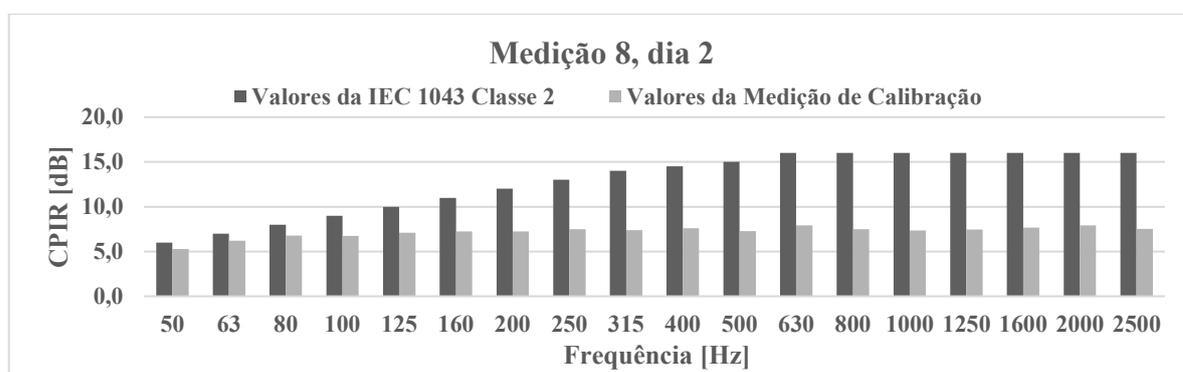


Figura A.108: Resultado 4; Medição 8; dupla 1; dia 2.

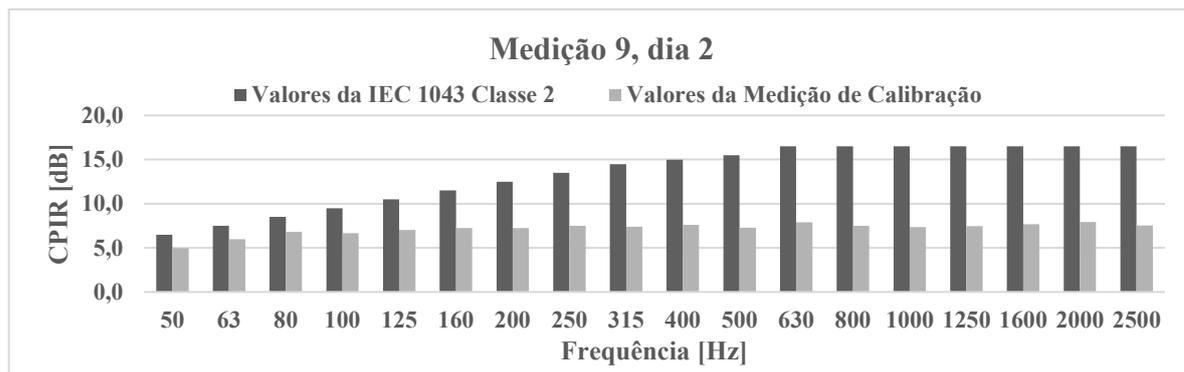


Figura A.109: Resultado 4; Medição 9; dupla 1; dia 2.

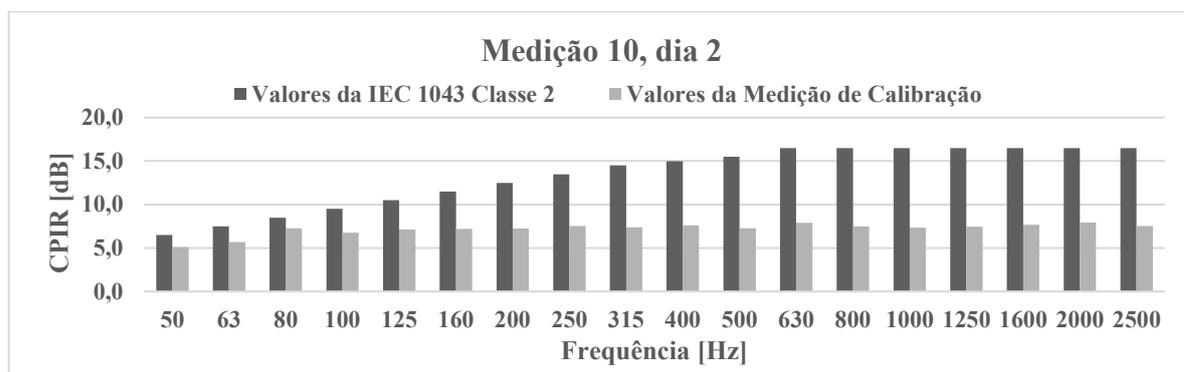


Figura A.110: Resultado 4; Medição 10; dupla 1; dia 2.

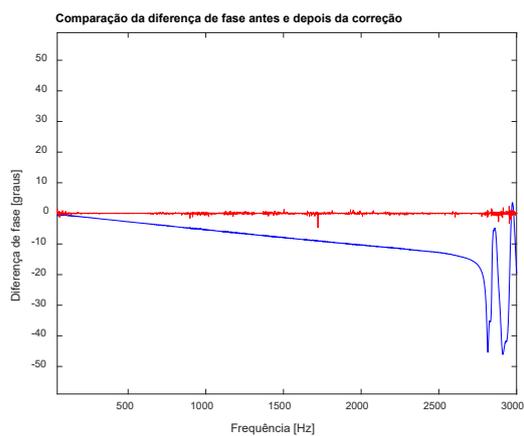


Figura A.111: R.5; M.1; dupla 1; dia 2.

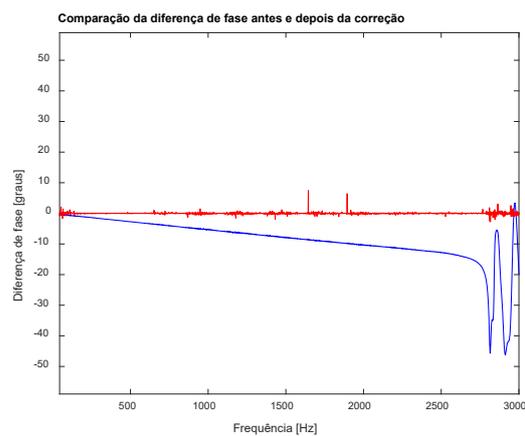


Figura A.112: R.5; M.2; dupla 1; dia 2.

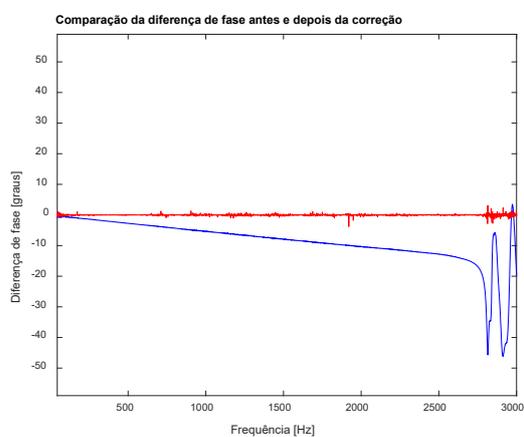


Figura A.113: R.5; M.3; dupla 1; dia 2.

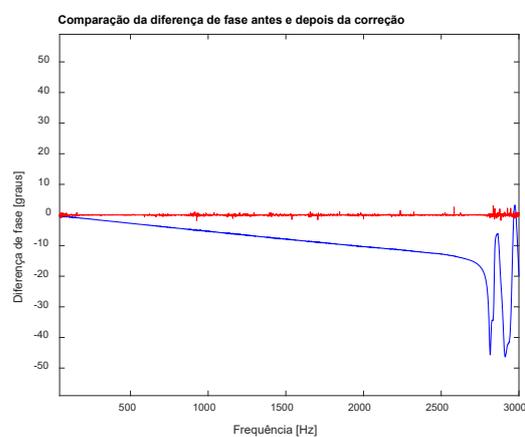


Figura A.114: R.5; M.4; dupla 1; dia 2.

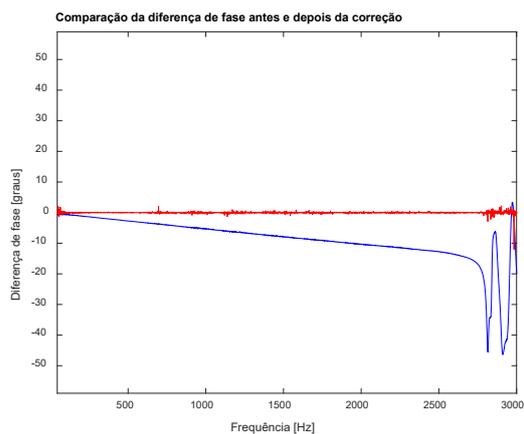


Figura A.115: R.5; M.5; dupla 1; dia 2.

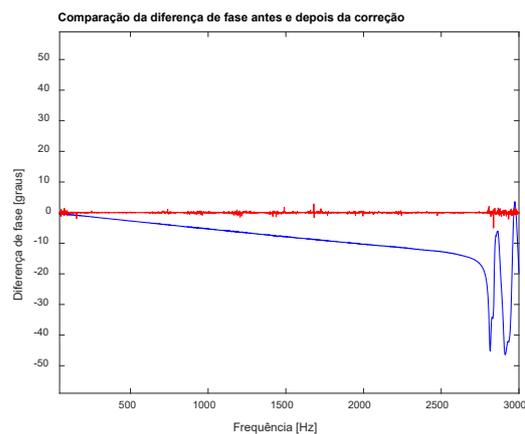


Figura A.116: R.5; M.6; dupla 1; dia 2.

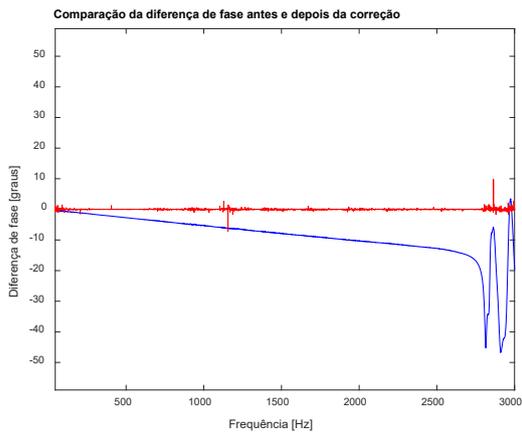


Figura A.117: R.5; M.7; dupla 1; dia 2.

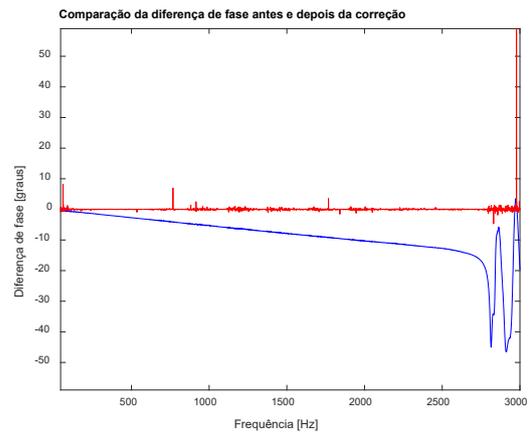


Figura A.118: R.5; M.8; dupla 1; dia 2.

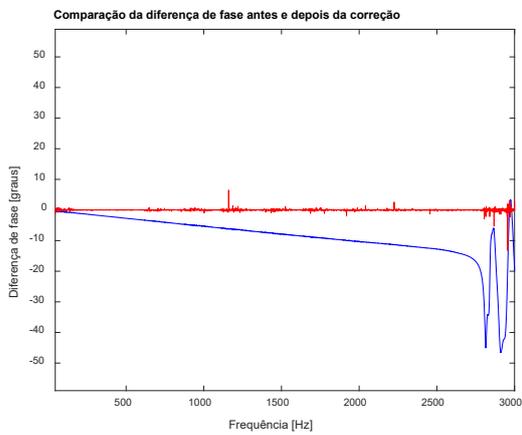


Figura A.119: R.5; M.9; dupla 1; dia 2.

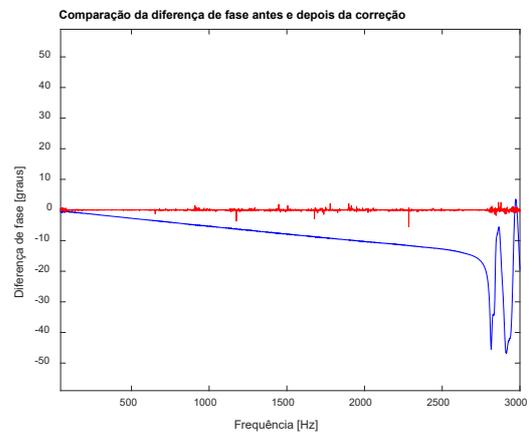


Figura A.120: R.5; M.10; dupla 1; dia 2.

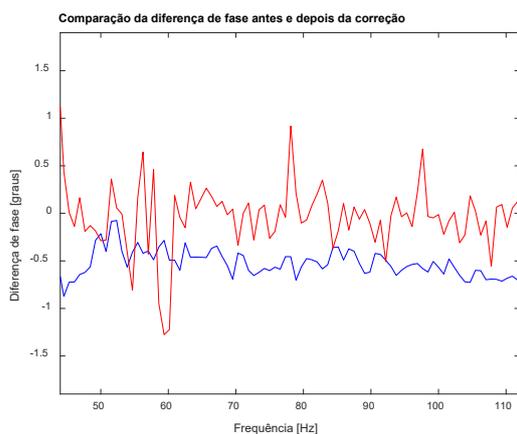


Figura A.121: R.6; M.1; dupla 1; dia 2.

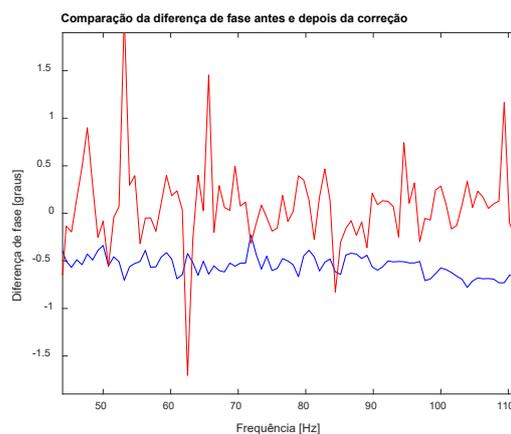


Figura A.122: R.6; M.2; dupla 1; dia 2.

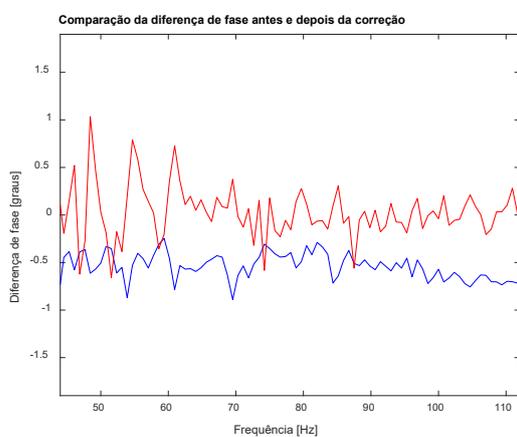


Figura A.123: R.6; M.3; dupla 1; dia 2.

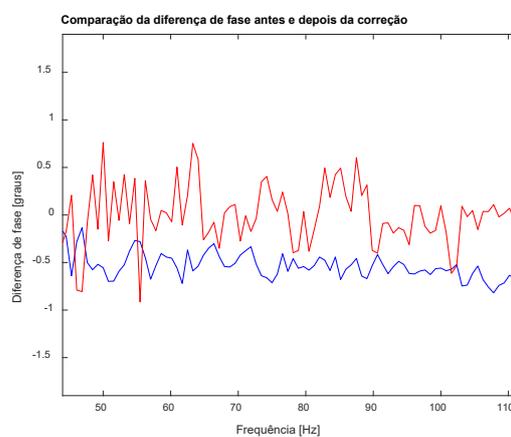


Figura A.124: R.6; M.4; dupla 1; dia 2.

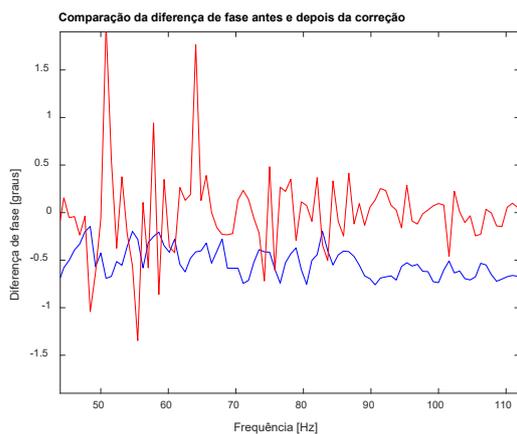


Figura A.125: R.6; M.5; dupla 1; dia 2.

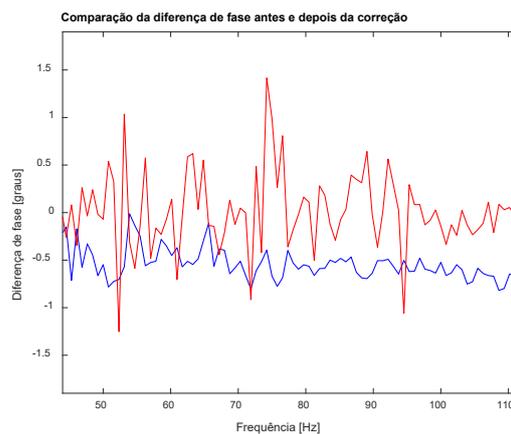


Figura A.126: R.6; M.6; dupla 1; dia 2.

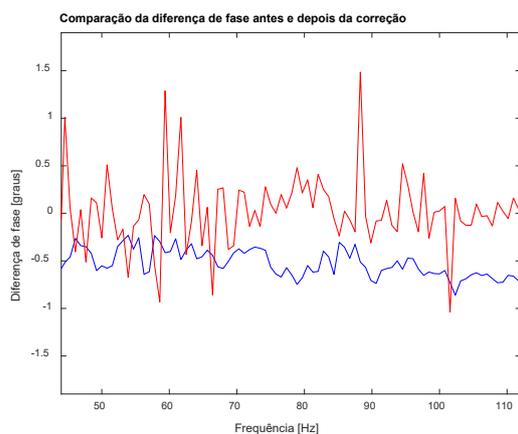


Figura A.127: R.6; M.7; dupla 1; dia 2.

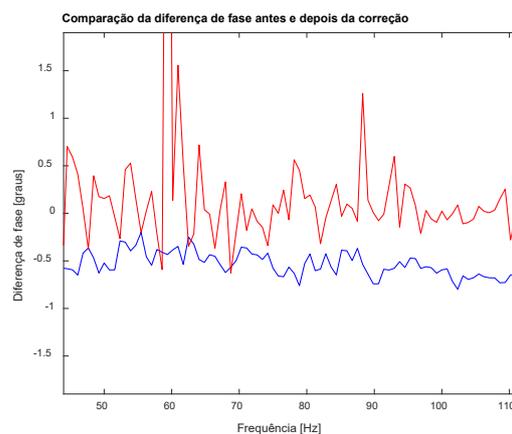


Figura A.128: R.6; M.8; dupla 1; dia 2.

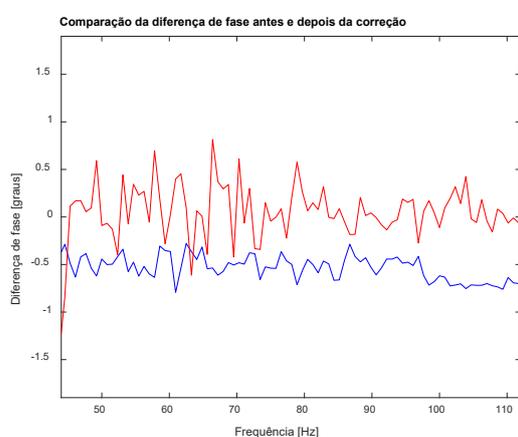


Figura A.129: R.6; M.9; dupla 1; dia 2.

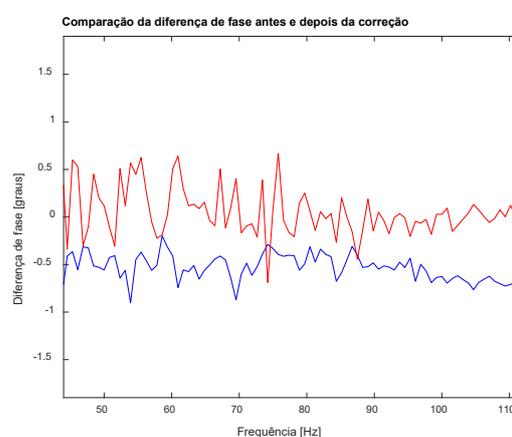


Figura A.130: R.6; M.10; dupla 1; dia 2.

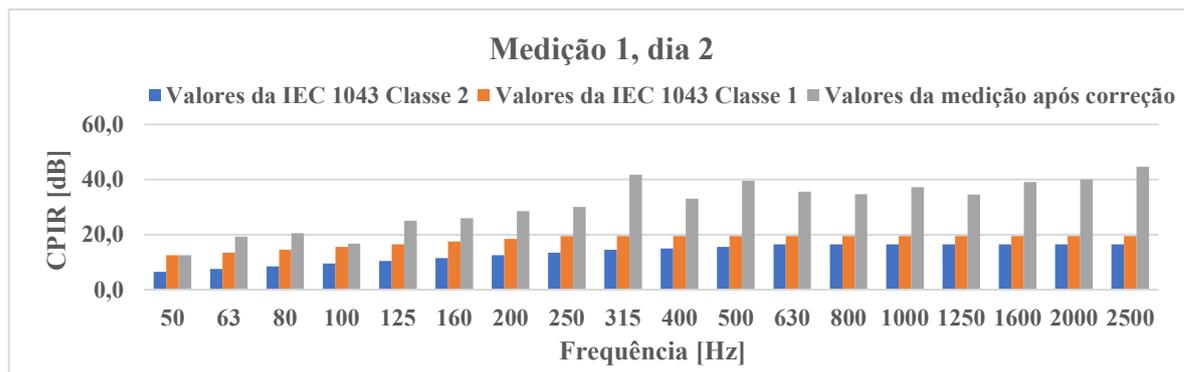


Figura A.131: Resultado 7; Medição 1; dupla 1; dia 2.

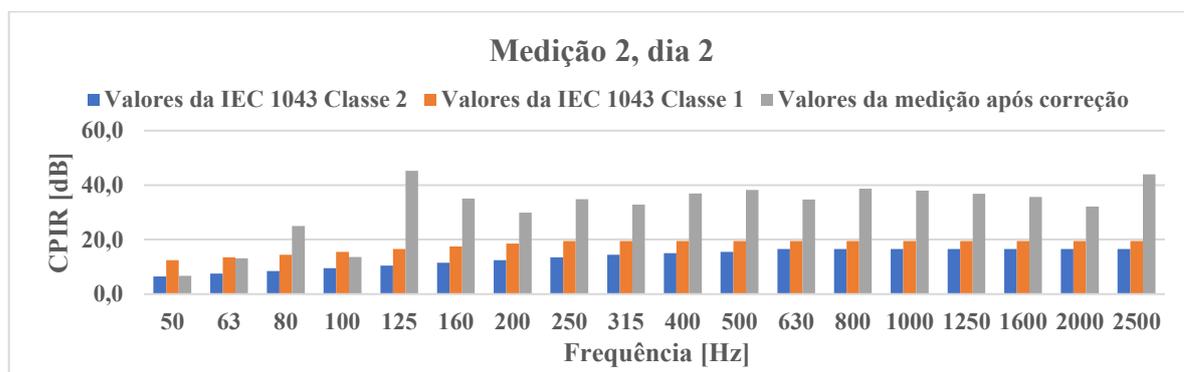


Figura A.132: Resultado 7; Medição 2; dupla 1; dia 2.

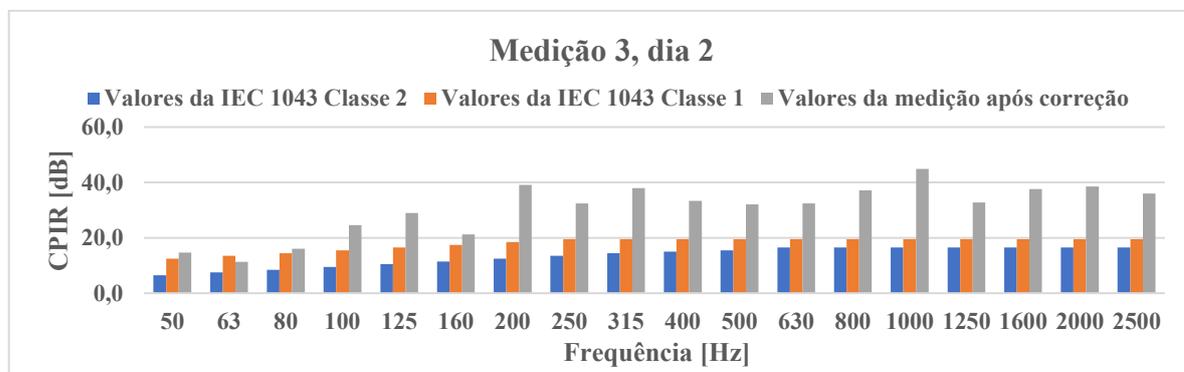


Figura A.133: Resultado 7; Medição 3; dupla 1; dia 2.

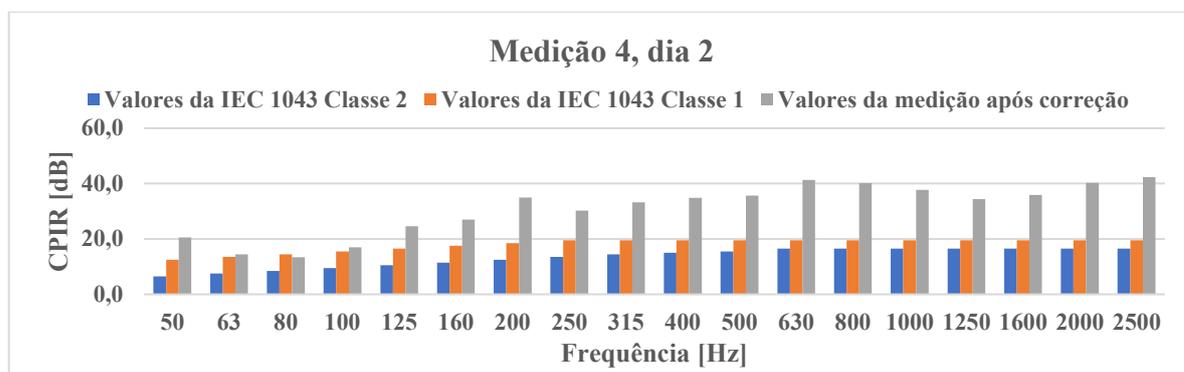


Figura A.134: Resultado 7; Medição 4; dupla 1; dia 2.

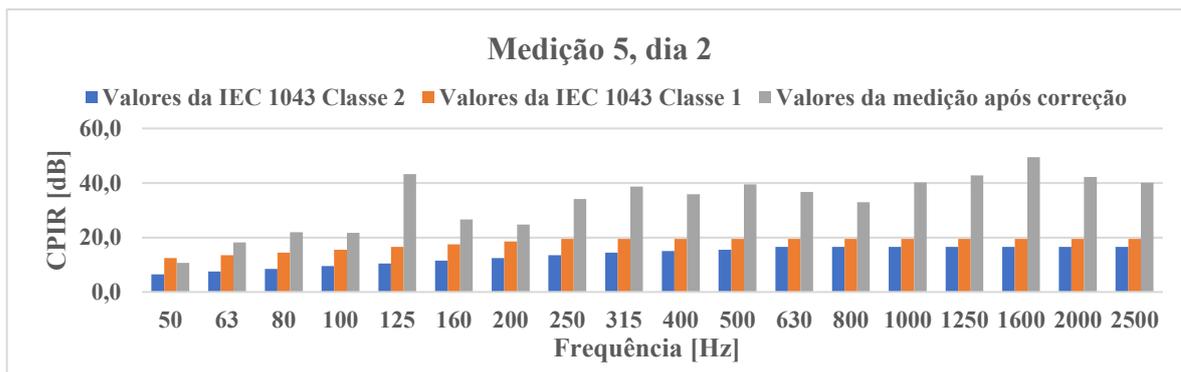


Figura A.135: Resultado 7; Medição 5; dupla 1; dia 2.

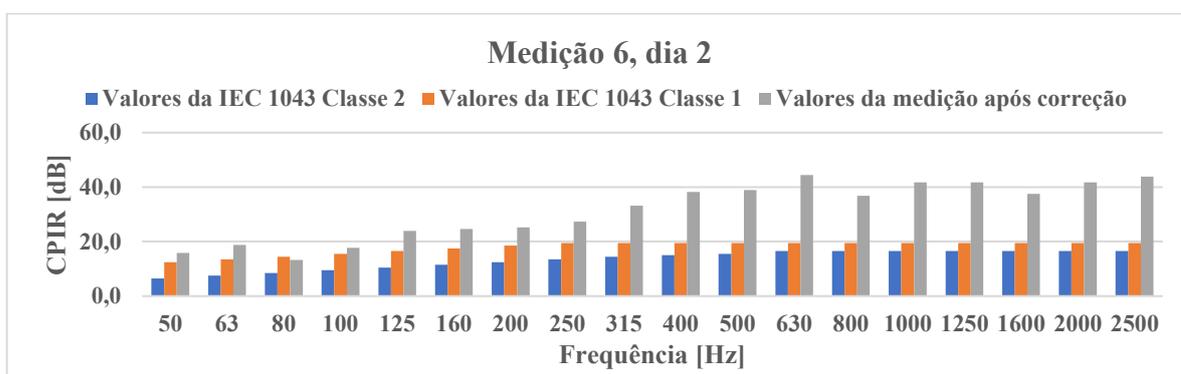


Figura A.136: Resultado 7; Medição 6; dupla 1; dia 2.

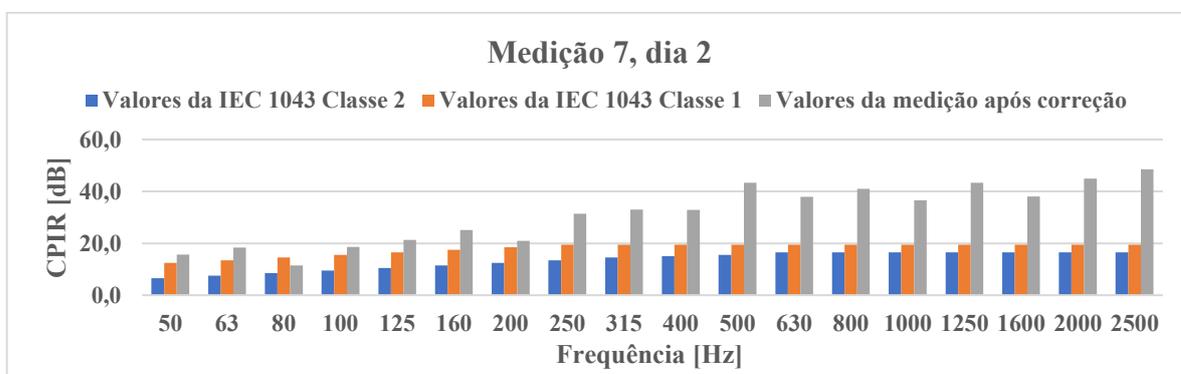


Figura A.137: Resultado 7; Medição 7; dupla 1; dia 2.

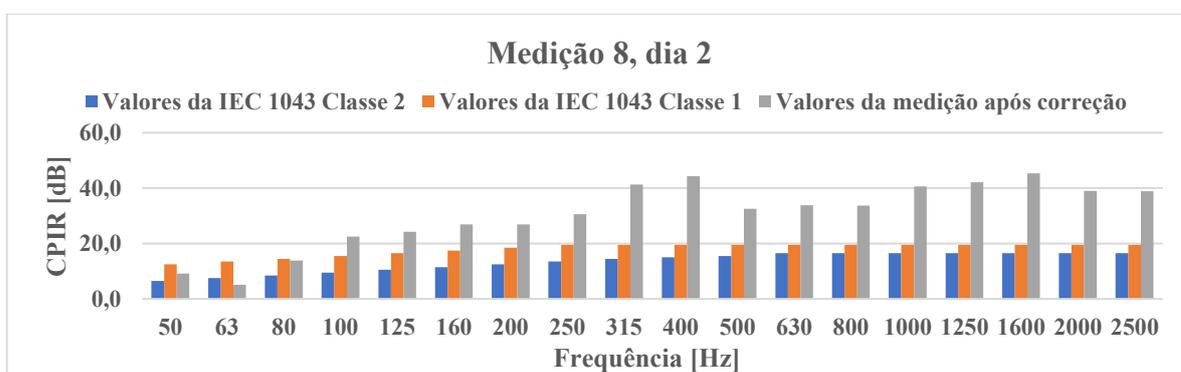


Figura A.138: Resultado 7; Medição 8; dupla 1; dia 2.

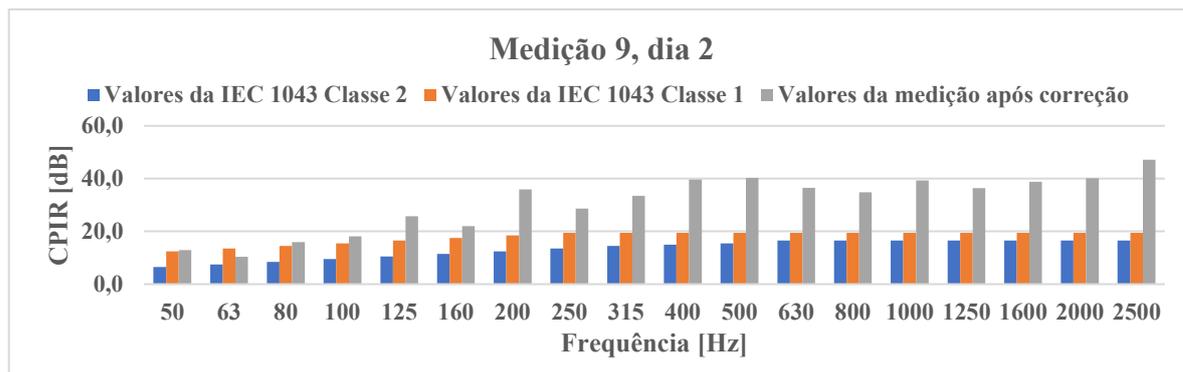


Figura A.139: Resultado 7; Medição 9; dupla 1; dia 2.

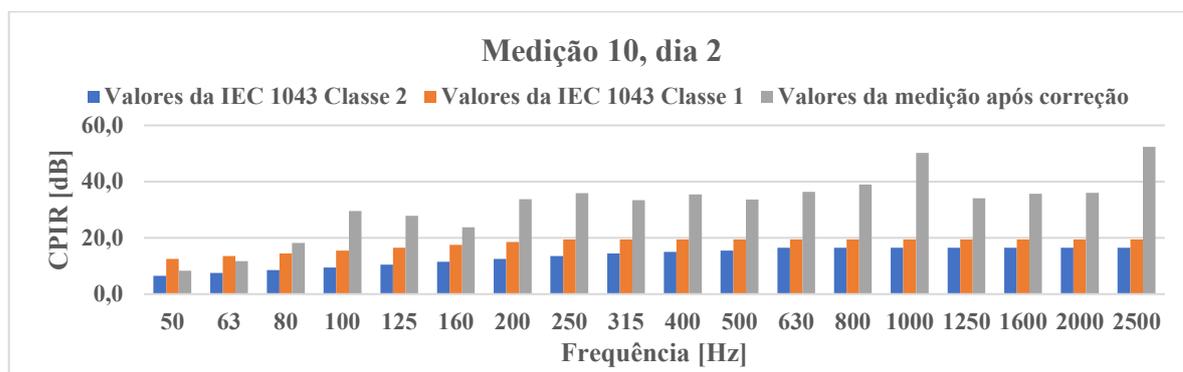


Figura A.140: Resultado 7; Medição 10; dupla 1; dia 2.

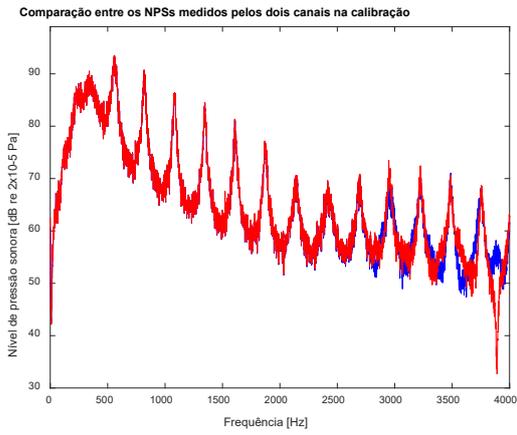


Figura A.141: R.1; M.1; dupla 2.

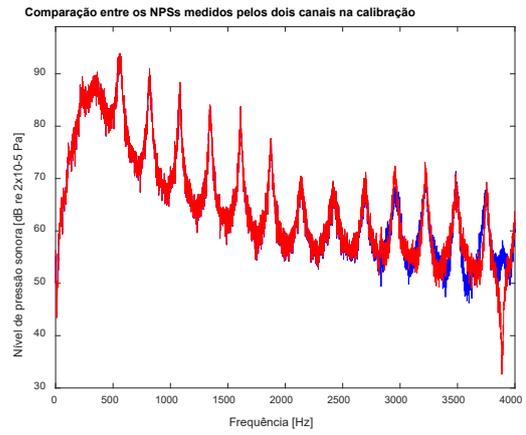


Figura A.142: R.1; M.2; dupla 2.

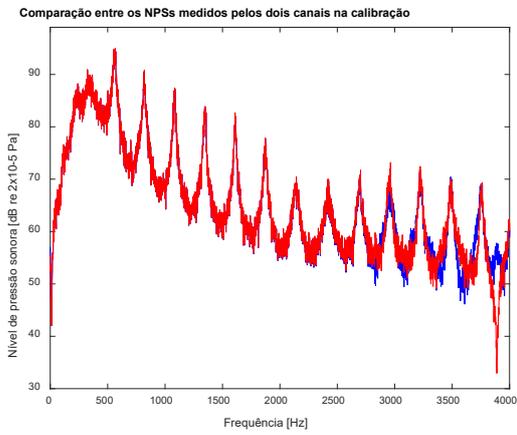


Figura A.143: R.1; M.3; dupla 2.

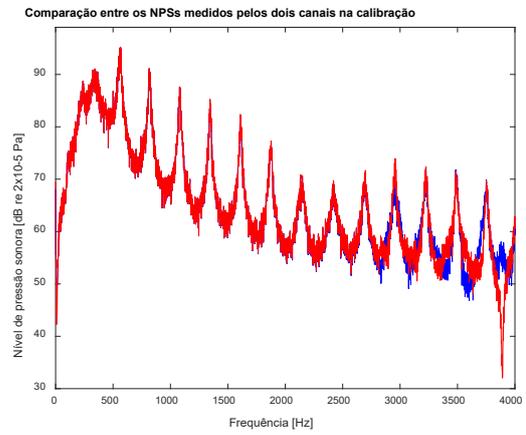


Figura A.144: R.1; M.4; dupla 2.

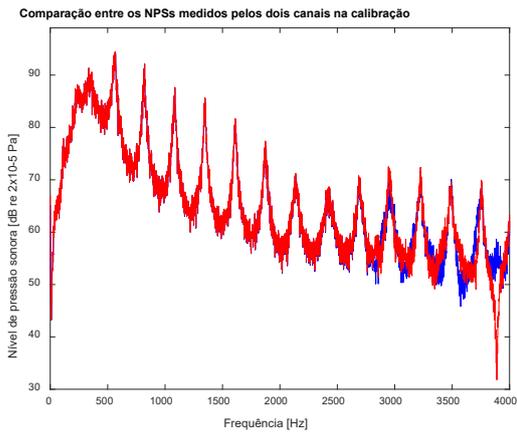


Figura A.145: R.1; M.5; dupla 2.

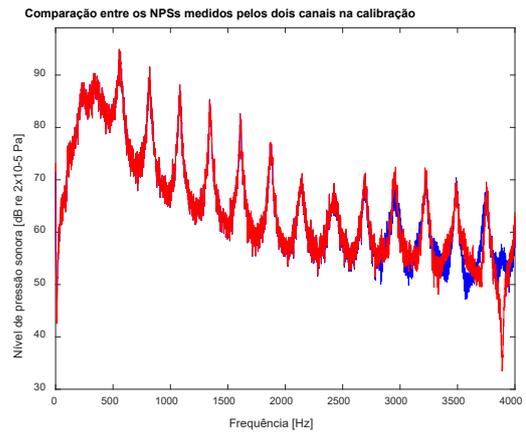


Figura A.146: R.1; M.6; dupla 2.

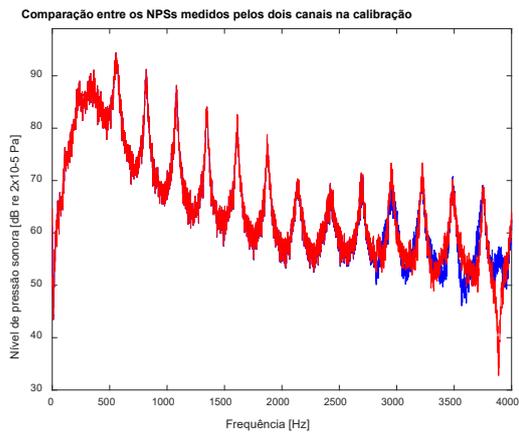


Figura A.147: R.1; M.7; dupla 2.

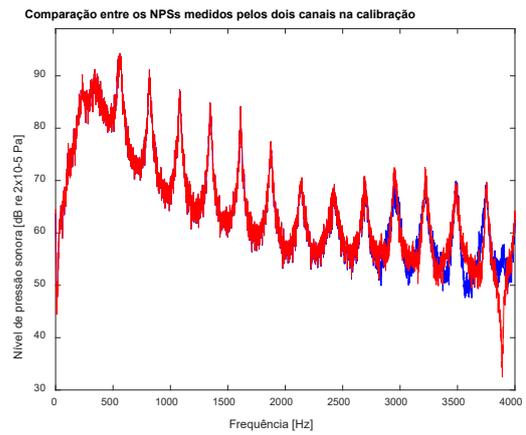


Figura A.148: R.1; M.8; dupla 2.

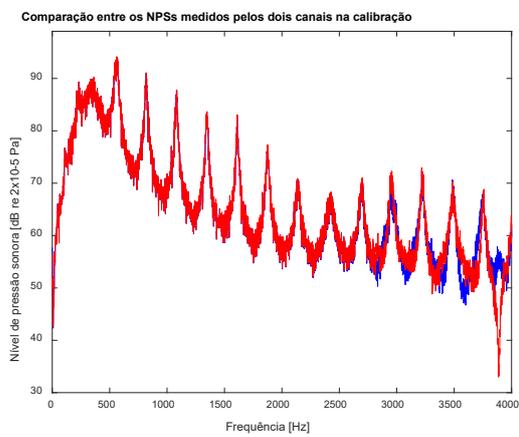


Figura A.149: R.1; M.9; dupla 2.

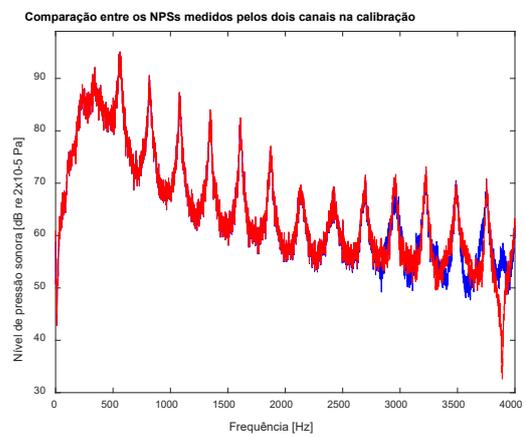


Figura A.150: R.1; M.10; dupla 2.

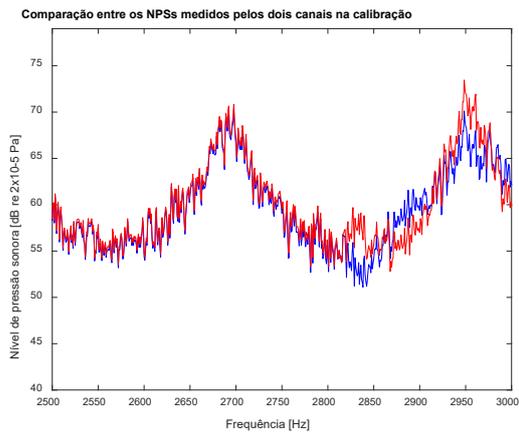


Figura A.151: R.2; M.1; dupla 2.

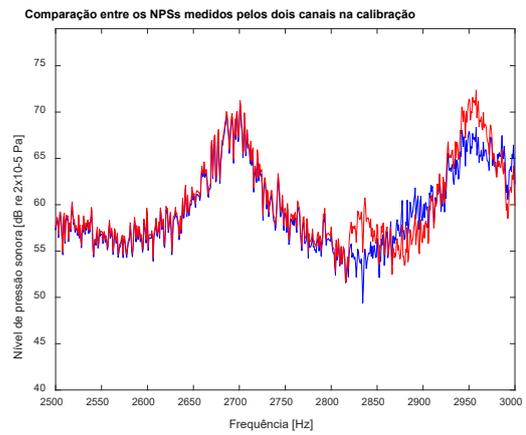


Figura A.152: R.2; M.2; dupla 2.

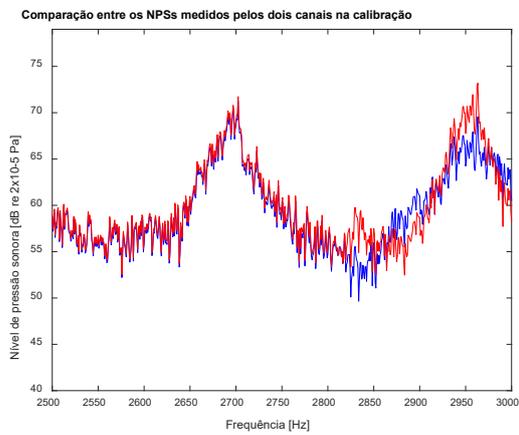


Figura A.153: R.2; M.3; dupla 2.

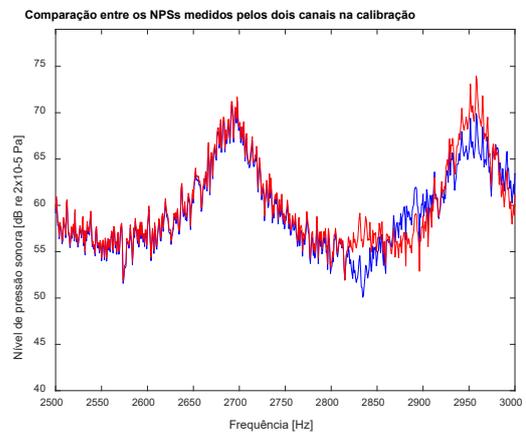


Figura A.154: R.2; M.4; dupla 2.

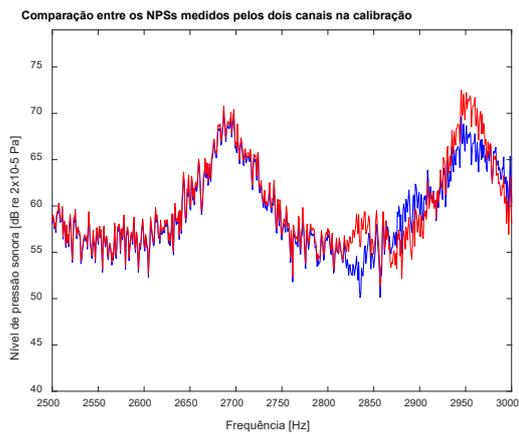


Figura A.155: R.2; M.5; dupla 2.

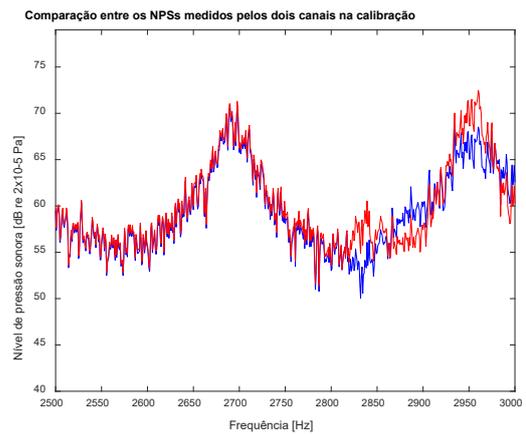


Figura A.156: R.2; M.6; dupla 2.

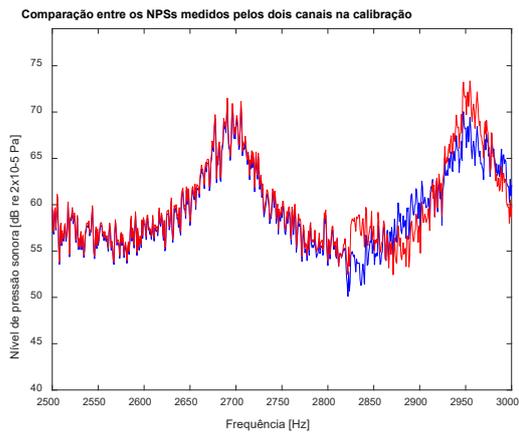


Figura A.157: R.2; M.7; dupla 2.

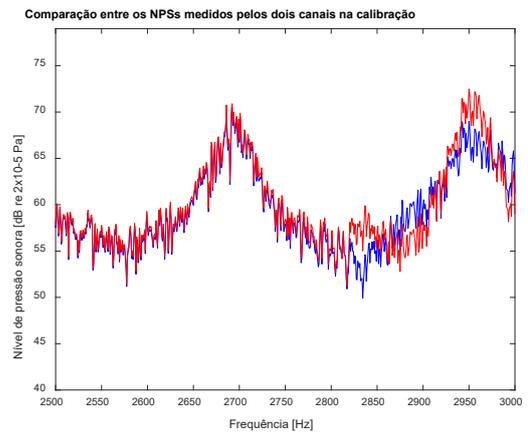


Figura A.158: R.2; M.8; dupla 2.

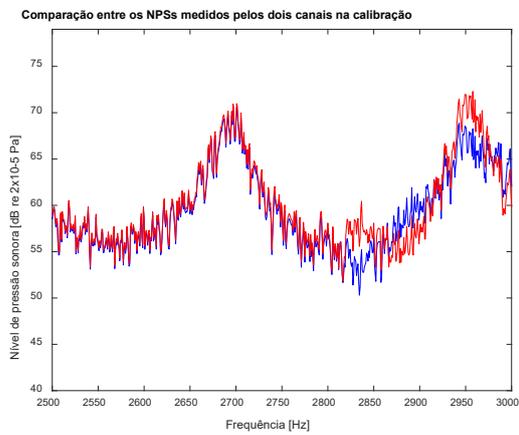


Figura A.159: R.2; M.9; dupla 2.

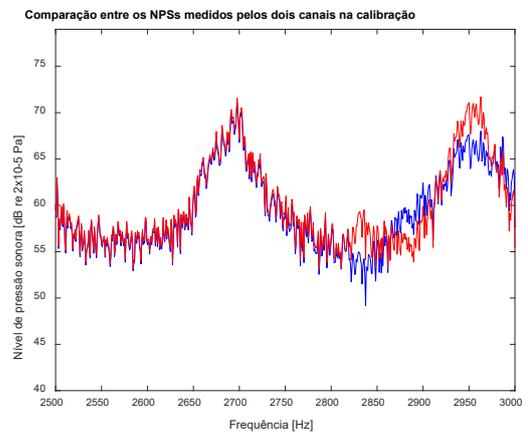


Figura A.160: R.2; M.10; dupla 2.

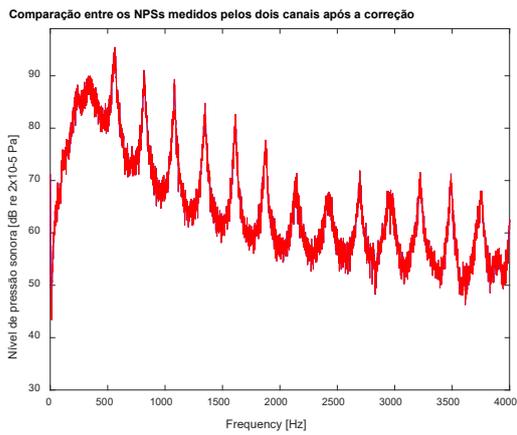


Figura A.161: R.3; M.1; dupla 2.

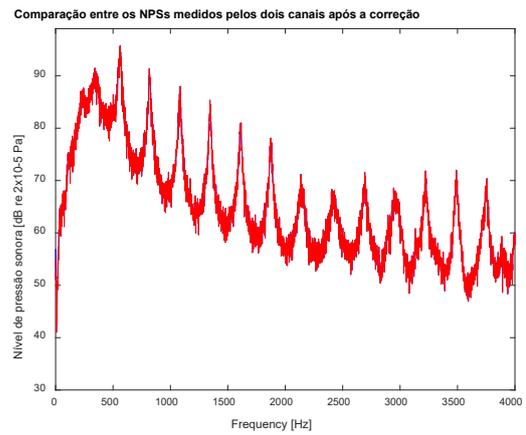


Figura A.162: R.3; M.2; dupla 2.

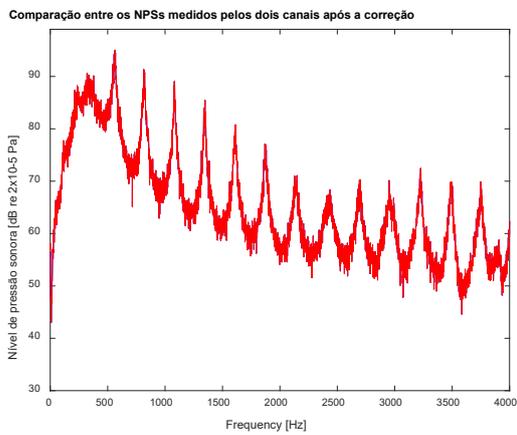


Figura A.163: R.3; M.3; dupla 2.

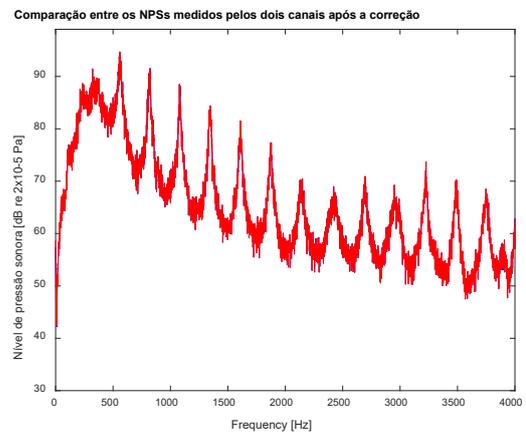


Figura A.164: R.3; M.4; dupla 2.

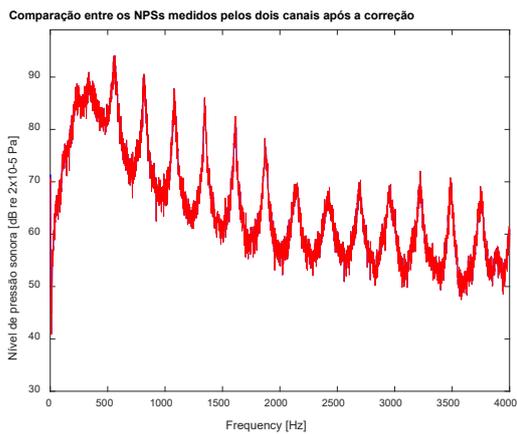


Figura A.165: R.3; M.5; dupla 2.

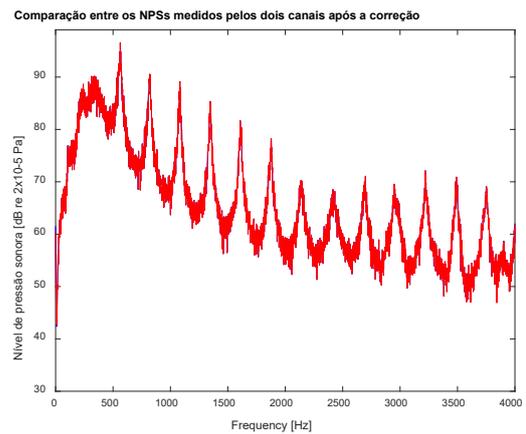


Figura A.166: R.3; M.6; dupla 2.

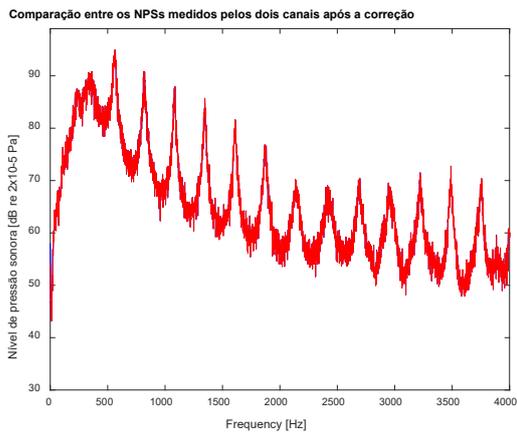


Figura A.167: R.3; M.7; dupla 2.

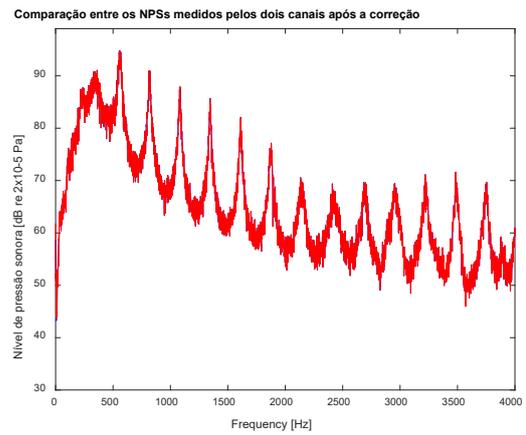


Figura A.168: R.3; M.8; dupla 2.

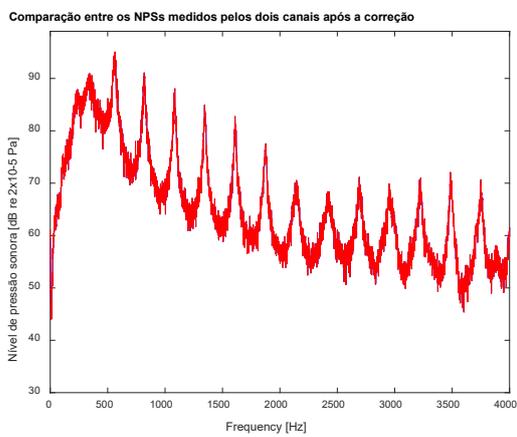


Figura A.169: R.3; M.9; dupla 2.

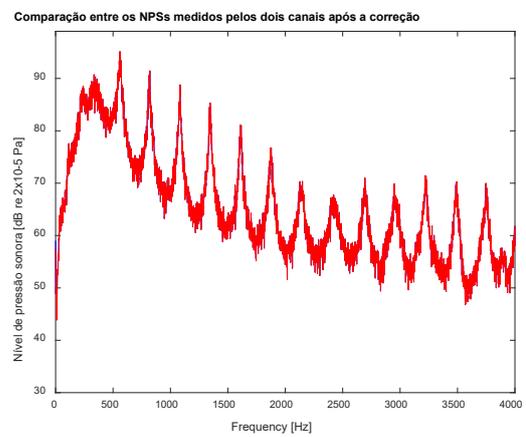


Figura A.170: R.3; M.10; dupla 2.

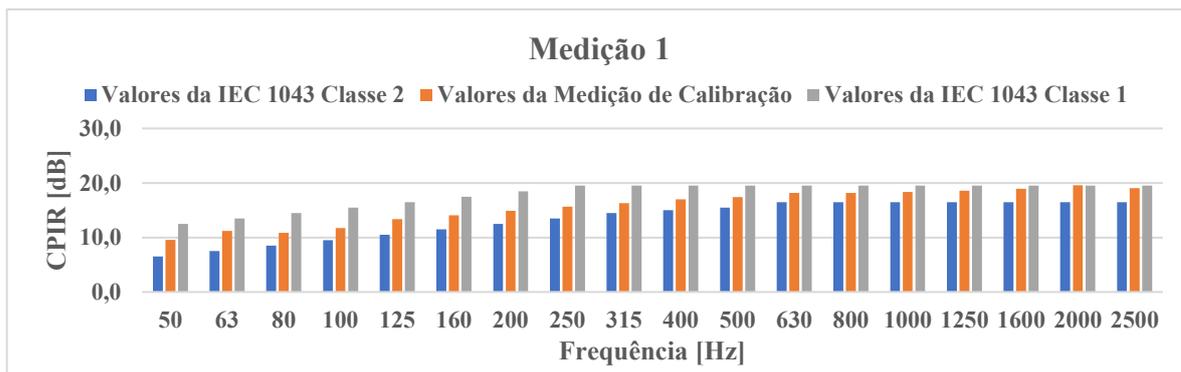


Figura A.171: Resultado 4; Medição 1; dupla 2.

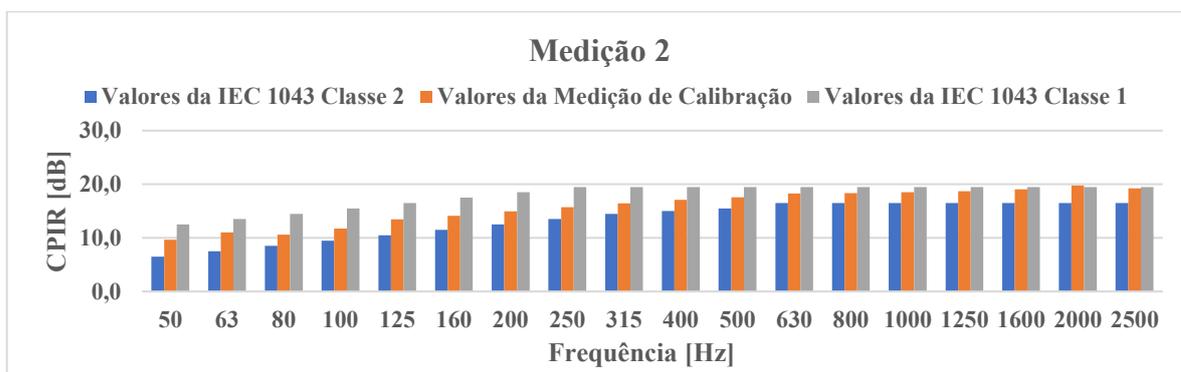


Figura A.172: Resultado 4; Medição 2; dupla 2.

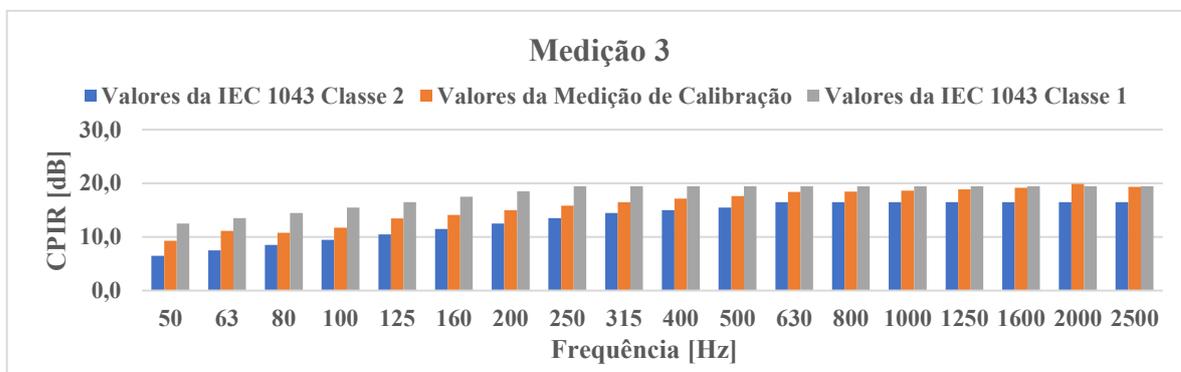


Figura A.173: Resultado 4; Medição 3; dupla 2.

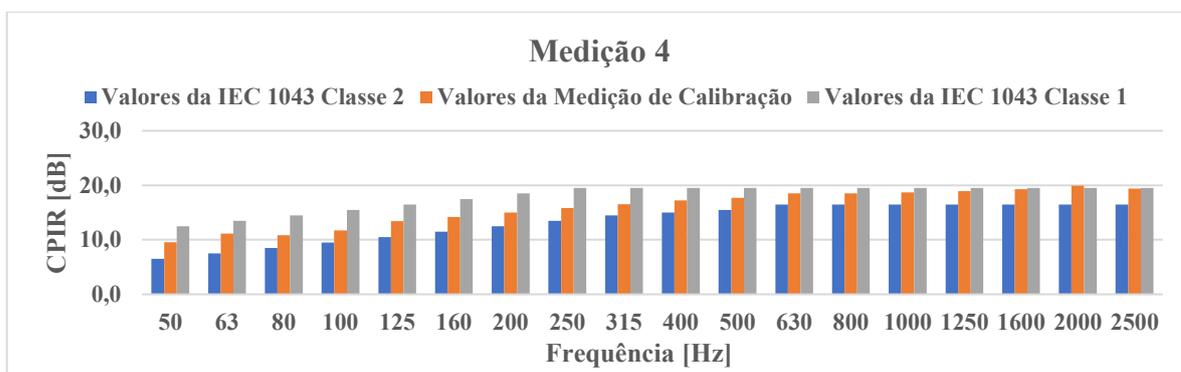


Figura A.174: Resultado 4; Medição 4; dupla 2.

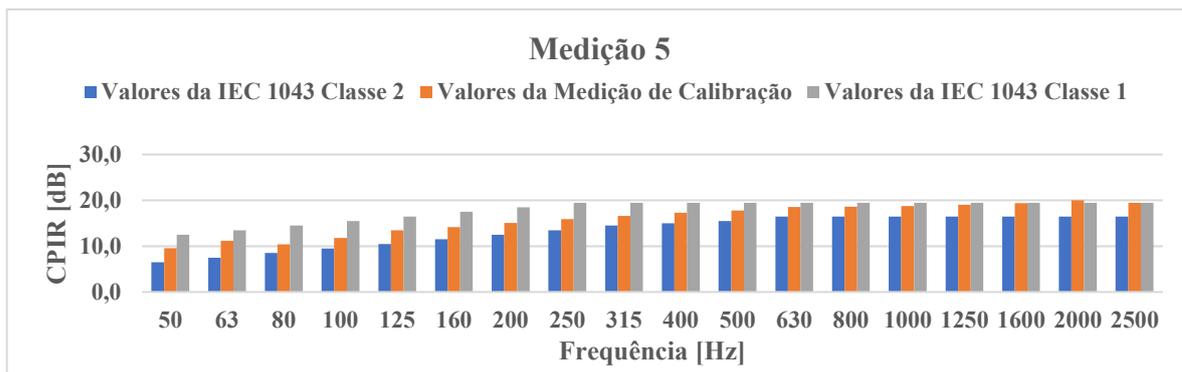


Figura A.175: Resultado 4; Medição 5; dupla 2.

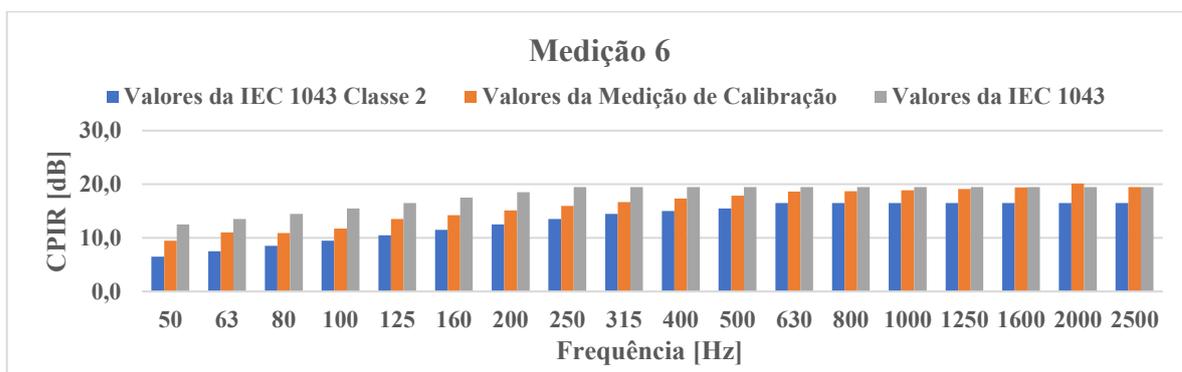


Figura A.176: Resultado 4; Medição 6; dupla 2.

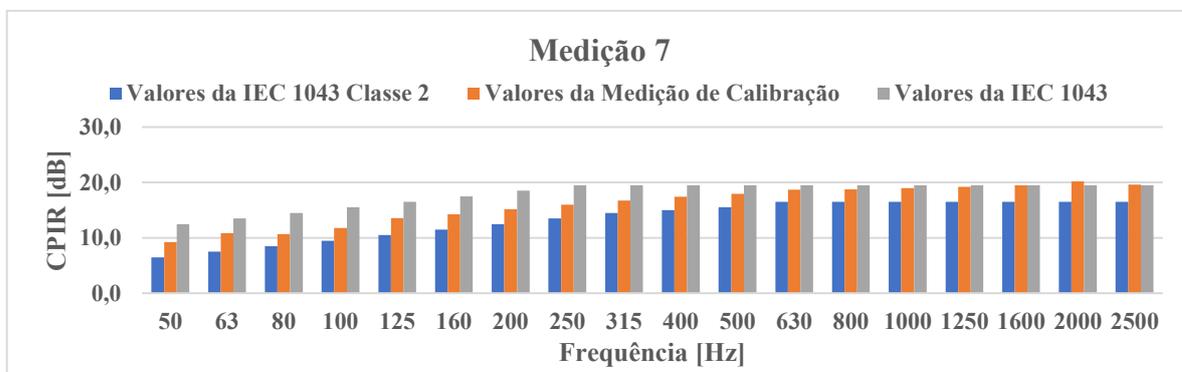


Figura A.177: Resultado 4; Medição 7; dupla 2.

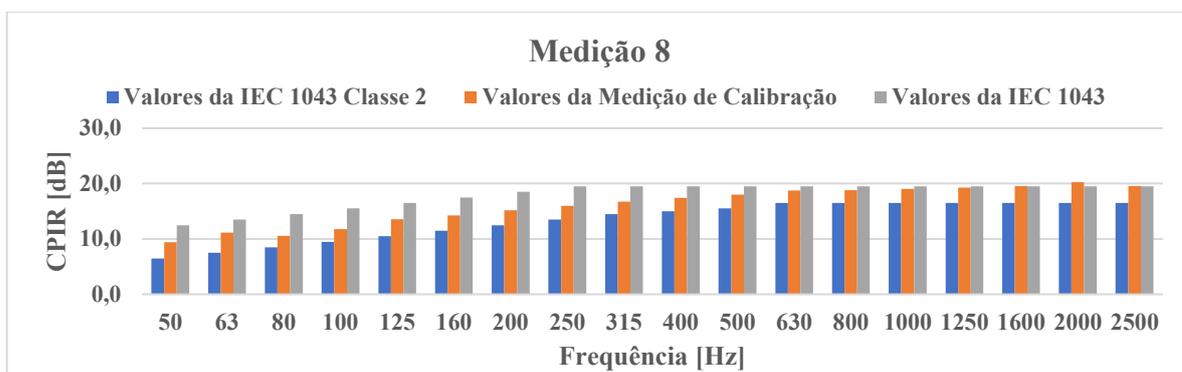


Figura A.178: Resultado 4; Medição 8; dupla 2.

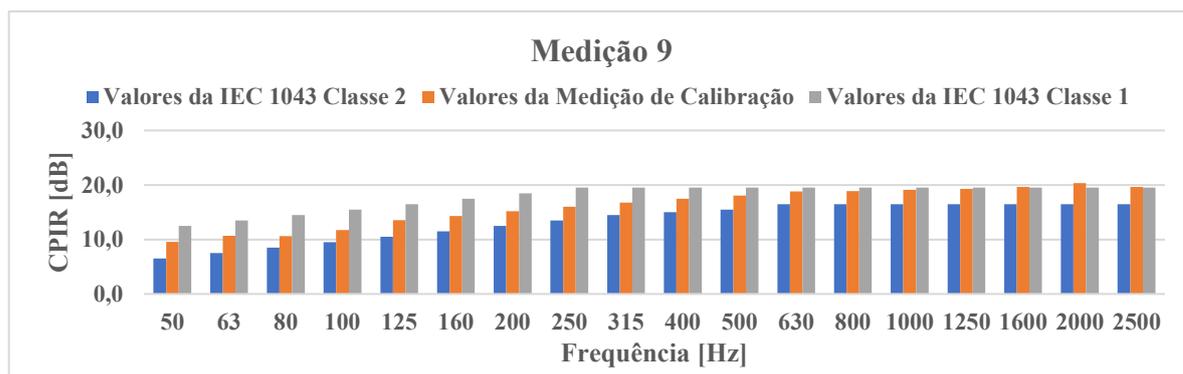


Figura A.179: Resultado 4; Medição 9; dupla 2.

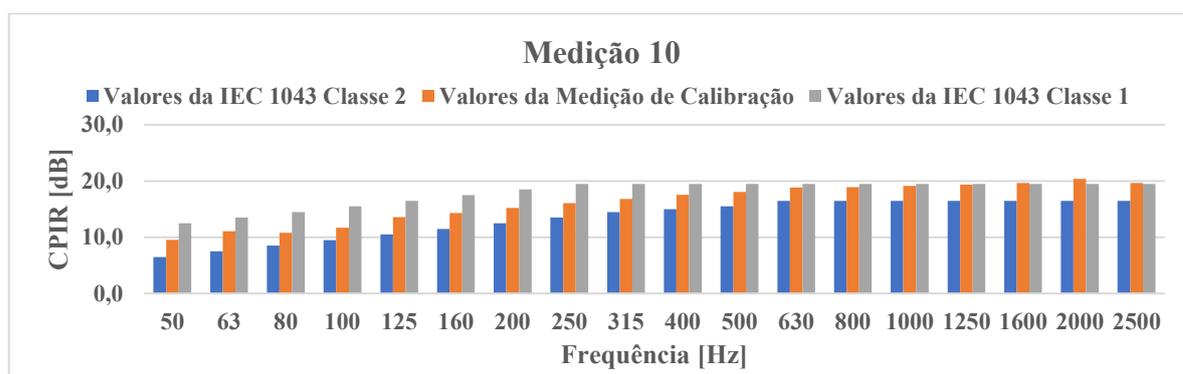


Figura A.180: Resultado 4; Medição 10; dupla 2.

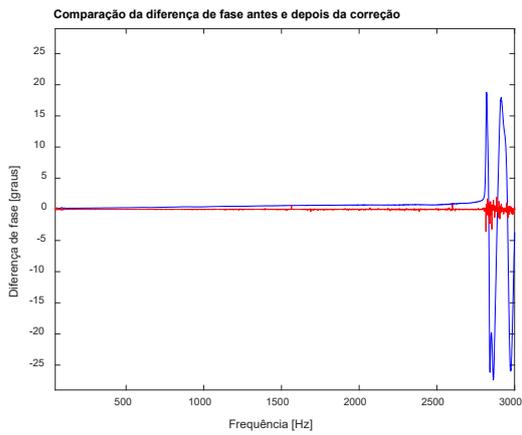


Figura A.181: R.5; M.1; dupla 2.

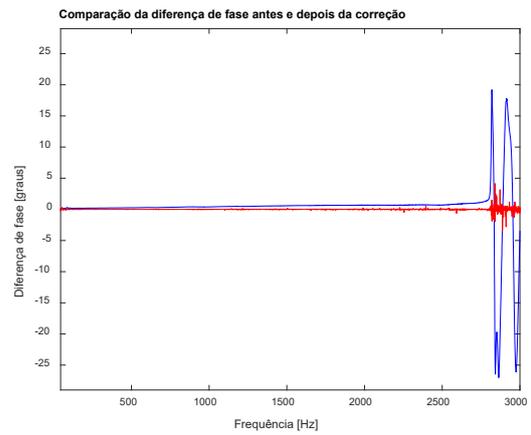


Figura A.182: R.5; M.2; dupla 2.

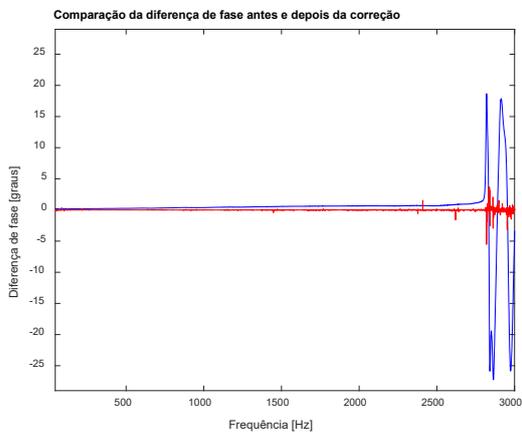


Figura A.183: R.5; M.3; dupla 2.

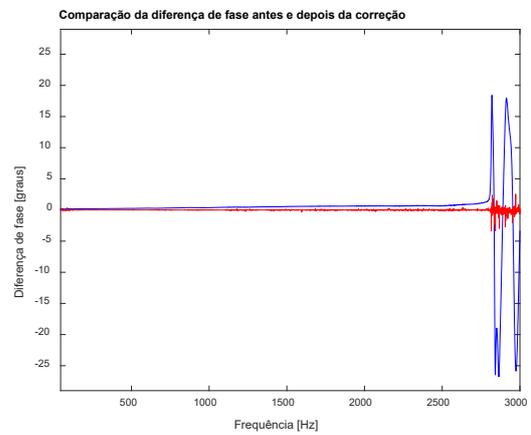


Figura A.184: R.5; M.4; dupla 2.

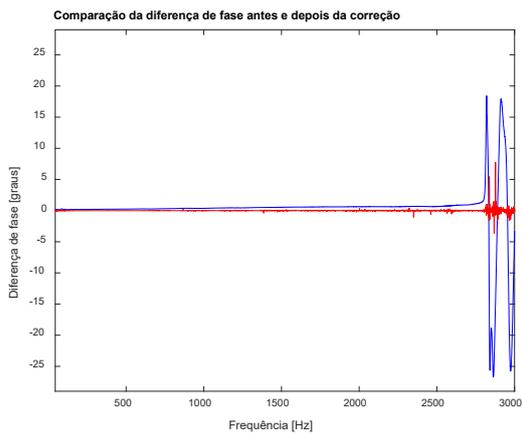


Figura A.185: R.5; M.5; dupla 2.

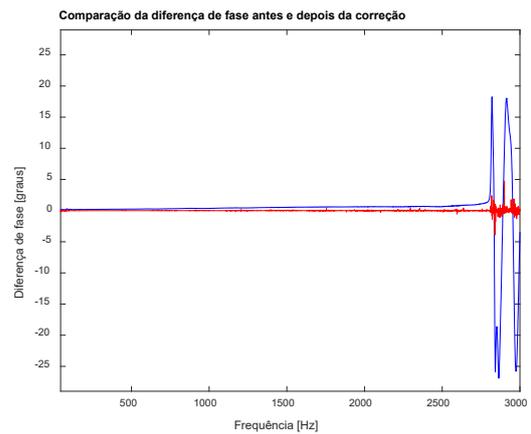


Figura A.186: R.5; M.6; dupla 2.

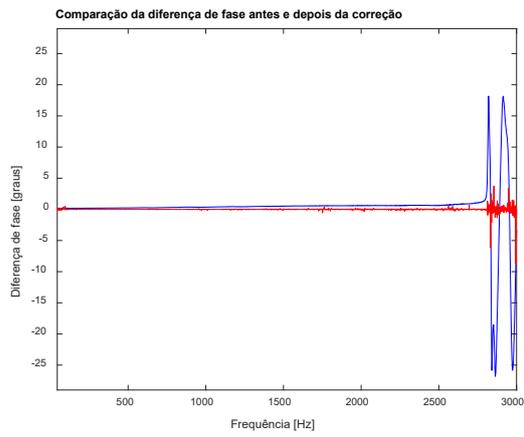


Figura A.187: R.5; M.7; dupla 2.

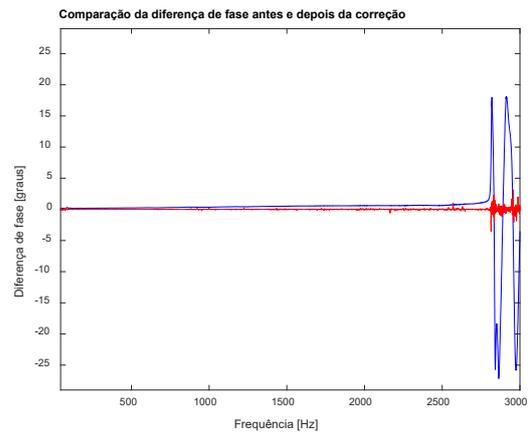


Figura A.188: R.5; M.8; dupla 2.

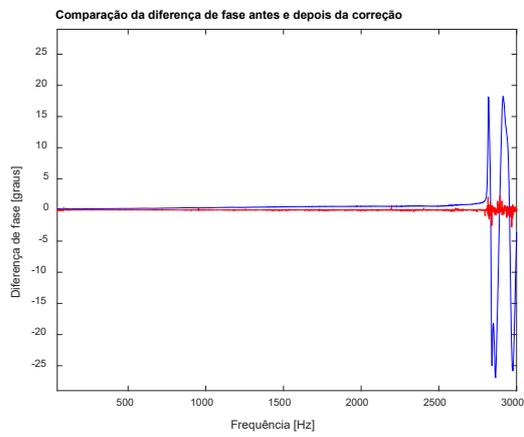


Figura A.189: R.5; M.9; dupla 2.

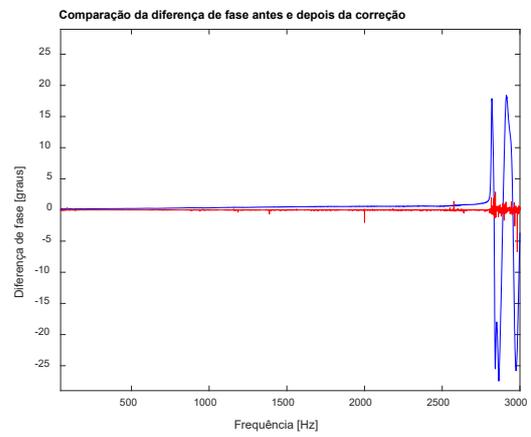


Figura A.190: R.5; M.10; dupla 2.

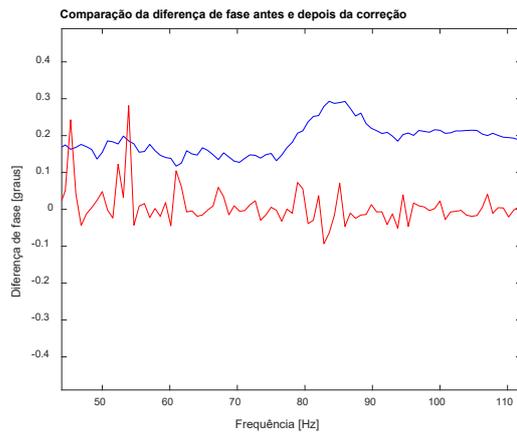


Figura A.191: R.6; M.1; dupla 2.

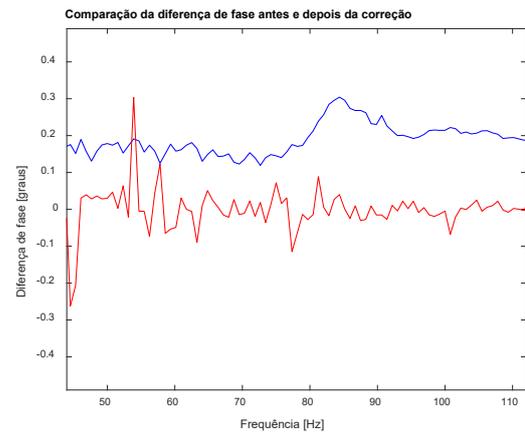


Figura A.192: R.6; M.2; dupla 2.

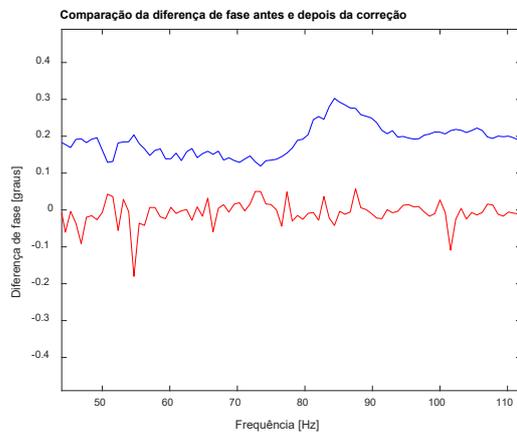


Figura A.193: R.6; M.3; dupla 2.

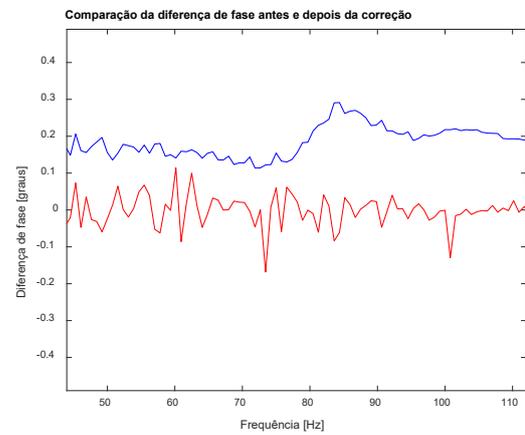


Figura A.194: R.6; M.4; dupla 2.

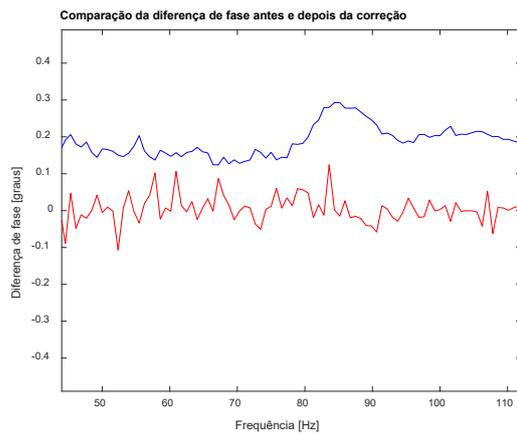


Figura A.195: R.6; M.5; dupla 2.

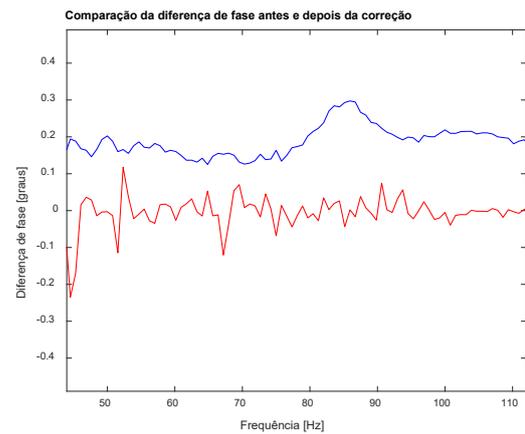


Figura A.196: R.6; M.6; dupla 2.

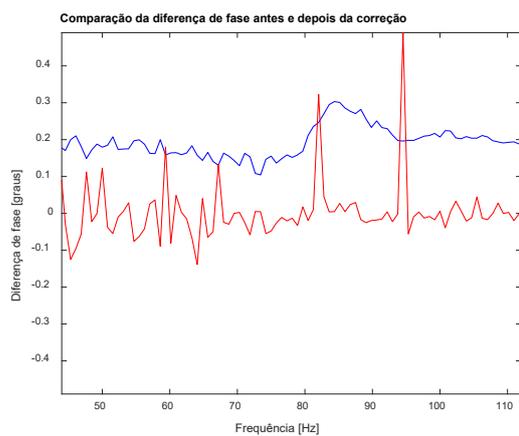


Figura A.197: R.6; M.7; dupla 2.

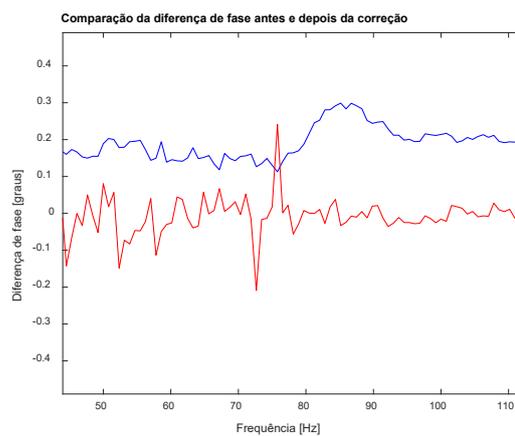


Figura A.198: R.6; M.8; dupla 2.

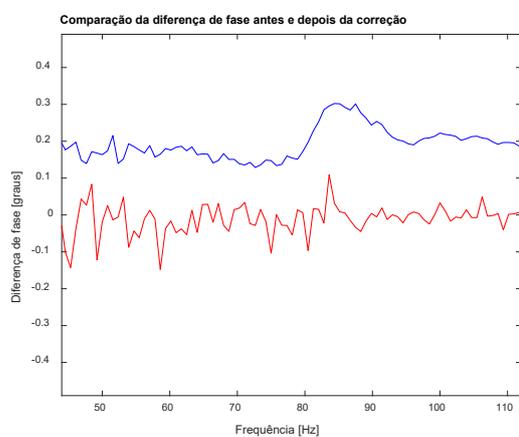


Figura A.199: R.6; M.9; dupla 2.

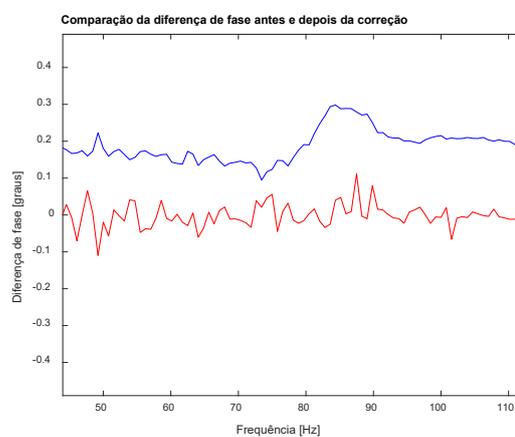


Figura A.200: R.6; M.10; dupla 2.

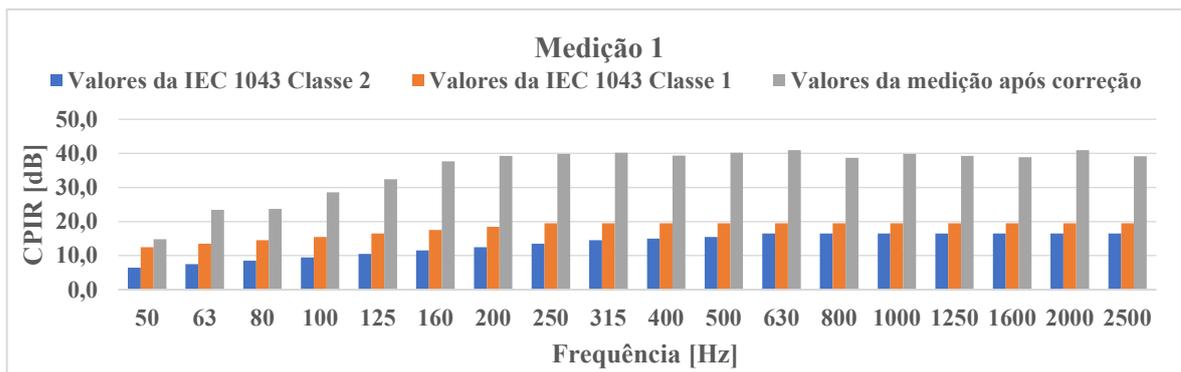


Figura A.201: Resultado 7; Medição 1; dupla 2.

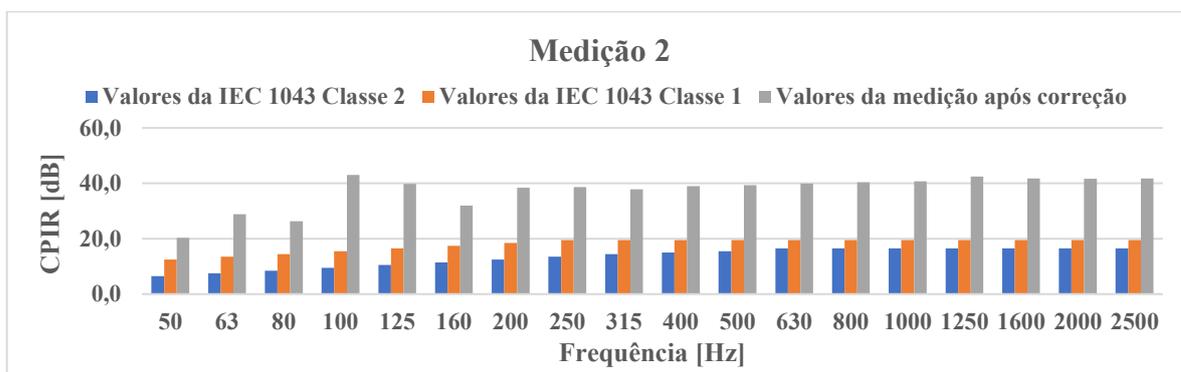


Figura A.202: Resultado 7; Medição 2; dupla 2.

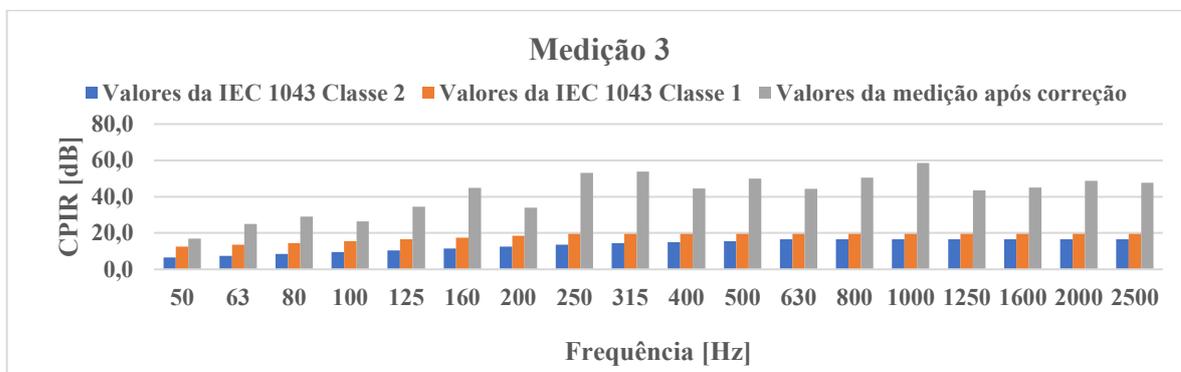


Figura A.203: Resultado 7; Medição 3; dupla 2.

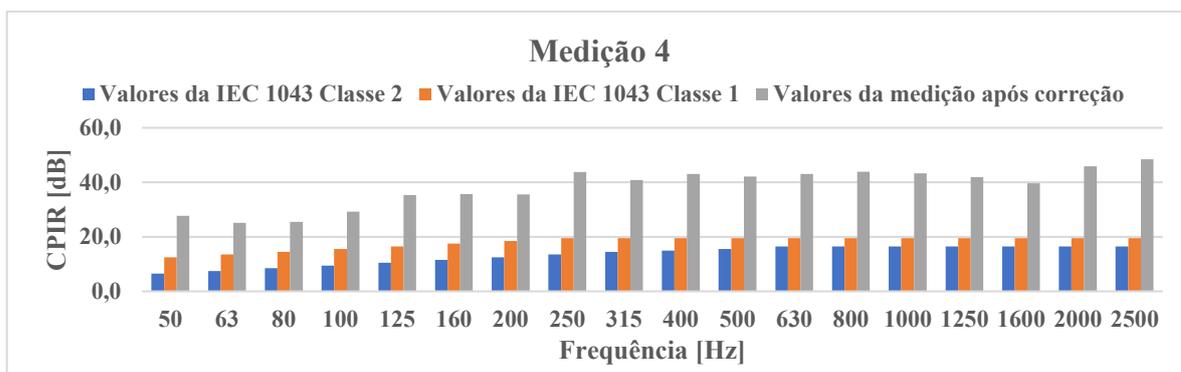


Figura A.204: Resultado 7; Medição 4; dupla 2.

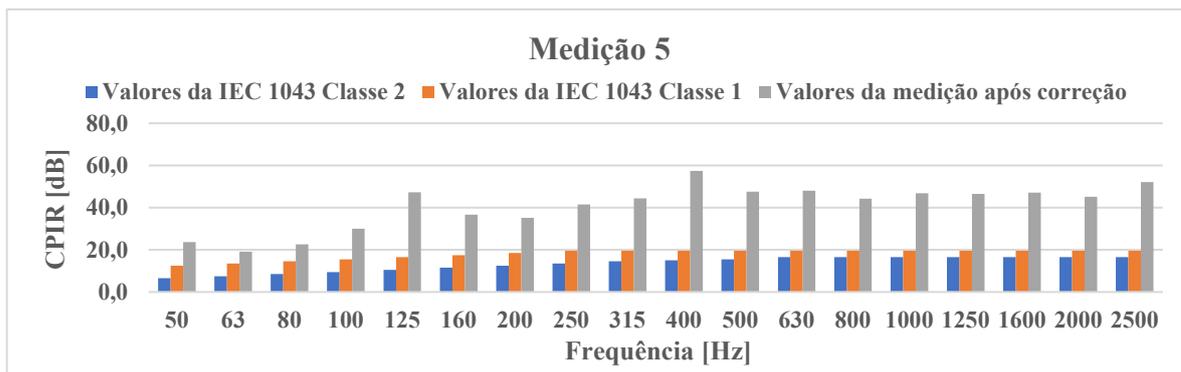


Figura A.205: Resultado 7; Medição 5; dupla 2.

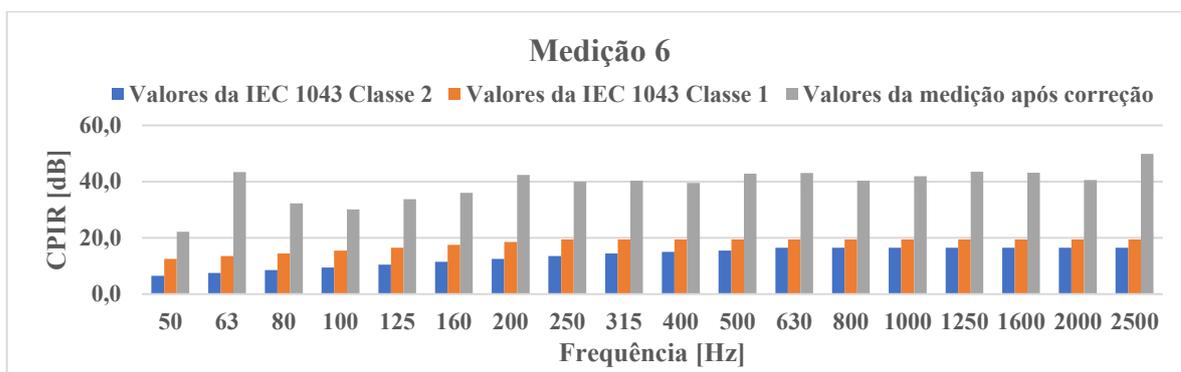


Figura A.206: Resultado 7; Medição 6; dupla 2.

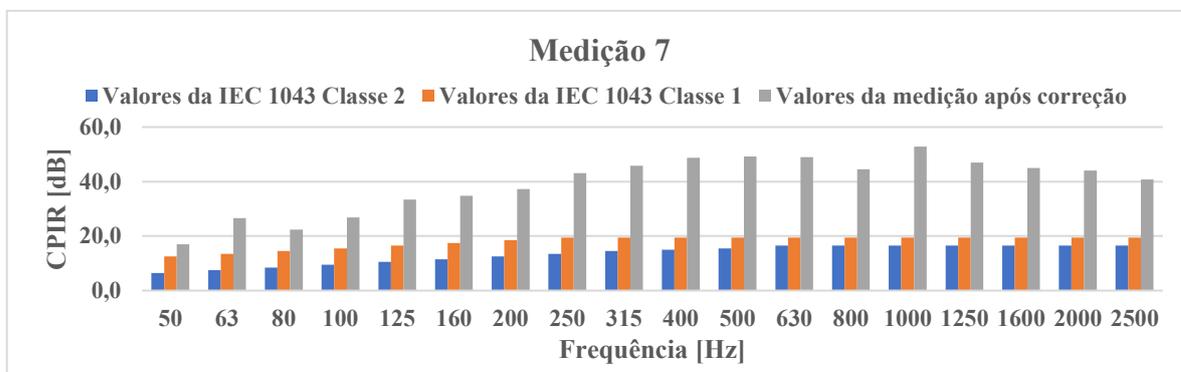


Figura A.207: Resultado 7; Medição 7; dupla 2.

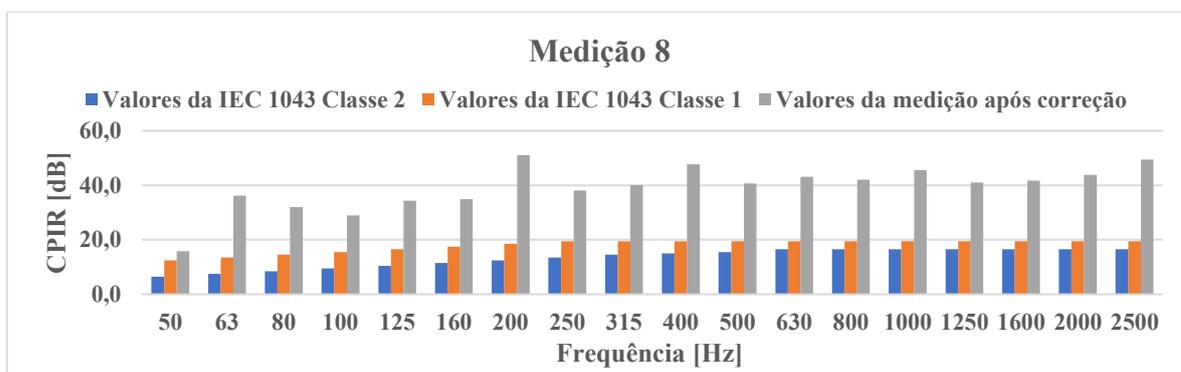


Figura A.208: Resultado 7; Medição 8; dupla 2.

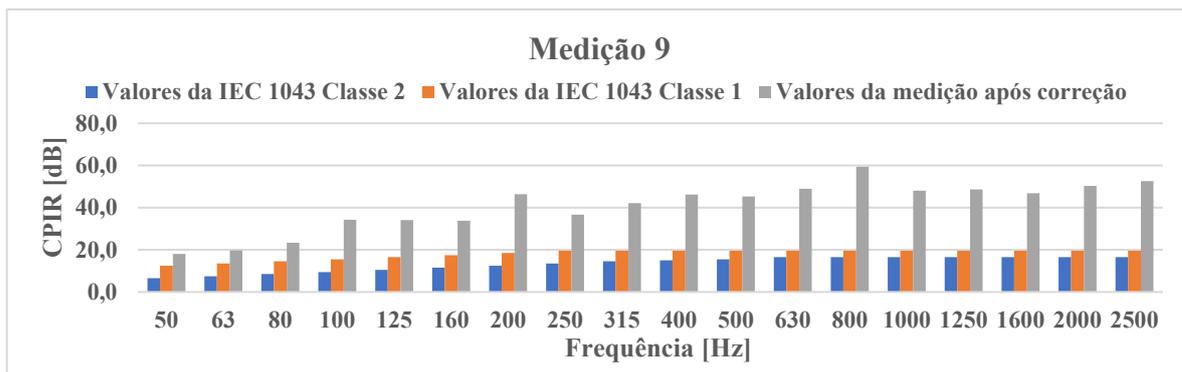


Figura A.209: Resultado 7; Medição 9; dupla 2.

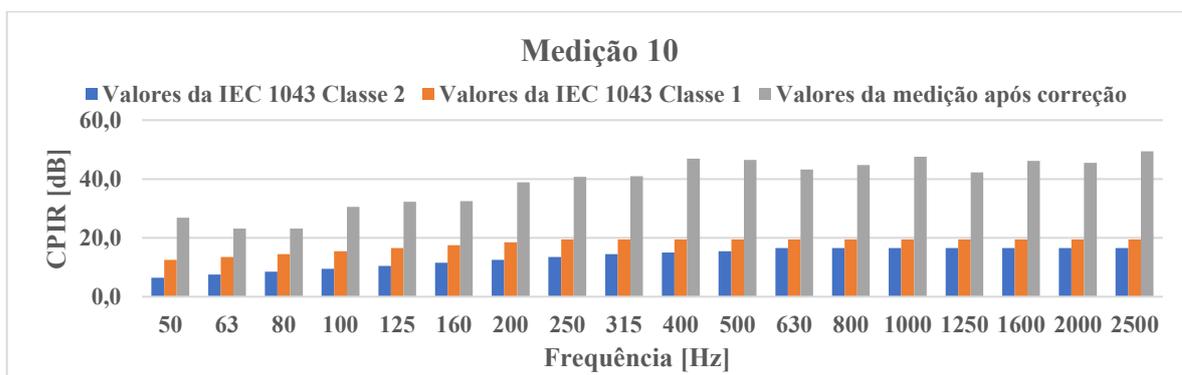


Figura A.210: Resultado 7; Medição 10; dupla 2.

APÊNDICE B - RESULTADOS DA SUBSEÇÃO 5.2

Para complementar os resultados mostrados pela subseção 5.2, referentes ao experimento exposto na subseção 3.2, são apresentados nesse apêndice todos os resultados de todos os ensaios. A fim de manter esse apêndice sucinto e claro, vamos separar os resultados de acordo com: a dupla de microfones, o sinal de excitação sonora utilizado na Medição de Intensidades e o conteúdo gráfico. Os dois primeiros critérios já foram explicados no corpo do trabalho. Em relação ao conteúdo dos gráficos, fez-se agrupamentos de gráficos que recebem os seguintes nomes:

- **Resultado 8:** gráfico com a comparação entre os níveis de intensidade sonora medidos utilizando os Métodos: Analítico e p-p com correção. O eixo das abcissas mostra uma faixa de frequência partindo de 44 [Hz] e chegando a 3000[Hz], com uma resolução de 0,7813 [Hz], já o eixo das ordenadas representa o nível de intensidade sonora em [dB].
- **Resultado 9:** gráfico com a comparação entre os níveis de intensidade sonora medidos utilizando os Métodos: Analítico e p-p sem correção. O eixo das abcissas mostra uma faixa de frequência entre 44 e 3000[Hz], com uma resolução de 0,7813 [Hz], já o eixo das ordenadas representa o nível de intensidade sonora em [dB].
- **Resultado 10:** gráfico com a comparação entre os níveis de intensidade sonora medidos utilizando os Métodos p-p com e sem correção. O eixo das abcissas mostra uma faixa de frequência de 44 [Hz] até 3000[Hz], com uma resolução de 0,7813 [Hz], já o eixo das ordenadas representa o nível de intensidade sonora em [dB].
- **Resultado 11:** gráfico que resume os resultados encontrados de nível de intensidade sonora em bandas de um terço de oitava, de maneira a facilitar a avaliação dos Métodos p-p, com e sem correção, e Analítico. No eixo das ordenadas tem-se o nível de intensidade sonora em [dB] e nas abcissas estão as frequências centrais em [Hz] das bandas de um terço de oitava, com valores de 50 a 2500 [Hz].
- **Resultado 12:** comparação entre os erros encontrados utilizando os Métodos p-p com e sem correção, tendo como referência o Método Analítico. No eixo das ordenadas tem-se o erro do nível de intensidade sonora medido em [dB] e nas abcissas estão as

frequências centrais em [Hz] das bandas de um terço de oitava, com valores de 125 a 2500 [Hz].

Começou-se a contagem a partir de 8 apenas com a finalidade de evitar confusão com os resultados mostrados pela subseção anterior do apêndice.

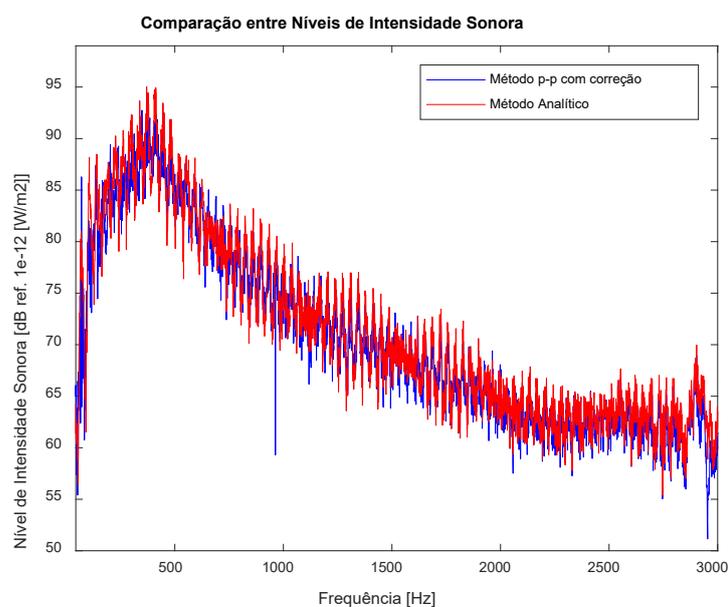


Figura B.1: Resultado 8; Ruído rosa; dupla 1.

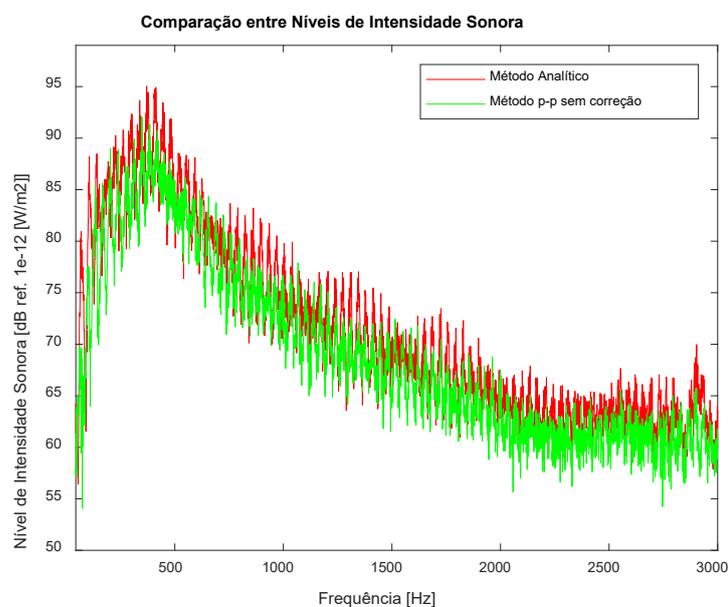


Figura B.2: Resultado 9; Ruído rosa; dupla 1.

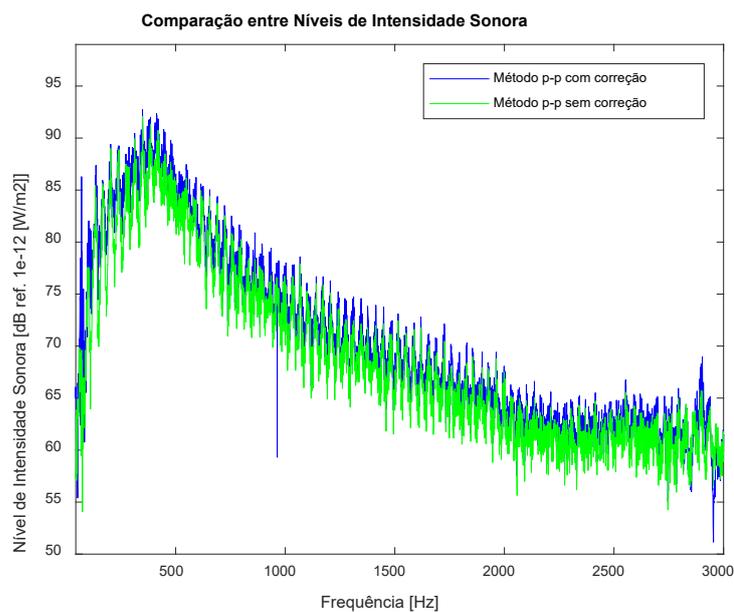


Figura B.3: Resultado 10; Ruído rosa; dupla 1.

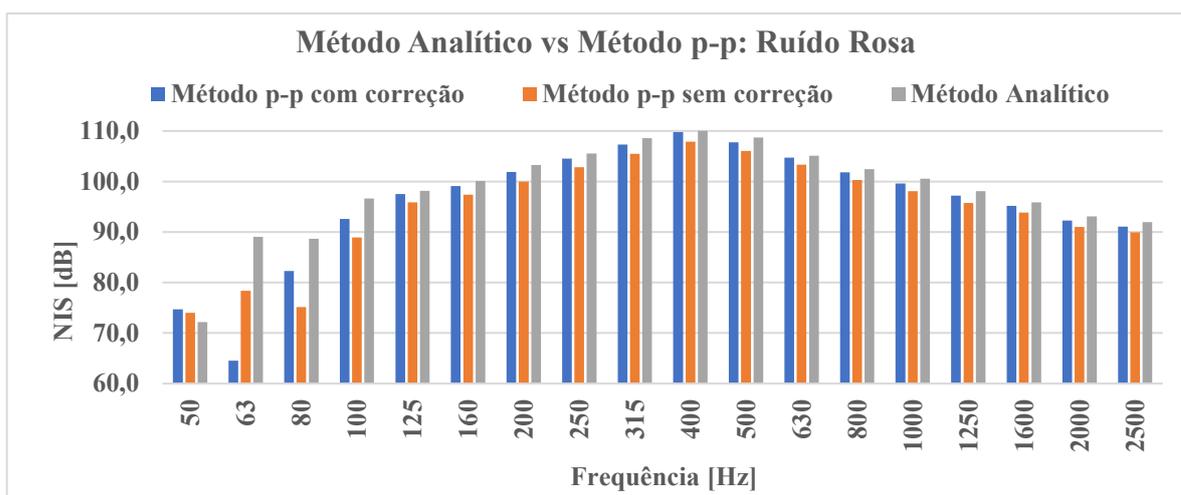


Figura B.4: Resultado 11; Ruído rosa; dupla 1.

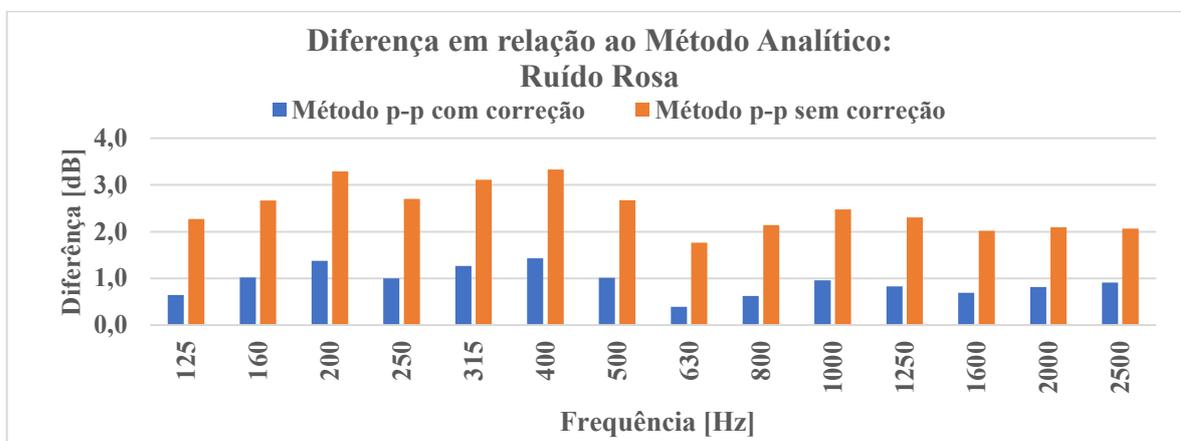


Figura B.5: Resultado 12; Ruído rosa; dupla 1.

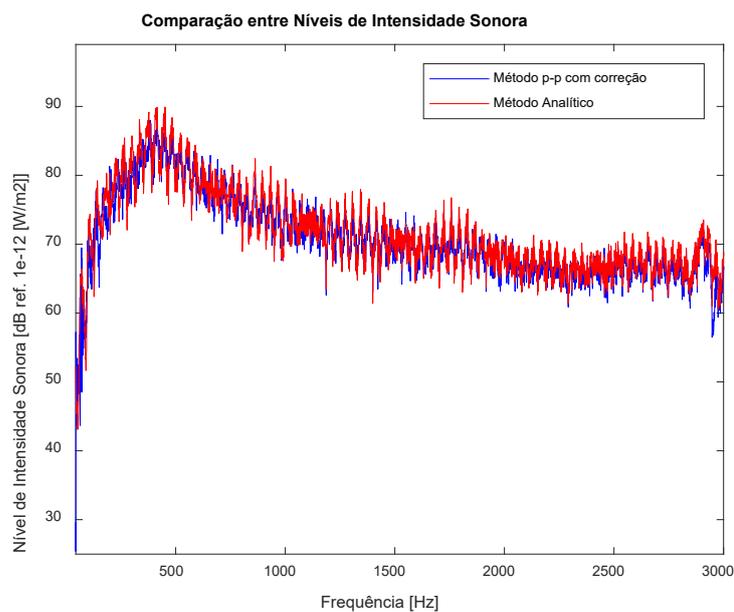


Figura B.6: Resultado 8; Ruído branco; dupla 1.

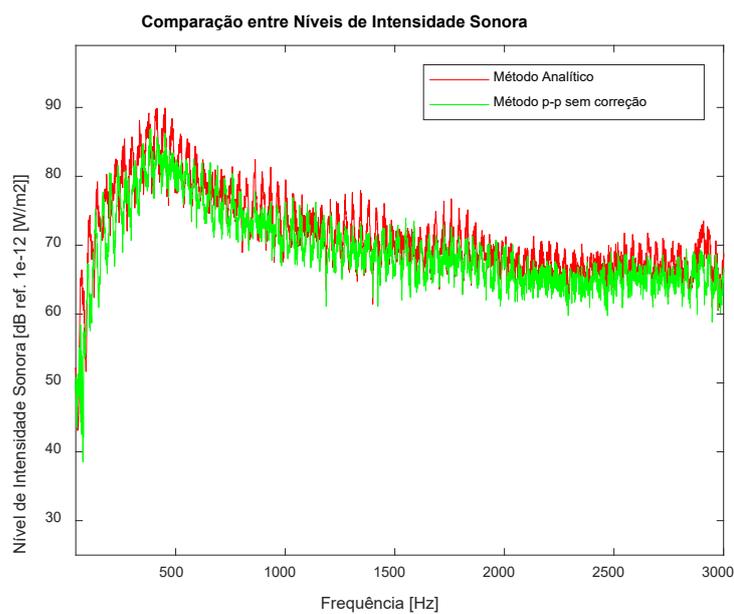


Figura B.7: Resultado 9; Ruído branco; dupla 1.

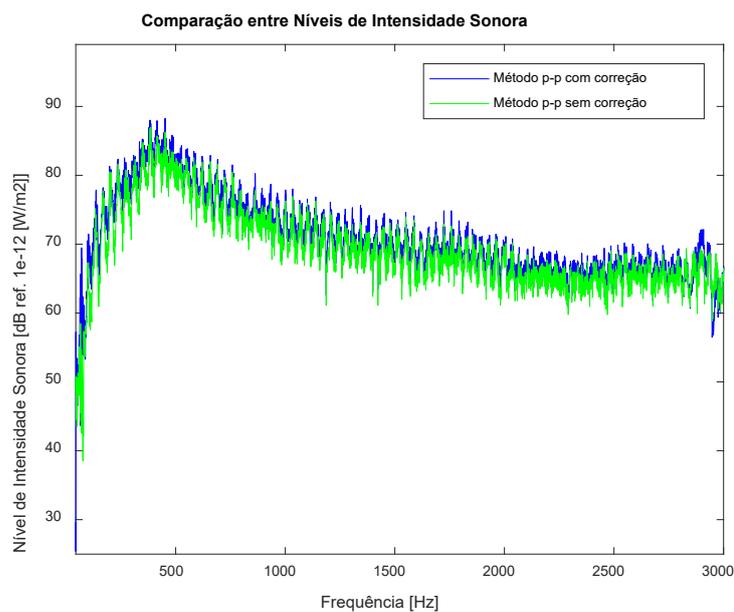


Figura B.8: Resultado 10; Ruído branco; dupla 1.

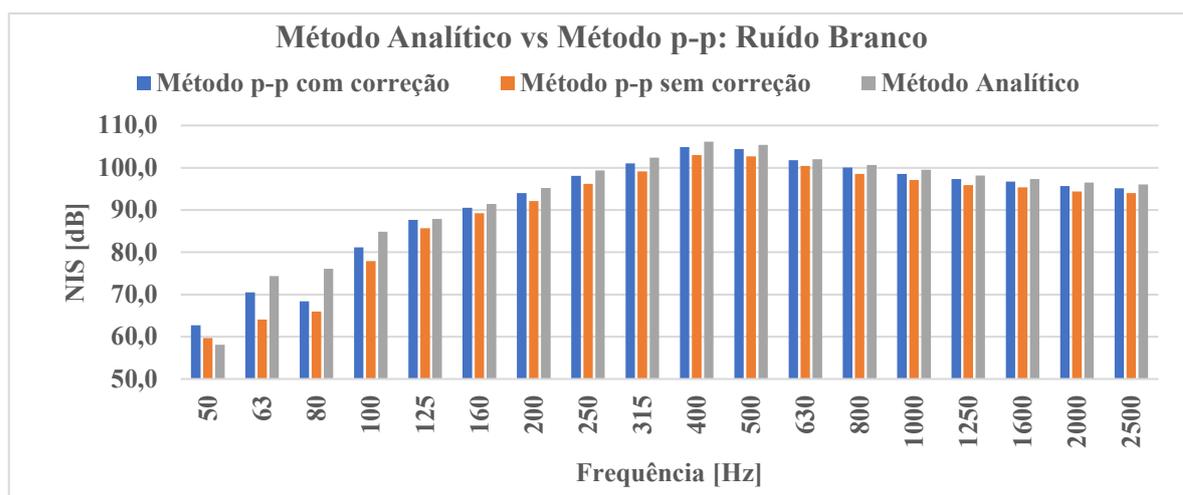


Figura B.9: Resultado 11; Ruído branco; dupla 1.

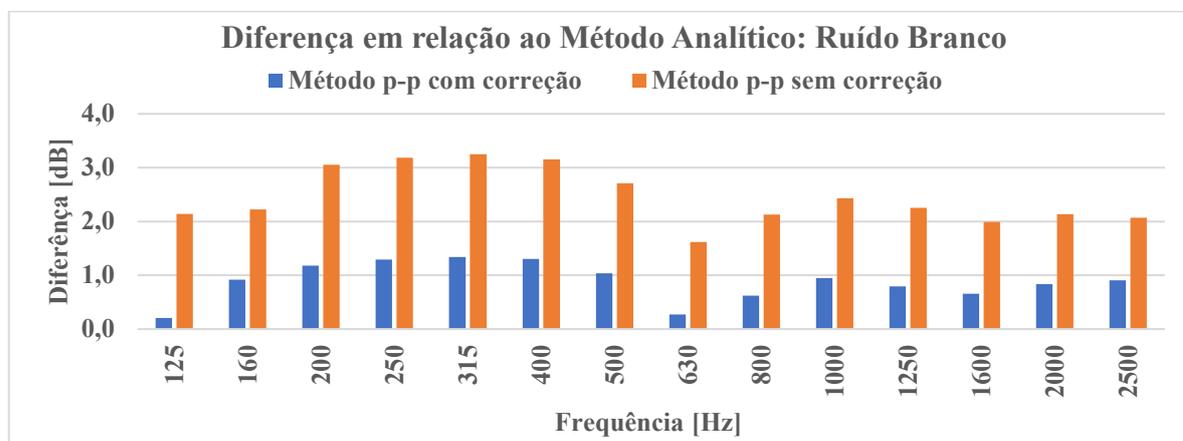


Figura B.10: Resultado 12; Ruído branco; dupla 1.

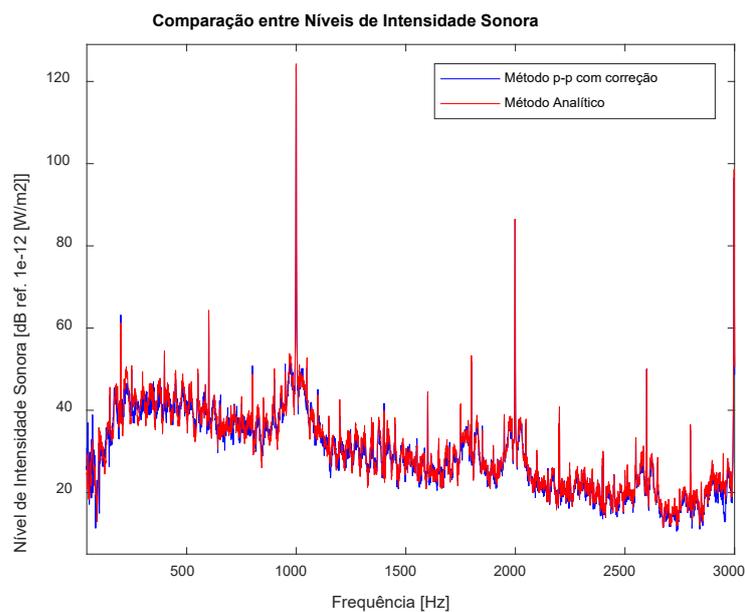


Figura B.11: Resultado 8; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.

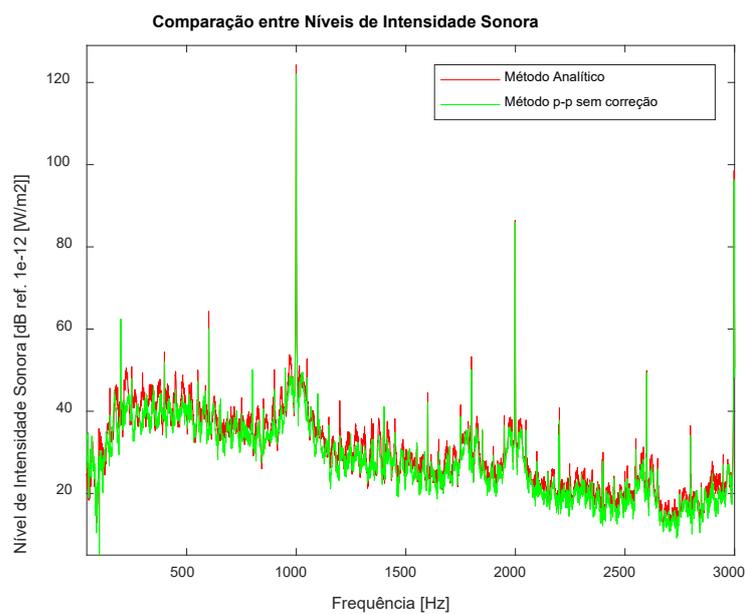


Figura B.12: Resultado 9; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.

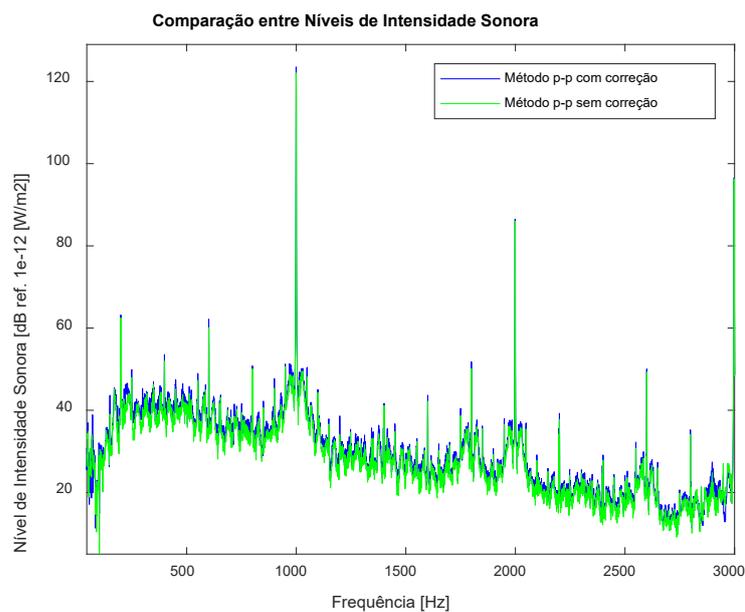


Figura B.13: Resultado 10; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.

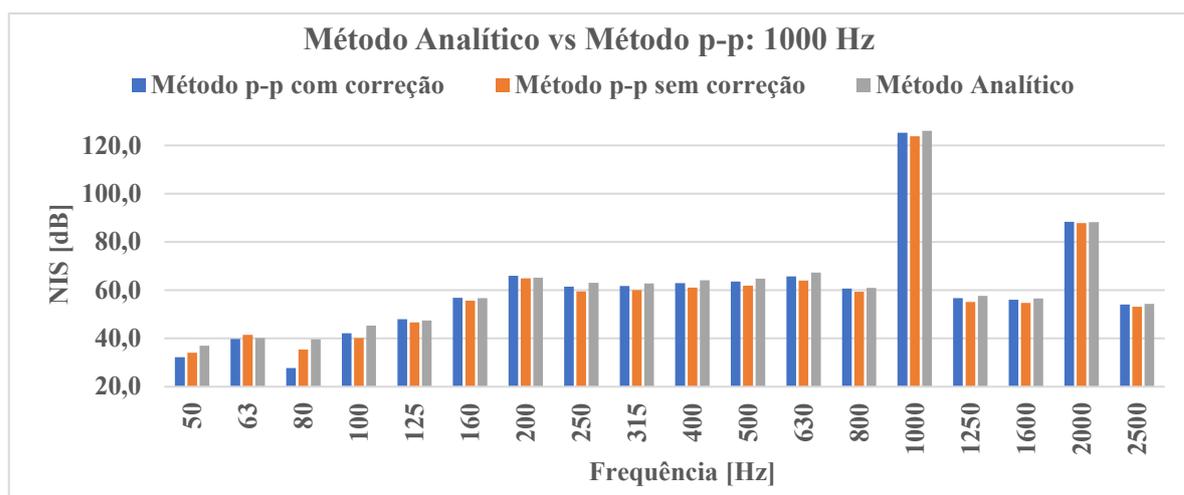


Figura B.14: Resultado 11; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.

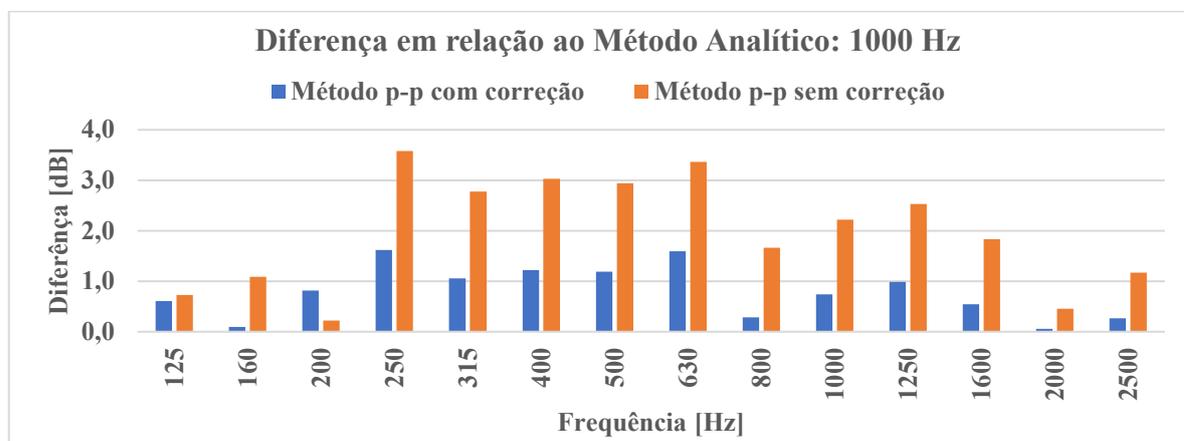


Figura B.15: Resultado 12; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 1.

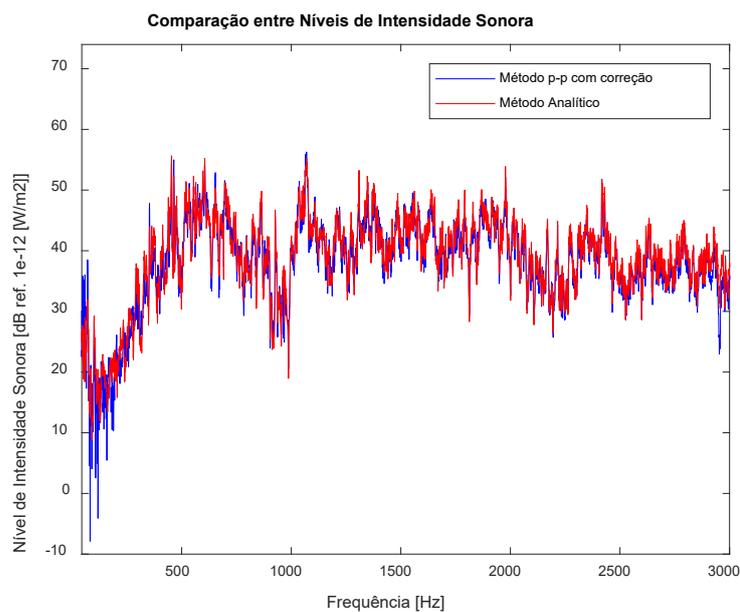


Figura B.16: Resultado 8; Ruído Industrial 1; dupla 1.

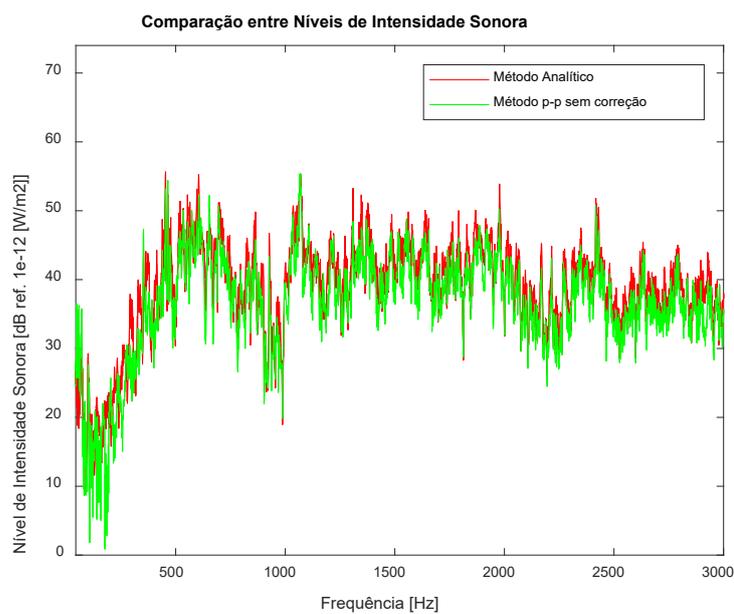


Figura B.17: Resultado 9; Ruído Industrial 1; dupla 1.

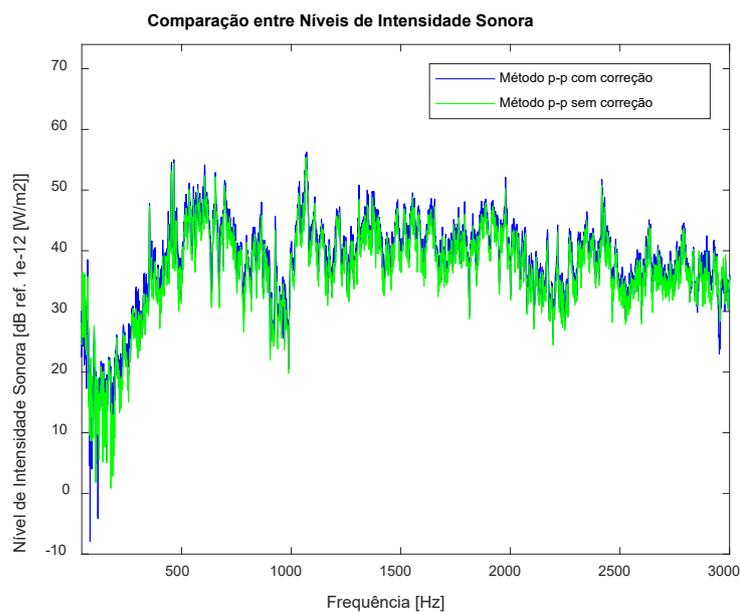


Figura B.18: Resultado 10; Ruído Industrial 1; dupla 1.

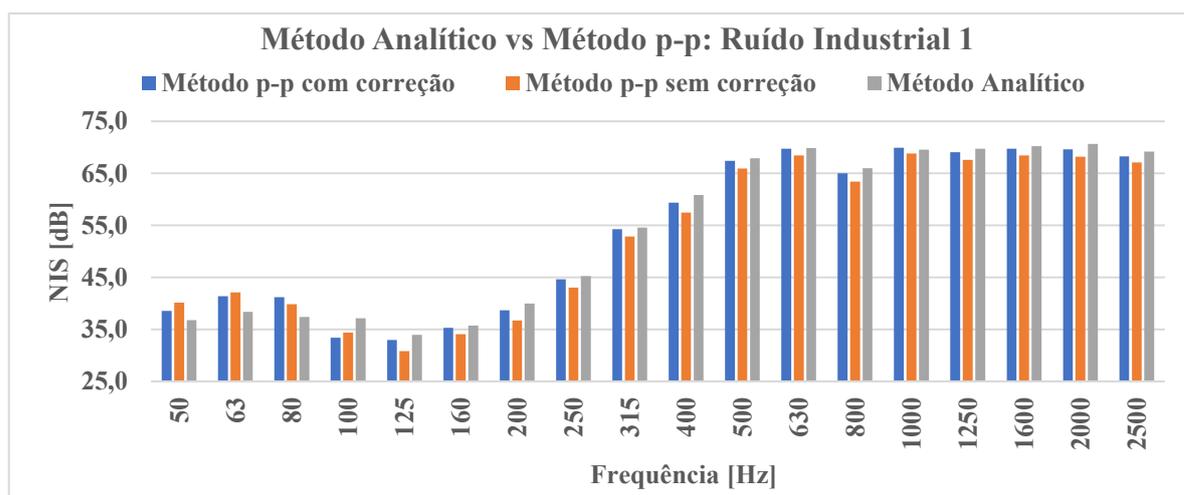


Figura B.19: Resultado 11; Ruído Industrial 1; dupla 1.

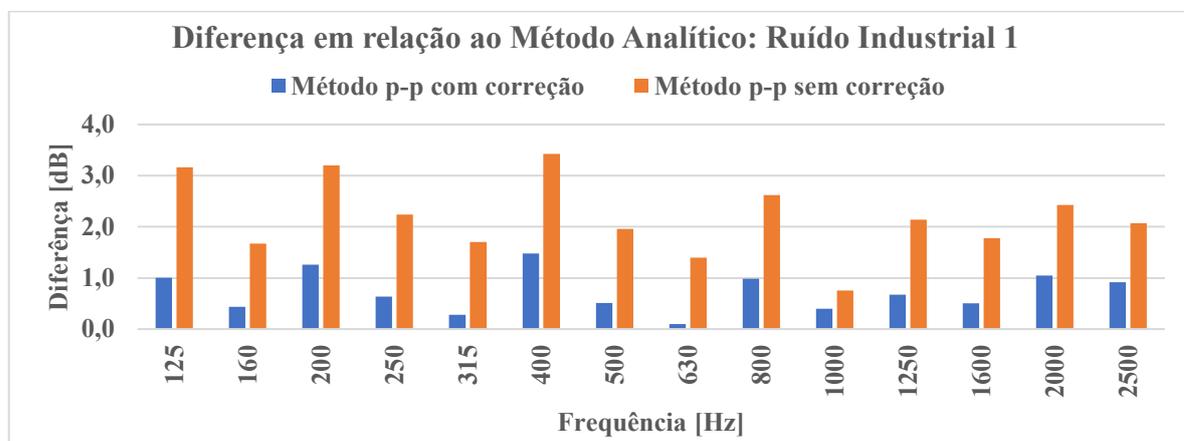


Figura B.20: Resultado 12; Ruído Industrial 1; dupla 1.

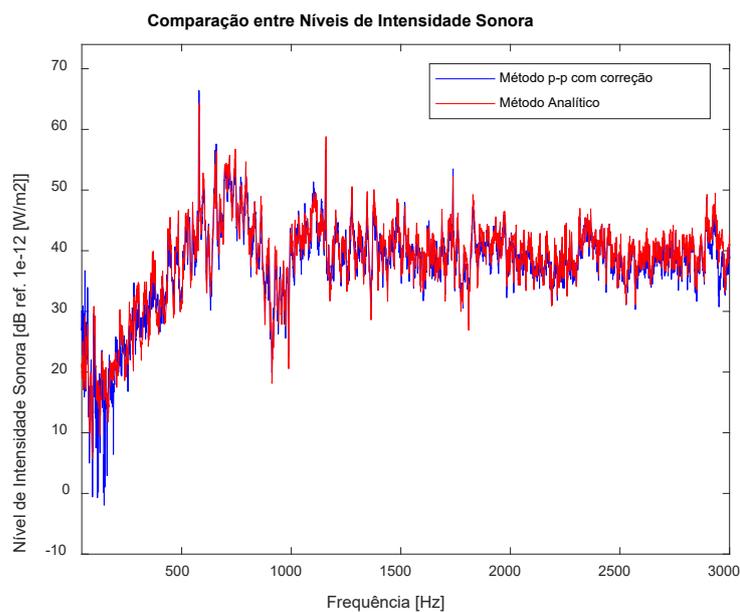


Figura B.21: Resultado 8; Ruído Industrial 2; dupla 1.

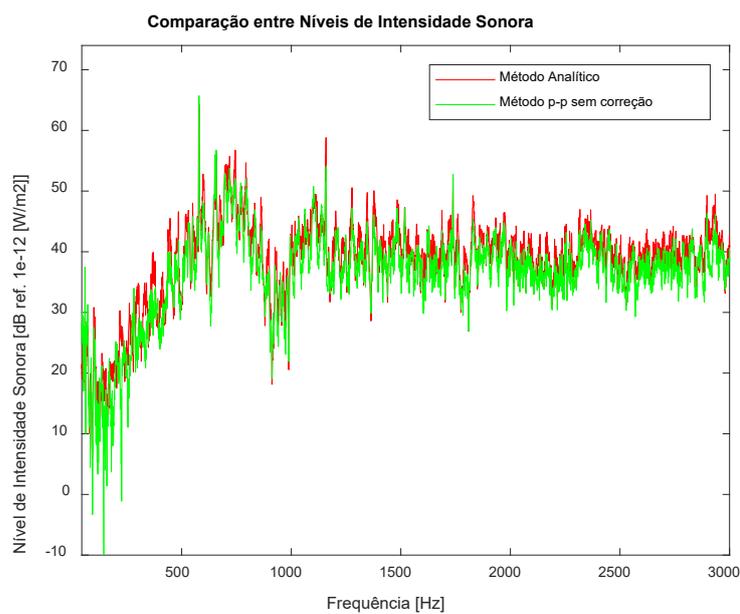


Figura B.22: Resultado 9; Ruído Industrial 2; dupla 1.

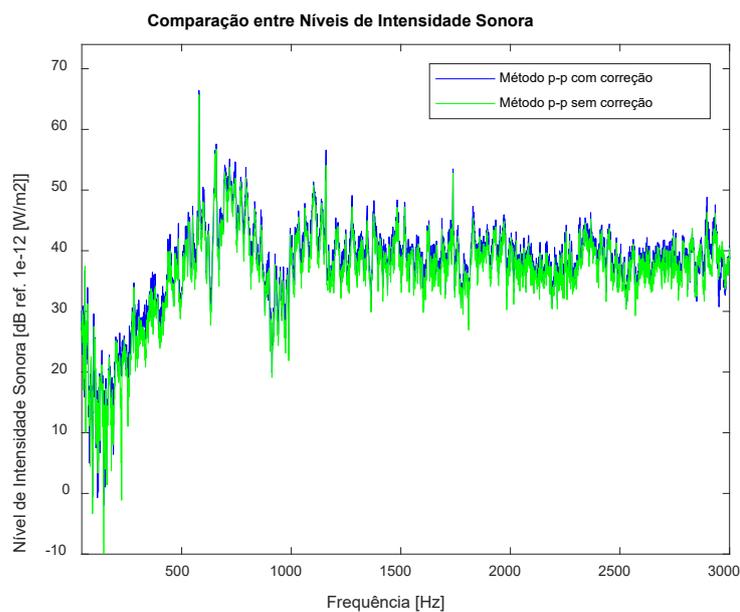


Figura B.23: Resultado 10; Ruído Industrial 2; dupla 1.

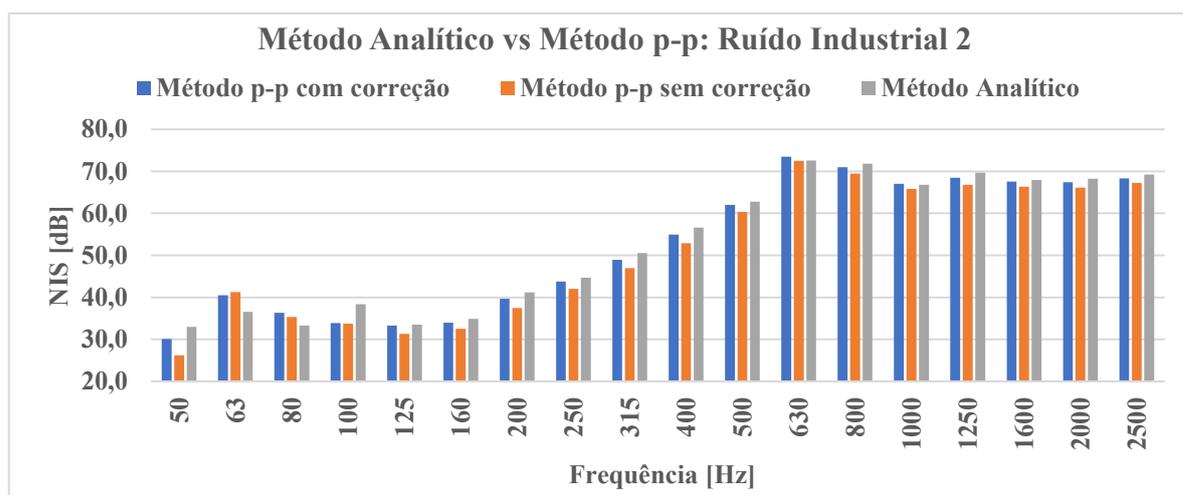


Figura B.24: Resultado 11; Ruído Industrial 2; dupla 1.

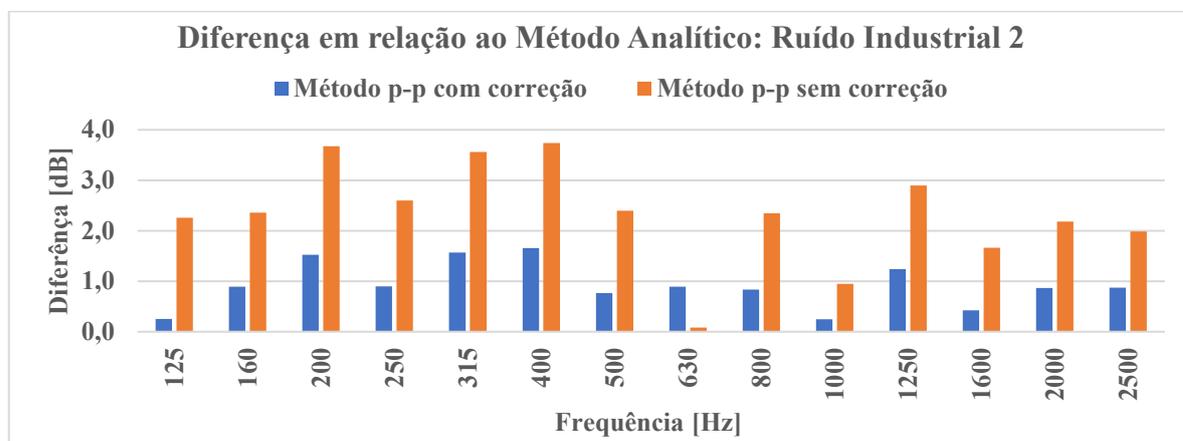


Figura B.25: Resultado 12; Ruído Industrial 2; dupla 1.

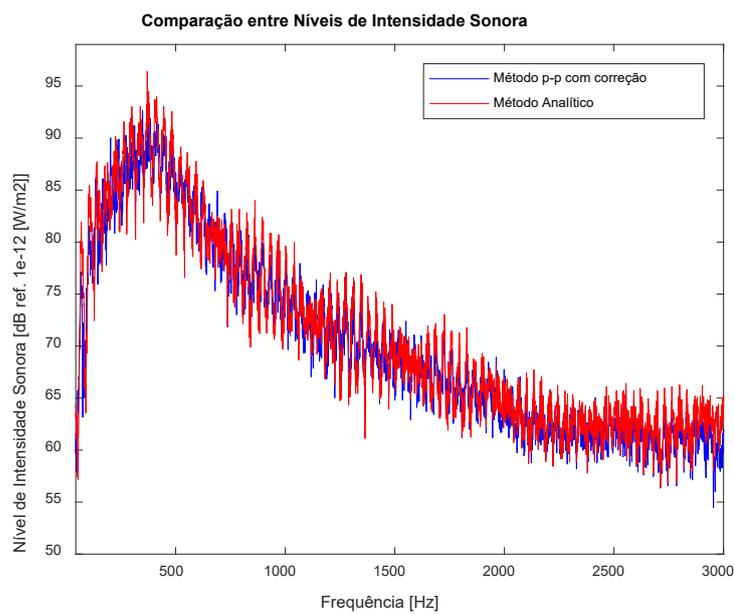


Figura B.26: Resultado 8; Ruído rosa; dupla 2.

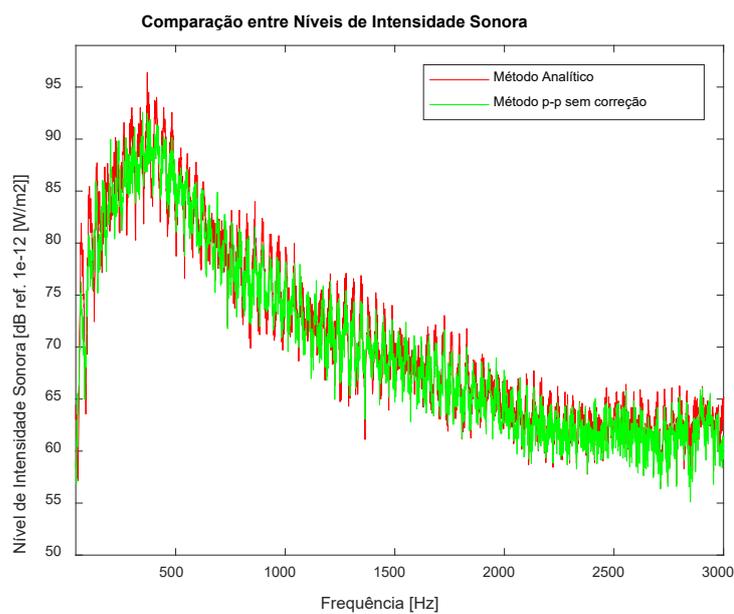


Figura B.27: Resultado 9; Ruído rosa; dupla 2.

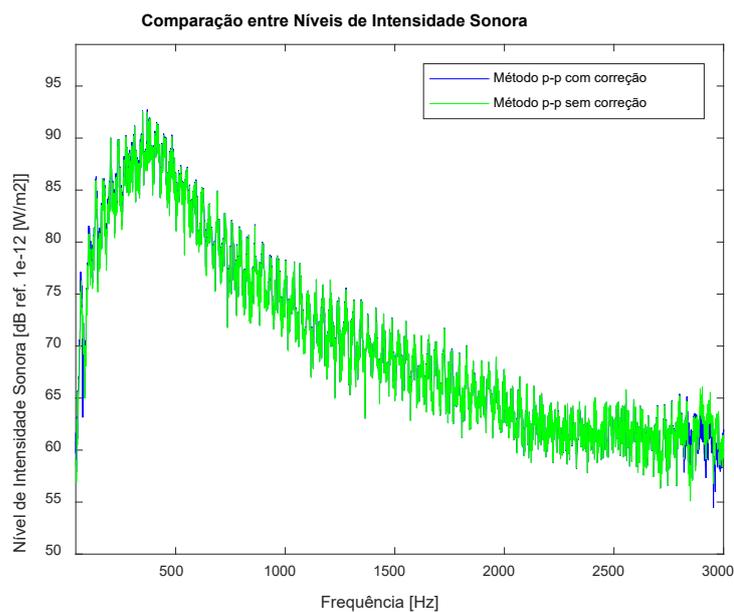


Figura B.28: Resultado 10; Ruído rosa; dupla 2.

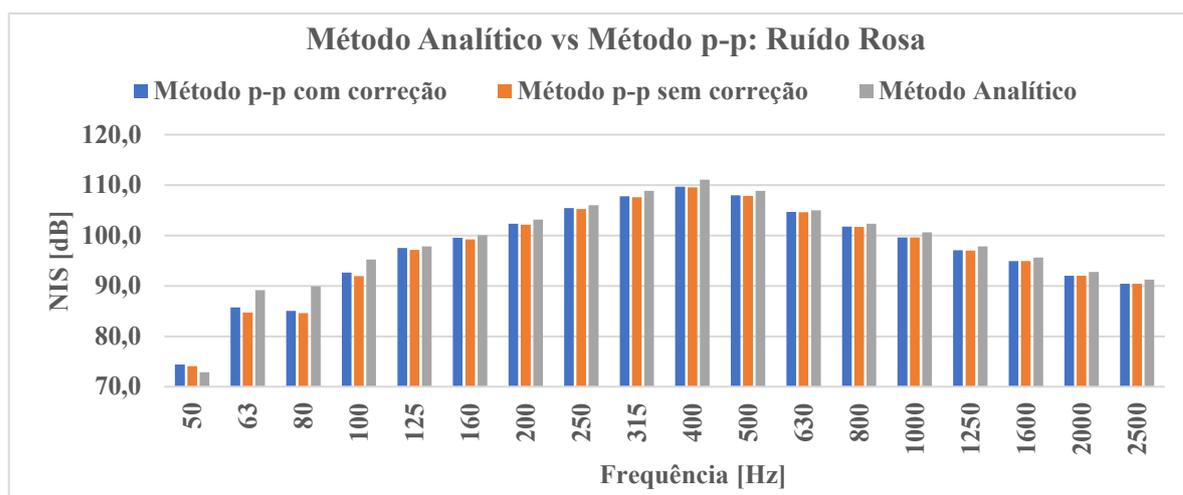


Figura B.29: Resultado 11; Ruído rosa; dupla 2.

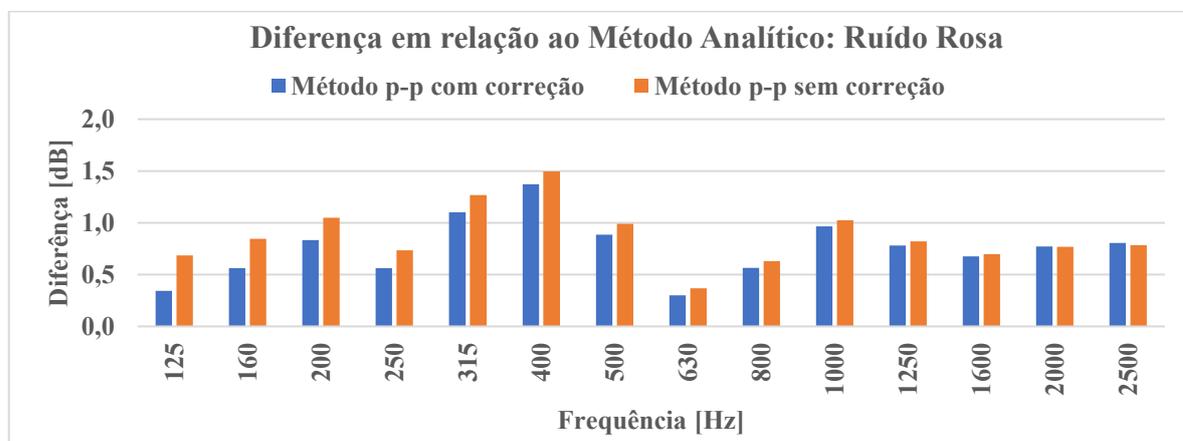


Figura B.30: Resultado 12; Ruído rosa; dupla 2.

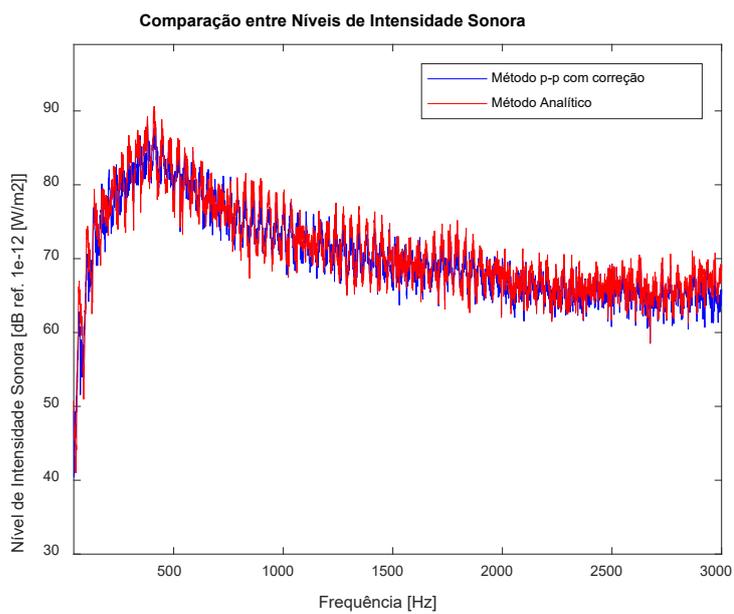


Figura B.31: Resultado 8; Ruído branco; dupla 2.

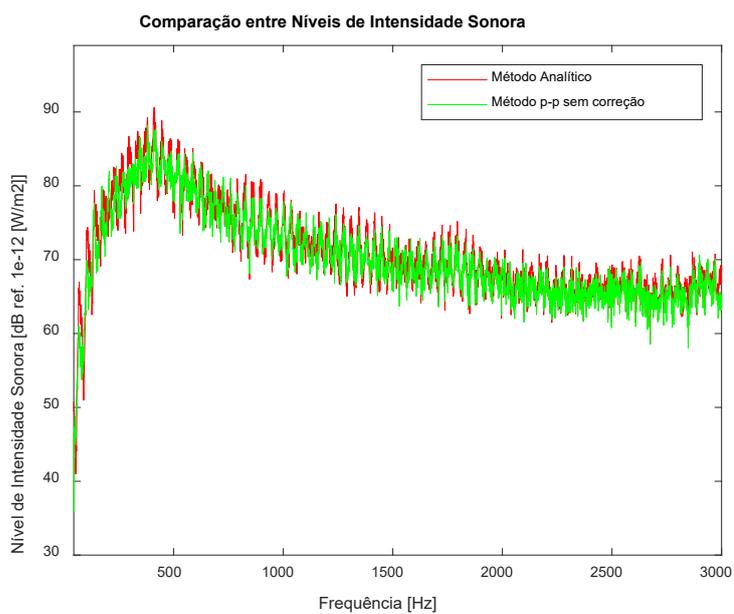


Figura B.32: Resultado 9; Ruído branco; dupla 2.

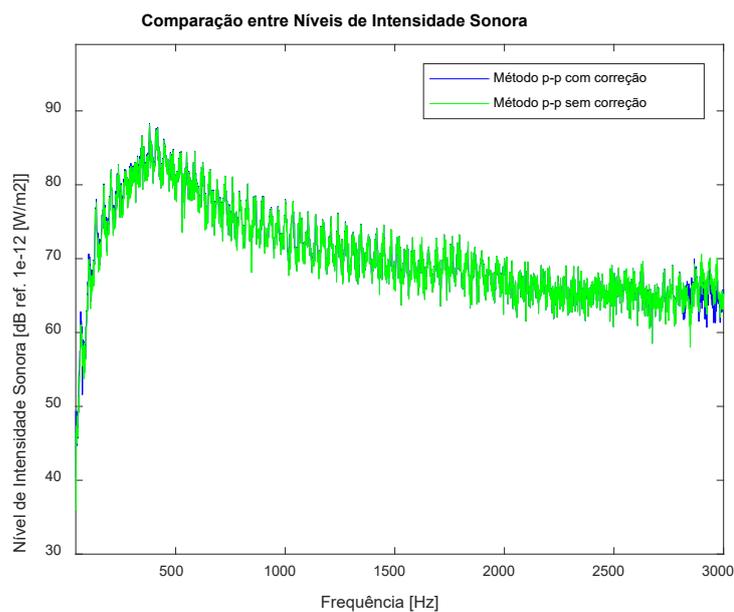


Figura B.33: Resultado 10; Ruído branco; dupla 2.

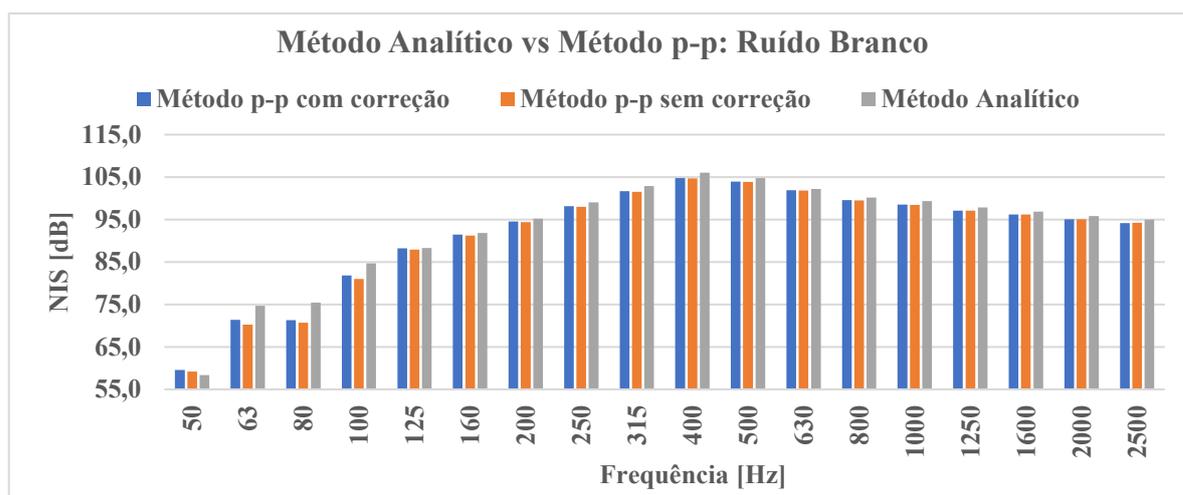


Figura B.34: Resultado 11; Ruído branco; dupla 2.

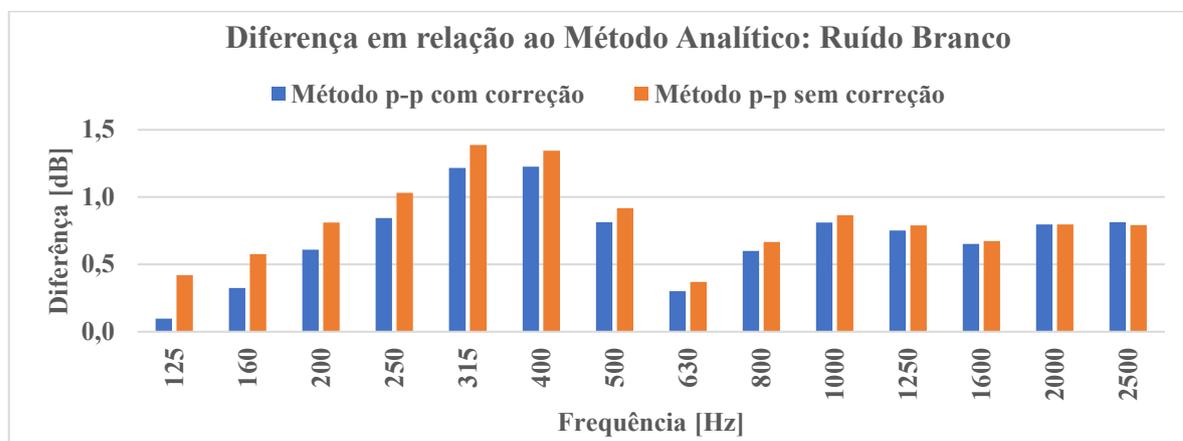


Figura B.35: Resultado 12; Ruído branco; dupla 2.

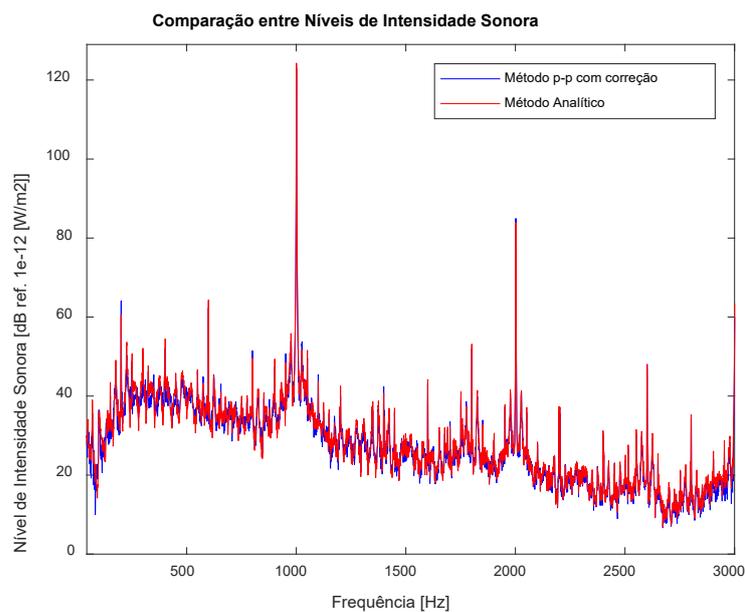


Figura B.36: Resultado 8; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.

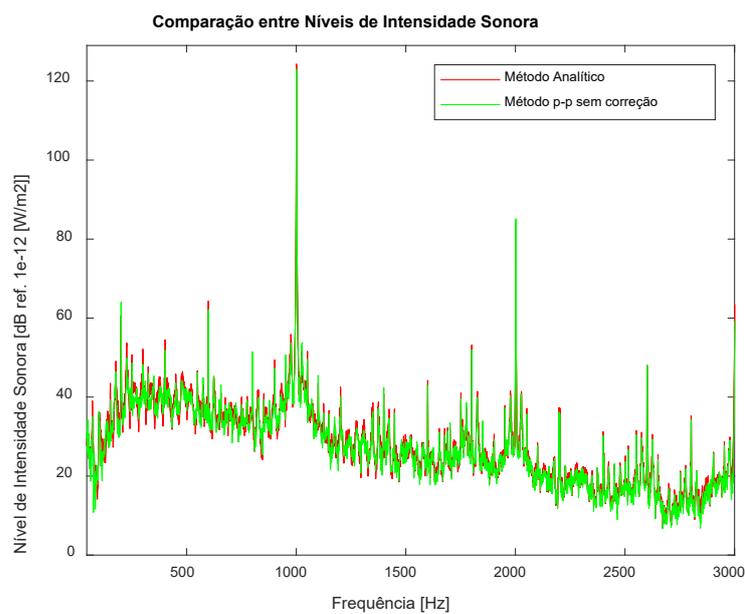


Figura B.37: Resultado 9; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.

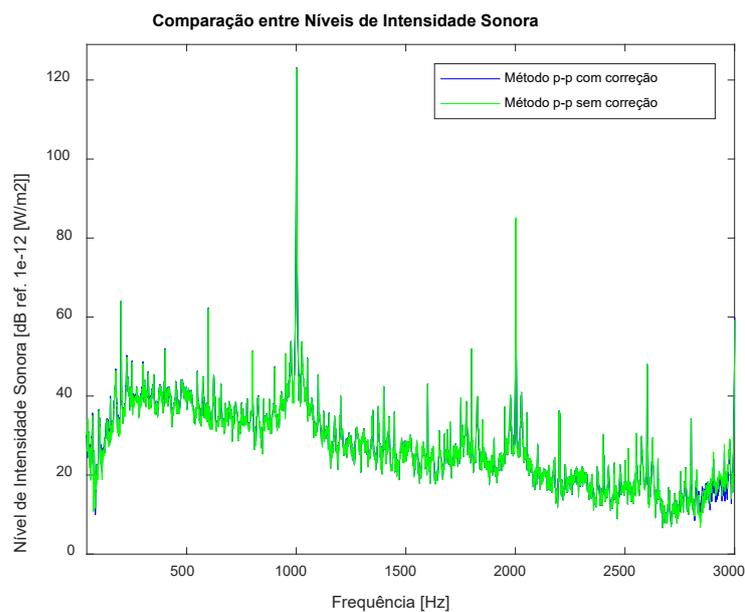


Figura B.38: Resultado 10; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.

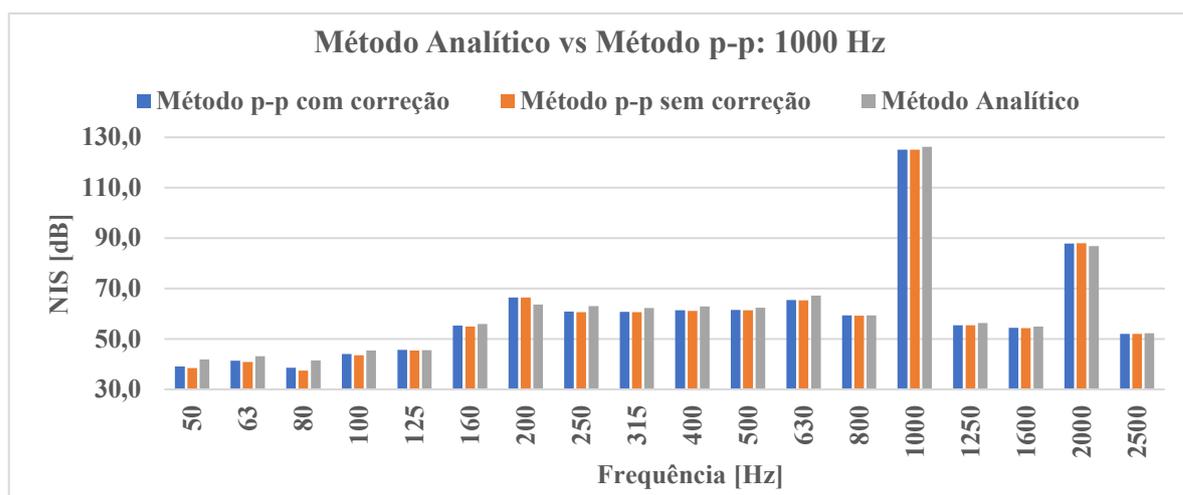


Figura B.39: Resultado 11; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.

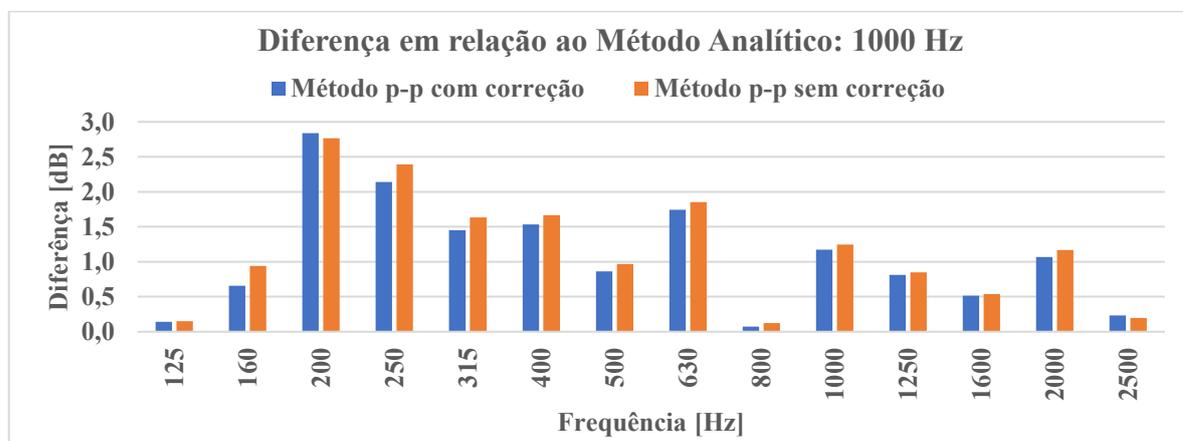


Figura B.40: Resultado 12; Sinal tonal de 1000 [Hz]; dupla 2.

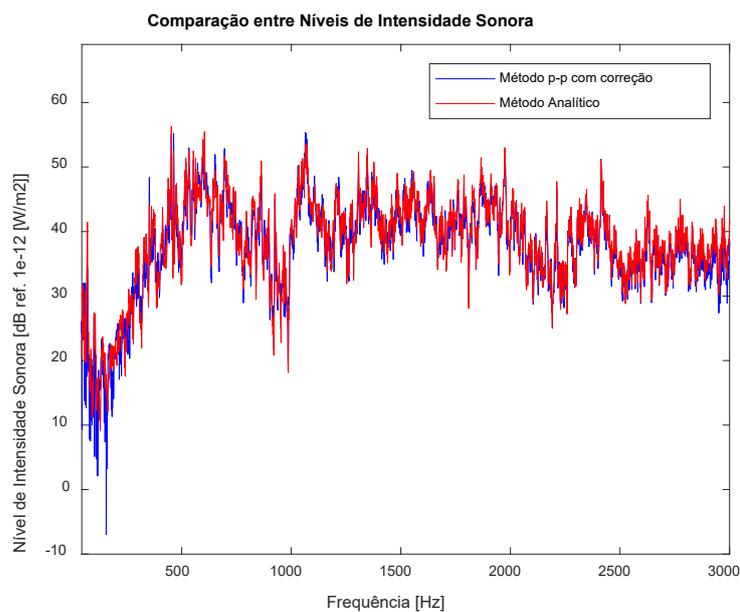


Figura B.41: Resultado 8; Ruído Industrial 1; dupla 2.

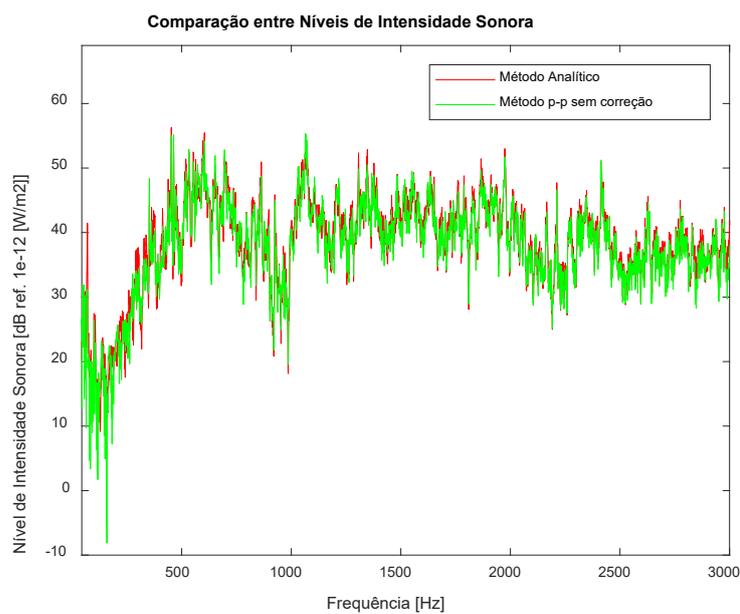


Figura B.42: Resultado 9; Ruído Industrial 1; dupla 2.

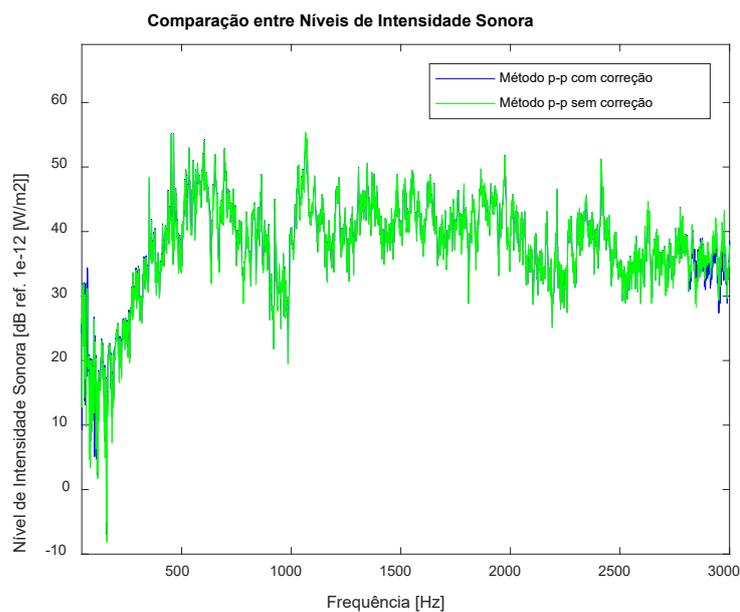


Figura B.43: Resultado 10; Ruído Industrial 1; dupla 2.

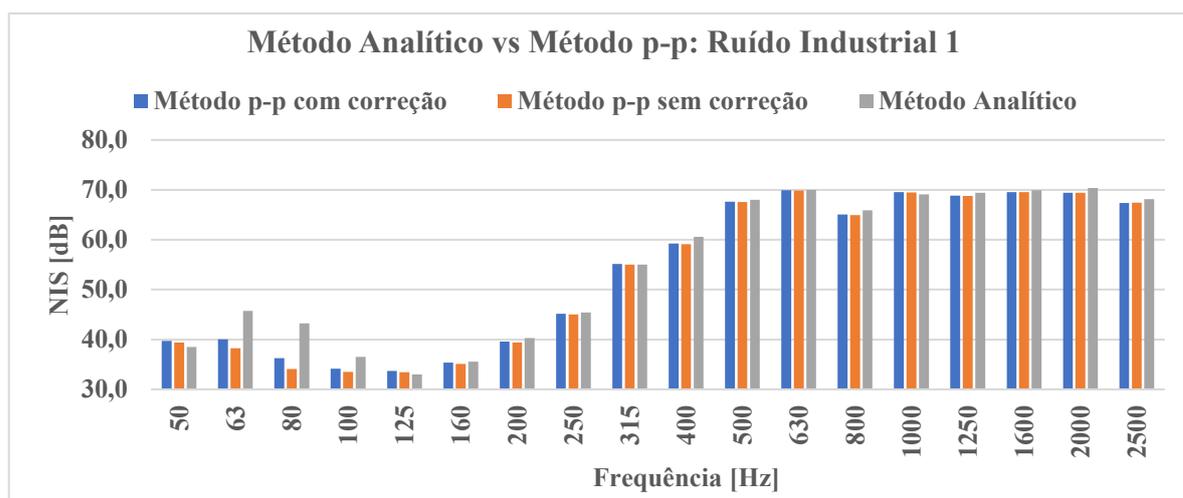


Figura B.44: Resultado 11; Ruído Industrial 1; dupla 2.

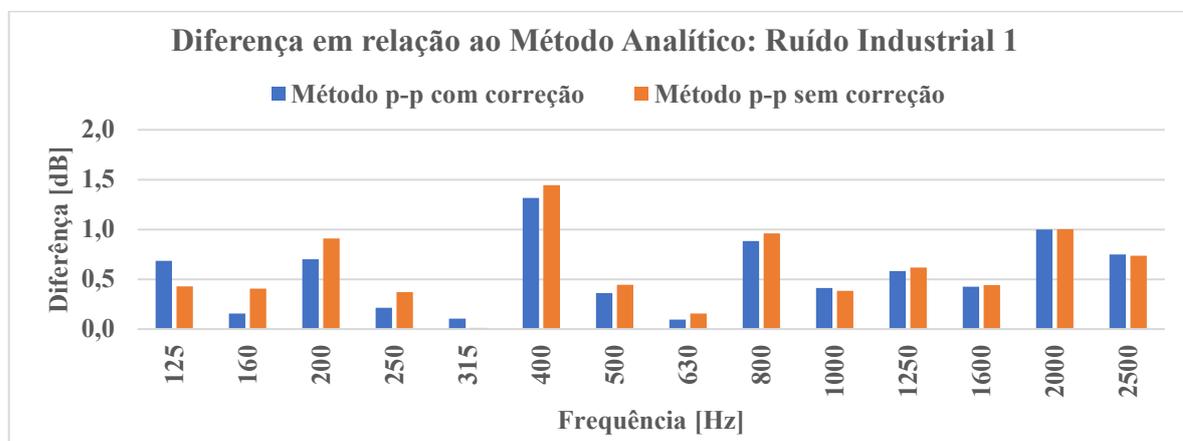


Figura B.45: Resultado 12; Ruído Industrial 1; dupla 2.

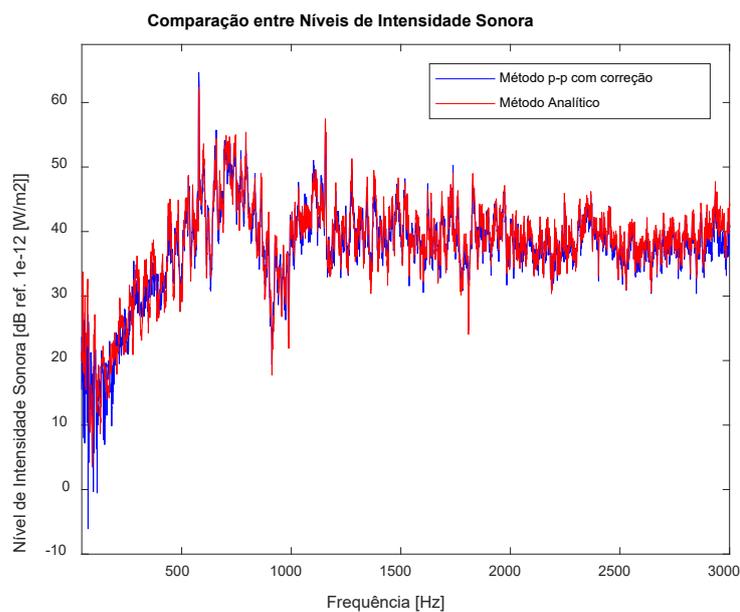


Figura B.46: Resultado 8; Ruído Industrial 2; dupla 2.

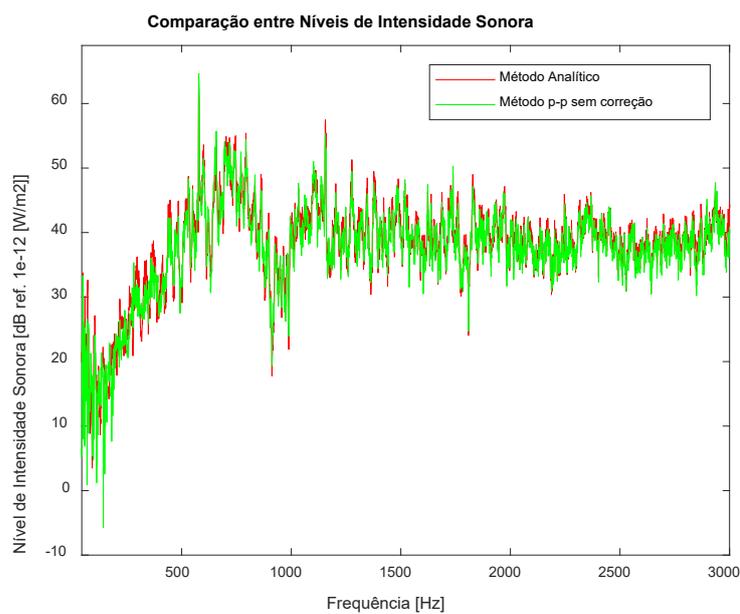


Figura B.47: Resultado 9; Ruído Industrial 2; dupla 2.

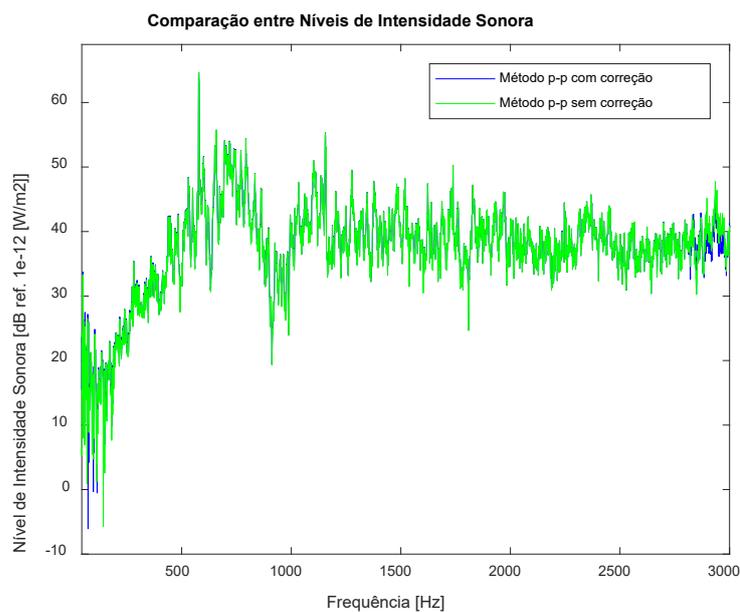


Figura B.48: Resultado 10; Ruído Industrial 2; dupla 2.

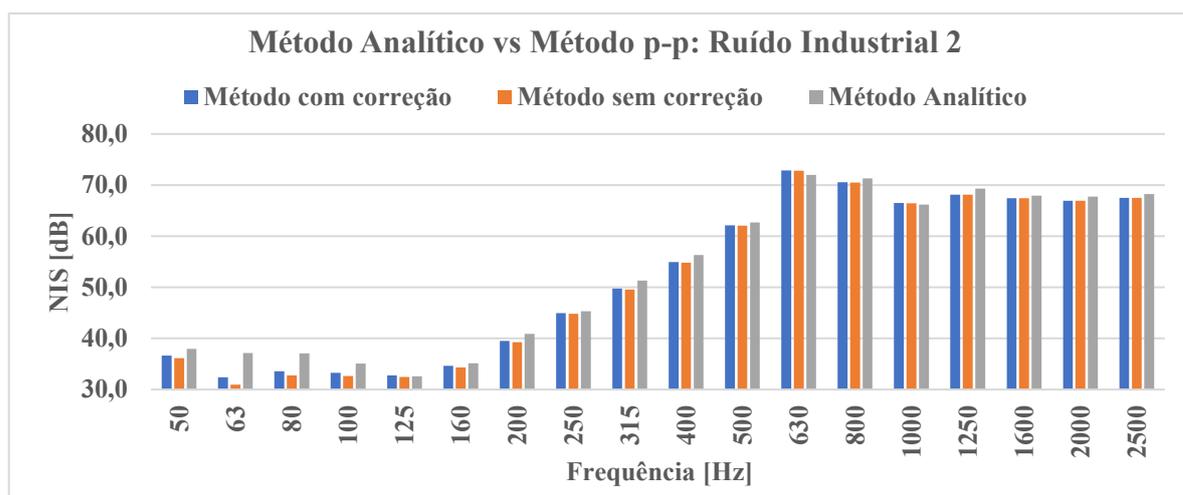


Figura B.49: Resultado 11; Ruído Industrial 2; dupla 2.

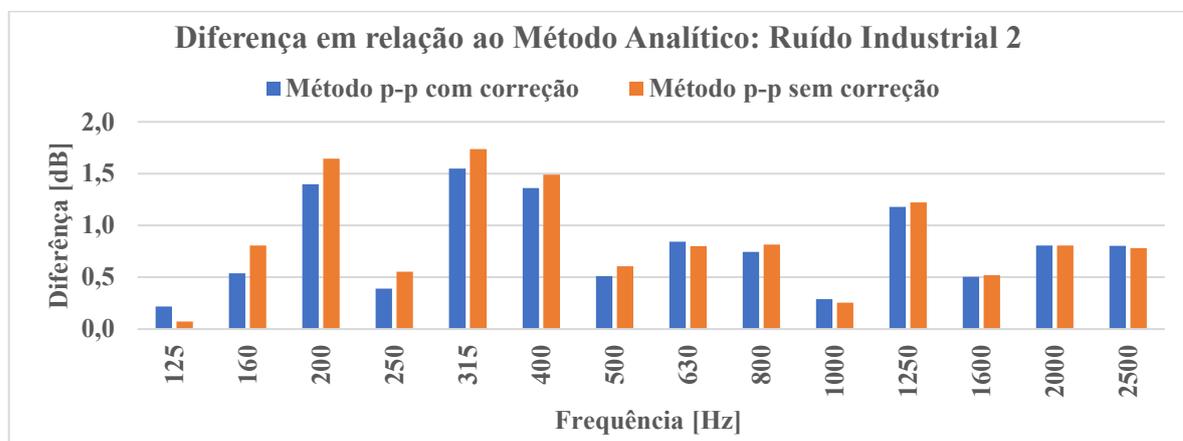


Figura B.50: Resultado 12; Ruído Industrial 2; dupla 2.

APÊNDICE C - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

A Tab. C.1 mostra as especificações do microfone da Piezotronics modelo 378B20.

Tabela C.1: Especificações do microfone modelo 378B20 Piezotronics.

Model	378B20
Nominal Diameter	1/2"
Response Characteristic	Random Incidence
Open Circuit Sensitivity at 250 [Hz] ($\pm 1,7$ [dB])	50 [mV/Pa]
Frequency Range (± 1 [dB])	5 [Hz] to 6,3 [kHz]
Frequency Range (± 2 [dB])	3,15 [Hz] to 12,5 [kHz]
Lower Limiting Frequency (-3 [dB] point)	1 [Hz] to 2,4 [Hz]
Dynamic Range (3% Distortion Value)	146 [dB]
Dynamic Range at Nominal Sensitivity	135 [dB]
Noise Floor (Cartridge Thermal Noise)	16 [dBA]
Excitation Voltage	20 to 32 [VDC]
Polarization Voltage	0 [Volts] (Prepolarized Style)
Constant Current Excitation	2-20 [mA]
Operating Temperature	minus 40 to 80 [°C]
Connector	BNC
Size (Diameter x Length, with Grid cap)	0,52" x 3,38"
Microphone Component	377B20
Preamplifier Component	426E01

As especificações do microfone modelo MP 201 da BSWA Tech são apresentadas pela Tab. C.2.

Tabela C.2: Especificações do microfone modelo MP 201 da BSWA Tech.

Model	MP 201
Optimized	Free-field
Diameter	1/2"
Standards (IEC 61672)	Class 1
Frequency Response [Hz]	6,3 - 20k
Open-circuit Sensitivity [mV/Pa](± 2 [dB])	50
Dynamic Range [dBA]	17 - 146
Inherent Noise [dBA]	17
Venting	Rear
Operating Temperature [oC]	-30 to 80
Operating Humidity (RH)	0 - 98%
Capacitance [pF]	16
Equivalent Air Volume [mm ³]	46
Temperature Coefficient [dB/oC]	-0,012
Humidity Influence	< 0,1
Pressure Coefficient (250 [Hz]) [dB/kPa]	-0,004
Dimensions	IEC 61094-4 Type WS2
Screw Thread	M11.7 - 60UNS
Matching Preamplifiers	MA231/MA221/MA231T

Com relação às especificações dos dois modelos de microfones utilizados, a informação mais relevante é a de que um deles foi desenvolvido para funcionar de maneira otimizada em campos sonoros difusos (*random incidence*) e outro em campo livre. Como a Dupla 1 de microfones usada no trabalho utilizou os dois modelos diferentes, é preciso ressaltar que, para a faixa de interesse do trabalho, a resposta do microfone de campo livre é muito próxima a do microfone de incidência randômica em um campo difuso. Como já explicado anteriormente, de fato, somente quando se começa a ter frequências mais altas, os microfones desenvolvidos para diferentes campos sonoros passam a apresentar respostas com diferenças significativas.

As especificações da placa de aquisição NI 9234 são mostradas na Tab. C.3. As características que são mais relevantes para o presente trabalho são: a placa possui filtros *anti-aliasing* embutidos e tem um *phase-mismatch* muito baixo entre os canais de aquisição.

Tabela C.3: Especificações da placa de aquisição NI 9234.

<u>Input Characteristics</u>	
Number of channels	4 analog input channels
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-Sigma (with analog prefiltering)
Sampling mode	Simultaneous
Type of TEDS supported	IEEE 1451.4 TEDS Class I
<u>Internal master timebase (fM)</u>	
Frequency	13.1072 MHz
Accuracy	±50 ppm maximum
<u>Data rate range (fs)</u>	
Using internal master timebase	
Minimum	1.652 kS/s
Maximum	51.2 kS/s
Using external master timebase	
Minimum	0.391 kS/s
Maximum	52.734 kS/s
Data rates 1 (fs)	(fM ÷ 256)/n, n = 1, 2, ..., 31
Input coupling	AC/DC (software-selectable)
<u>AC cutoff frequency</u>	
a -3 dB	0.5 Hz
a -0.1 dB	4.6 Hz maximum
<u>Input range</u>	
AC voltage full-scale range	
Minimum	±5 Vpk
Typical	±5.1 Vpk
Maximum	±5.2 Vpk
Common-mode voltage range (AI- to earth ground)	±2 V maximum
<u>IEPE excitation current (software-selectable on/off)</u>	
Minimum	2.0 mA
Typical	2.1 mA
Power-on glitch	90 µA for 10 µs
IEPE compliance voltage	19 V maximum
<u>Overvoltage protection (with respect to chassis ground)</u>	
For a signal source connected to AI+ and AI-	±30 V
For a low-impedance source connected to AI+ and AI-	-6 V to 30 V
Input delay	(40 + 5/512)/fs + 2.6 µs
<u>Gain drift</u>	
Typical	0.14 m dB/°C (16 ppm/°C)
Maximum	0.45 m dB/°C (52 ppm/°C)
<u>Offset drift</u>	
Typical	19.2 µV/°C
Maximum	118 µV/°C
<u>Channel-to-channel matching</u>	
Phase (fin in kHz)	(fin * 0.045° + 0.04 maximum)
<u>Gain</u>	
Typical	0.01 dB
Maximum	0.04 dB
<u>Passband</u>	
Frequency	0.45 * fs
Flatness (fs = 51.2 kS/s)	40 m dB (pk-to-pk maximum)
Phase nonlinearity (fs = 51.2 kS/s)	±0.45° maximum
<u>Stopband</u>	
Frequency	0.55 * fs
Rejection	100 dB
Alias-free bandwidth	0.45 * fs

Oversample rate	64 * fs
Crosstalk (1 kHz)	-110 dB
<u>CMRR (fin ≤ 1 kHz)</u>	
Minimum	40 dB
Typical	47 dB
SFDR (fin = 1 kHz, -60 dBFS)	120 dB

A lã de rocha Biolã, utilizada na terminação anecóica no tubo de um dos experimentos, possui os coeficientes de absorção sonora mostrados pela Tab. C.4.

Tabela C.4: Coeficientes de absorção sonora em bandas de oitava da lã de rocha Biolã.

Produto	Espessura (mm)	Frequência [Hz]						
		125	250	500	1000	2000	4000	NCR
Lã de rocha Biolã	50	0,18	0,48	0,78	0,89	0,91	0,93	0,75

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLOU, G. *Handbook for Sound Engineers*. 4^a ed. Elsevier. 2008.

BARRON, R. F. *Industrial Noise Control and Acoustics*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.

BERANEK, L. L & MELLOW, T. J. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Oxford: Elsevier. UK, 2012.

BENDAT J. S. & PIERSOL A. G. *Random Data: Analysis and Measurements Procedures*. 2^a ed. United States of America: John Wiley & Sons, 1986.

BISTAFA, S. R. *Acústica aplicada ao controle de ruído*. São Paulo: Blucher. Brasil, 2006.

BRÜEL & KJÆR PUBLICATION. *Sound Intensity*. Nærum, Denmark, 1993.

BRÜEL & KJÆR PUBLICATION. *Microphone Handbook*. Nærum, Denmark, 1996.

CHUNG, J. Y. *Cross-spectral Method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch*. J. Acoust. Soc. Amer., **64** (1978) 1613-16.

COX, T J. & D'ANTONIO, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. 1^a ed. New York: Spon Press, 2004.

DUNN, I. P. & DAVERN, W. A. *Calculation of Acoustic Impedance of Multi-layer Absorbers*. Applied Acoustics, **19** (1986) 321-334.

FAHY, F. J. *Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphones signals*. The Journal of the Acoustical Society of America, **62 (L)** (1977) 1057-9.

FAHY, F. J. *Sound Intensity*. 2^a ed. London: E & FN Spon, 1995.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. *Física I*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1996.

HARRIS, C. M. *Noise Control in Building*. McGraw-Hill, Inc., 1994.

HOUCQUE, D. *Introduction to MATLAB For Engineering Students*. Northwestern University. Version 1.2, August 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *IEC 1043: Electroacoustics — Instruments for the measurement of sound intensity — Measurement with pairs of pressure sensing microphones*. Genève, Switzerland, 1993. 69p.

IRVINE, L. K. & RICHARDS, R. L. *Acoustics and Noise Control Handbook for Architects and Builders*. Krieger Pub Co. 1998.

JACOBSEN, F. *A note on instantaneous and time-averaged active and reactive sound intensity*. Journal of Sound and Vibration **147(3)**, 489-496 (1991).

JACOBSEN, F.; CUTANDA, V.; JUHL, P. M. *A numerical and experimental investigation of the performance of sound intensity probes at high frequencies*. The Journal of the Acoustical Society of America **103**, 953-961 (1998);

JACOBSEN, F., & DE BREE, H-E. (2005). *A comparison of two different sound intensity measurement principles*. Acoustical Society of America. Journal, **118(3)**, 1510-1517.

JACOBSEN, F. *Sound Intensity*. Capítulo 25 em *Springer Handbook of Acoustics*, ed. Thomas Rossing. Springer Verlag, New York, 2007.

JACOBSEN, F. *State of the art of sound intensity and its measurement and applications*. Proceedings of 17th International Congress on Acoustics, Rome, Italy, 2-7 September. 2001.

JACOBSEN, F. *Sound Intensity and Its Measurement and Applications*. Denmark: Technical University of Denmark. 2011.

KINSLER, L. E.; FREY, R. A.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J.V. *Fundamentals of Acoustics*. 4^a ed. John Wiley & Sons, Inc. 2000.

KRISHNAPPA, G. *Cross-spectral method of measuring acoustic intensity by correcting phase and gain mismatch errors by microphone calibration*. The Journal of the Acoustical Society of America. **69**, 307 (1981);

MYERS, K. *Design of a Catenoidal Shaped Anechoic Termination*. Tese - Western Michigan University. Kalamazoo, Michigan. Abril 2012

MORSE, P. M. & INGARD, K. U. *Theoretical Acoustics*. New York, McGraw-Hill.1986.

MUNJAL, M. L. *Acoustics Of Ducts And Mufflers: With Application To Exhaust And Ventilation System Design*. John Wiley & Sons, Inc. 1987.

PCB PIEZOELECTRONICS. *Microphone Handbook*. Depew, New York, USA, 2013

PPGEM-UFSC. *Análise Digital de sinais*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

PIERCE, A. D. *Basic Linear Acoustics*. Capítulo 3 em *Springer Handbook of Acoustics*, ed. Thomas Rossing. Springer Verlag, New York, 2007.

PROAKIS, J. G. & MANOLAKIS, D. G. *Digital Signal Processing*. 4^a ed. New Jersey, USA: Pearson Education, Inc. 2007.

GOMES, C. V. S. *Comportamento Acústico De Materiais Absorvedores Em Multicamadas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil. 2015.

SHIN, K. & HAMMOND, J. K. *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*. UK: John Wiley & Sons, 2008.

SHIRAHATTI, U. S. & CROCKER, M. J. *Two-microphone finite difference approximation errors in the interference fields of point dipole sources*. The Journal of the Acoustical Society of America, **92** (1992), 258;

THOMPSON, J. K. & TREE, D. R. *Finite Difference Approximation Errors in Acoustic Intensity Measurements*. Journal of Sound and Vibration **75(2)** (1981) 229-238.

TOHYAMA, M. & KOIKE, T. *Fundamentals of Acoustic Signal Processing*. San Diego, California: Academic Press. 1998.

WATKINSON, P. S. & FAHY, F. J. *Characteristics of Microphone Arrangements for Sound Intensity Measurement*. Journal of Sound and Vibration (1984) **94(2)**, 299-306

WILLIAM J. PALM III. *Introduction to MATLAB® for Engineers*. 3rd ed. New York, NY: The McGraw-Hill, 2011.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A.; SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W. *Física 1: Mecânica*. 12ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil. 2008.