



Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Juan José Gómez Acosta

**Projeto e desenvolvimento de um sonômetro
de baixo custo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Maurício Nogueira Frota
Coorientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro
outubro de 2023



Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Juan José Gómez Acosta

Projeto e desenvolvimento de um sonômetro de baixo custo

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Maurício Nogueira Frota

Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Coorientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Elisabeth Costa Monteiro

Programa de Pós-graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Daniel Ramos Louzada

Programa de Pós-graduação em Metrologia – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de outubro de 2023

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Juan José Gómez Acosta

Graduou-se em Engenharia de Som pela Universidade de San Buenaventura (Bogotá, Colombia em 2015). Colaborador da equipe de pesquisadores do projeto P&D Light/Anel 00382-0128/2019, "Controle de níveis de pressão sonora em subestação de energia" e Programador na Interlaken Tecnologia LTDA. Possui conhecimento e experiência na área de medições *in-situ* de campos sonoros, acústica arquitetônica e controle de ruído assim como desenvolvimento de software/hardware para integração com sistemas embarcados.

Ficha Catalográfica

Gómez Acosta, Juan José

Projeto e desenvolvimento de um sonômetro de baixo custo / Juan José Gómez Acosta; orientador: Maurício Nogueira Frota; coorientador: Carlos Roberto Hall Barbosa. – 2023.

141 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2023.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação – Teses. 3. Metrologia. 4. Nível de pressão sonora. 5. Sonômetro. 6. Substação de energia. 7. Legislação ambiental. I. Frota, Maurício Nogueira. II. Barbosa, Carlos Roberto Hall. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia. IV. Título.

CDD: 389.1

À minha mãe, por tudo.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por colocar em minha vida todas as pessoas que me ajudaram nessa busca de aperfeiçoamento profissional.

Agradeço, especialmente aos meus orientadores, pela experiência e conhecimento transmitidos nesta exigente área da pesquisa acadêmica. Ao orientador, Professor Maurício Frota, pelo rigoroso acompanhamento na geração deste documento, artigos publicados relacionados ao tema e pelo apoio nos momentos em que pensei em desistir. Ao co-orientador, Prof. Carlos Hall, pelas valiosas sugestões e acompanhamento durante o desenvolvimento da pesquisa. Agradeço também à equipe de apoio do Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio pela disposição e empenho sempre demonstrados

À CAPES e à PUC-Rio pelos auxílios financeiros concedidos na forma de bolsas de estudo.

Ao programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio, pela oportunidade de participar da equipe de pesquisadores do P&D *Light/Anel 00382-0128/2019* ("*Controle de níveis de pressão sonora em subestação de energia*"), cujo projeto motivou e viabilizou o desenvolvimento de minha pesquisa de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Resumo

Gómez Acosta, Juan José; Frota, Maurício Nogueira; Barbosa, Carlos Roberto Hall. **Projeto e desenvolvimento de um sonômetro de baixo custo**. Rio de Janeiro, 2023. 141p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta pesquisa de mestrado teve por objetivo desenvolver uma alternativa tecnológica de baixo custo que seja capaz de realizar medições acústicas visando suprir demandas do setor acadêmico e industrial. A preocupação em reduzir custos constituiu-se na motivação do trabalho na expectativa de que o sonômetro desenvolvido seja capaz de viabilizar projetos essencialmente de cunho social, comumente descartados pelos altos custos hoje associados a medições confiáveis e à dependência de componentes eletrônicos não disponíveis no mercado nacional. Como fundamento, o instrumento de medição proposto, projetado para fornecer a exibição remota e permitir medições precisas de formas de onda capturadas de uma fonte de microfone por meio de um servidor de áudio Jack, opera em sistema Linux embarcado. Faz uso da análise espectral para permitir a visualização da forma de onda acústica no domínio do tempo, considerando funcionalidades dedicadas consideradas essenciais para fornecer resultados de medições confiáveis, quer dos níveis de pressão sonora, quer de diferentes descritores acústicos. O sonômetro foi validado com base em resultados de uma intercomparação de medições realizadas em laboratório e no campo, tomando como referência resultados confiáveis gerados por um sonômetro comercial (CESVA SC420), calibrado por um laboratório acreditado para medições acústicas junto à Rede Brasileira de Calibração (RBC/Inmetro).

Palavras-chave

Metrologia; Nível de pressão sonora; Sonômetro; Subestação de energia; Legislação ambiental.

Abstract

Gómez Acosta, Juan José; Frota, Maurício Nogueira (Advisor); Barbosa, Carlos Roberto Hall (Co-Advisor). **Design and development of a low cost sound level meter**. Rio de Janeiro, 2023. 141p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This master's research aimed to develop a low-cost technological alternative capable of carrying out acoustic measurements to meet the demands of the academic and industrial sectors. The concern with reducing costs was the motivation for the work in the expectation that the sound level meter developed would also enable essentially social projects, commonly discarded due to the high costs currently associated with reliable measurements and the dependence on electronic components not available on the national market. As a foundation, the proposed measurement instrument operates on an embedded Linux system and is designed to provide a remote display and enable accurate measurements of waveforms captured from a microphone source via a Jack audio server. It uses spectral analysis to allow visualization of the acoustic waveform in the time domain, considering dedicated functionalities essential to provide reliable measurement results, whether of sound pressure levels or different acoustic descriptors. The sonometer was validated based on results from an intercomparison of laboratory and field measurements, taking as a reference reliable results generated by a commercial sound level meter (CESVA SC420) calibrated by a laboratory accredited for acoustic measurements by the Brazilian Calibration Network (RBC/Inmetro).

Keywords

Metrology; Pressure sound level; Sound level meter; Electrical station; Environmental legislatio.

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Contextualização	18
1.2	Motivação	26
1.3	Objetivos: geral e específicos	27
1.4	Metodologia	27
1.5	Estrutura da dissertação	28
2	Conceitos e definições	30
2.1	Propagação do som	30
2.2	Unidades de medida	31
2.2.1	Decibel (dB)	31
2.3	Parâmetros acústicos	32
2.3.1	Velocidade do som (c)	32
2.3.2	Amplitude (A)	33
2.3.3	Período (T)	34
2.3.4	Frequência (f)	34
2.3.5	Comprimento de onda (λ)	36
2.3.6	Número de Onda (k)	36
2.4	Grandezas acústicas	36
2.4.1	Pressão Sonora	36
2.4.2	Velocidade da Partícula	37
2.4.3	Impedância Acústica	38
2.4.4	Fator de Diretividade (Q)	40
2.4.5	Índice de Diretividade (DI)	40
2.4.6	Intensidade Acústica (I)	40
2.4.7	Densidade de energia acústica (D)	42
2.5	Equação de onda acústica	44
2.6	Tipos de ondas	44
2.7	Tipos de fontes	45
2.8	Sistema auditivo humano e critérios acústicos	49
2.8.1	O ouvido humano	49
2.8.2	Relação entre nível de pressão, altura e frequência da onda sonora	52
2.8.3	Mascaramento do som	53
2.8.4	Sonoridade	53
3	Medição acústica: Instrumentação e normalização aplicável	55
3.1	Medições de pressão sonora e potência sonora	55
3.1.1	O Sonômetro	58
3.1.2	Tipos de sonômetro	58
3.1.3	Descritores Acústicos	59
3.1.4	Ponderação em frequência	62
3.1.5	Ponderação em tempo	63
3.1.6	Sonômetro Cesva SC420	64
3.2	O Processo de medição	66

3.3	Normalização e legislação aplicável	68
3.3.1	Normas técnicas e diretivas relacionadas ao tema da pesquisa	68
3.3.1.1	Normas internacionais relacionadas ao tema da pesquisa	68
3.3.1.2	Normas técnicas brasileiras relacionadas ao tema da pesquisa	69
4	Protótipo de sonômetro: concepção e desenvolvimento	70
4.1	Sistemas embarcados	71
4.1.1	SBC Orange Pi PC Plus	74
4.2	Estrutura de áudio no Linux	76
4.3	Implementação do sonômetro	78
4.3.1	Etapa de entrada	78
4.3.2	Etapa de Amplificação	80
4.3.3	Etapa de condicionamento e processamento do sinal	81
4.3.4	Etapa de visualização	85
5	Validação do protótipo do sonômetro de baixo custo	87
5.1	Local das Medições	87
5.2	Medições de Tons Puros	89
6	Conclusões e Recomendações	105
	Referências bibliográficas	107
A	Artigos Publicados	115
A.1	Artigo publicado em revista científica	115
A.2	Artigo submetido para congresso internacional	115
B	Configuração Orange PI PC Plus	116
B.1	Instalação do sistema operacional	116
B.1.1	Instalação de pacotes e bibliotecas	117
B.2	Configuração de rede	119
B.2.1	Instalação e configuração do servidor gráfico X11 VNC Server	122
B.3	Configuração do sistema para processamento de áudio	126
B.3.1	Instalação e configuração ALSA	127
B.3.2	Instalação e configuração servidor de áudio Jack	128
C	Tecnologias de desenvolvimento utilizadas	134
C.1	Node.js	134
C.1.1	NVM (Node Version Manager)	135
C.1.1.1	Instalação e configuração do NVM	135
C.1.2	Gerenciadores de pacotes do Node.js	136
C.2	Electron	136
C.3	React	138
C.4	Python	139
C.4.1	pyenv	139
C.4.2	Gerenciador de pacotes pip	140
D	Certificado de calibração	141

Lista de figuras

Figura 1.1	Definição dos pontos de monitoramento da medição da pressão sonora. Na figura, as denominações TRAF0 1 e TRAF0 2 indicam a posição dos dois transformadores de alta tensão em operação.	21
Figura 1.2	Posicionamento da estação remota de vigilância acústica.	22
Figura 1.3	Evolução temporal do nível de pressão sonora (Parâmetro L_{Aeq} - monitoramento de longa duração).	23
Figura 1.4	Resultados em espectro de 1/3 de oitavas (Medições associadas Ponto 1 de medição).	24
Figura 1.5	Diagrama de blocos do sistema de mascaramento acústico	25
Figura 1.6	Soluções de mitigação propostas (a) barreiras modulares, (b) Biombos acústicos, (c) defletores acústicos.	26
Figura 1.7	Desenho da pesquisa (fases de desenvolvimento e referencial teórico).	28
Figura 2.1	Amplitude e comprimento de onda de uma onda acústica.	33
Figura 2.2	Radiação de uma fonte monopolo [13] [21].	46
Figura 2.3	Radiação de uma fonte dipolo [13] [21].	47
Figura 2.4	Radiação de uma fonte quadrupolo linear [13] [21].	48
Figura 2.5	Radiação de uma fonte quadrupolo lateral [13] [21].	49
Figura 2.6	Corte transversal do ouvido humano [13].	50
Figura 2.7	Anatomia do pavilhão auricular [33].	51
Figura 2.8	Níveis audíveis em função da frequência [25].	52
Figura 2.9	Amplitude relativa do deslocamento da membrana basilar para diferentes tons puros [25].	53
Figura 2.10	Curvas NS para tons puros [19].	54
Figura 3.1	Cadeia de medição do sonômetro	58
Figura 3.2	Curvas de ponderação usadas na avaliação do ruído [13].	63
Figura 3.3	Sonômetro Cesva SC420.	64
Figura 3.4	Modos de medição sonômetro SC420: (a) Modo sonômetro (b) Modo analisador de espectro para bandas de 1/3 de oitava.	65
Figura 3.5	Software Cesva Lab.	66
Figura 4.1	Diagrama do protótipo de sonômetro.	71
Figura 4.2	Arquitetura de um sistema embarcado Linux.	73
Figura 4.3	Linha do tempo de sistemas Linux embarcados.	74
Figura 4.4	Componentes Orange Pi PC Plus (a) vista do topo (b) e do verso da placa [47].	75
Figura 4.5	Pinagem Orange Pi PC Plus [47].	76
Figura 4.6	Estrutura básica de áudio no Linux.	78
Figura 4.7	Microfone dbx RTA-M.	79
Figura 4.8	Gráfico de resposta em frequência do microfone dbx RTA-M.	79

Figura 4.9	Gráfico de resposta direcional do microfone dbx RTA-M.	80
Figura 4.10	Interface de áudio Focusrite 2i2 - primeira geração.	81
Figura 4.11	Gráfica de frequência sem ponderação.	84
Figura 4.12	Implementação curva de ponderação A.	84
Figura 4.13	Implementação curva de ponderação C.	85
Figura 4.14	Interfçe gráfica de usuário da aplicação desktop.	85
Figura 4.15	Módulo Sidebar (vermelho), módulo Acoustic Processing (amarelo), e módulo Graphics (azul) da aplicação desktop.	86
Figura 5.1	Paróquia Santos Anjos	87
Figura 5.2	Planta da Paróquia Santos Anjos e localização das fontes sonoras (retângulos vermelhos) e do ponto de medição (círculo azul).	88
Figura 5.3	Montagem sonômetro CESVA SC420 e microfone dbx RTA-M do sonômetro de baixo custo desenvolvido. (a) Vista Posterior (b) Vista frontal.	89
Figura 5.4	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 63 Hz.	90
Figura 5.5	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 80 Hz.	90
Figura 5.6	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 100 Hz.	91
Figura 5.7	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 125 Hz.	91
Figura 5.8	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 160 Hz.	92
Figura 5.9	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 200 Hz.	92
Figura 5.10	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 250 Hz.	93
Figura 5.11	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 315 Hz.	93

Figura 5.12 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 400 Hz.	94
Figura 5.13 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 500 Hz.	94
Figura 5.14 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 630 Hz.	95
Figura 5.15 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 800 Hz.	95
Figura 5.16 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 1000 Hz.	96
Figura 5.17 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 1250 Hz.	96
Figura 5.18 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 1600 Hz.	97
Figura 5.19 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 2000 Hz.	97
Figura 5.20 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 2500 Hz.	98
Figura 5.21 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 3150 Hz.	98
Figura 5.22 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 4000 Hz.	99
Figura 5.23 Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 5000 Hz.	99

Figura 5.24	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 6300 Hz.	100
Figura 5.25	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 8000 Hz.	100
Figura 5.26	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 10000 Hz.	101
Figura 5.27	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 12500 Hz.	101
Figura 5.28	Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 16000 Hz.	102
Figura B.1	Imagem do SO Armbian jammy 23.02.2 [64].	116
Figura B.2	Adicionar usuário ao grupo administrador do sistema.	117
Figura B.3	Geração chave SSH.	119
Figura B.4	Conexão de rede em uso pelo sistema.	119
Figura B.5	Estado desabilitado da NIC WiFi.	120
Figura B.6	Estado habilitado da NIC WiFi.	120
Figura B.7	Varredura de redes WiFi disponíveis.	120
Figura B.8	Conexão a rede WiFi.	121
Figura B.9	Endereços IP das NIC do sistema.	121
Figura B.10	Configuração NIC WiFi como conexão padrão do sistema.	122
Figura B.11	Verificação de instalação do pacote x11vnc no sistema.	122
Figura B.12	Configuração de senha para acesso remoto pelo vnc.	123
Figura B.13	Configuração do x11vnc como serviço do sistema.	123
Figura B.14	Configuração de resolução da tela.	124
Figura B.15	Configuração de endereço IP e nome de usuário para conexão remota.	125
Figura B.16	Conexão a Orange Pi PC Plus.	125
Figura B.17	Notificação de conexão sem criptografia.	126
Figura B.18	Conexão tela remota.	126
Figura B.19	Versão do driver de ALSA no sistema.	127
Figura B.20	Dispositivos de áudio disponíveis no sistema.	127
Figura B.21	Configuração para usar prioridade de tempo real com o <i>jackd</i> .	128
Figura B.22	Script de configuração para usar o recurso de tempo real com <i>jackd</i> .	129
Figura B.23	Parâmetros configuráveis para interface focusrite 2i2.	130
Figura B.24	Configuração de parâmetros na interface do <i>qjackctl</i> .	130
Figura B.25	Execução do módulo de medição <i>JAAA</i> .	131

Figura B.26	Execução do módulo de medição <i>JAPA</i> .	132
Figura B.27	Configuração das entradas de áudio desde o canal 1 de microfone da interface Focusrite 2i2 (a) ao módulo de medição <i>JAAA</i> e (b) ao módulo de medição <i>JAPA</i> .	132
Figura B.28	Fluxo de medição com módulo <i>JAAA</i> .	133
Figura B.29	Fluxo de medição com módulo <i>JAPA</i> .	133
Figura C.1	Processo de uma aplicação Node.js [85].	134
Figura C.2	Configuração do NVM no arquivo <i>.bashrc</i>	135
Figura C.3	Instalação do Node.js, versão lts pela linha de comandos.	135
Figura C.4	Arquitetura de uma aplicação Electron (a) Comunicação entre o processo principal e o processo de renderização (b) Comunicação entre o processo principal e múltiplos processo de renderização.	137
Figura C.5	Comparação entre padrões de renderização <i>SSR</i> e <i>SPA</i> .	138
Figura D.1	Certificado de calibração.	141

Lista de tabelas

Tabela 1.1	Sprints do P&D “Controle da Pressão Sonora em Subestação de Energia”	20
Tabela 1.2	Caracterização de som tonal [7]	23
Tabela 1.3	Resultados das medições de pressão sonora	24
Tabela 2.1	Referência a unidades acústicas expressas em decibels	32
Tabela 2.2	Bandas de frequência de oitava e 1/3 de oitava [5]	35
Tabela 3.1	Níveis típicos de ruído acústico	57
Tabela 3.2	Limites de pressão sonora por tipos de área habitada e por período [7].	62
Tabela 4.1	Fatores para curvas de ponderação A e C [40]	83
Tabela 5.1	Níveis obtidos nas frequências de interesse.	103

Lista de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALSA – Advanced Linux Sound Architecture

API – Application Programming Interface

CAN – Controller Area Network

dB – decibel

dBFS – decibel Full Scale

DFT – Discrete Fourier Transform

E/S – Entrada e Saída

EDP – Equação diferencial parcial

EDL – *Acoustic Energy Density Level* (Nível de densidade de energia acústica)

ENEL – Empresa de distribuição de energia elétrica com atuação na área estudada

ERP – Enterprise Resource Planning

FFADO – Free Firewire Audio Drivers for Linux

HTTP – Hypertext Transfer Protocol

IEC – International Electrotechnical Commission

IPC – Inter Process Communication

ISO – International Organization for Standardization

I2C – Inter-Integrated Circuit

I/O – Input and Output

JSON – Javascript Object Model

KE – *Kinetic energy* (Energia cinética)

L_{Aeq} – Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado A

L95 – Descritor estatístico que caracteriza o ruído de trânsito em uma medição

NIC – Network Interface Controller

NVM – Node Version Manager

ORM – Object Relational Mapping

OSS – Open Sound System

OTG – USB On-The-Go

PCI – Peripheral Component Interconnect

PE – *Potential energy* (Energia potencial)

PMed – (Ponto de Medição): Local de realização da medição

PRL – Prevenção de Riscos Laborais

PyPi – Python Package Index

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

RISC – *Reduced Instruction Set Computer* (Computador com conjunto de instruções reduzido)

RMS – Root Mean Square

SBC – Single Board Computer

SDIO – Secure Digital Input Output

SI – Sistema Internacional de Unidades

SIL – *Sound Intensity Level* (Nível de intensidade sonora)

SO – Sistema operacional

SPA – Single Page Application

SPI – Serial Peripheral Interface

SPL – *Sound Pressure Level* (Nível de pressão sonora)

SQL – Structured Query Language

SSH – Secure Shell

SSR – Server Side Rendering

SWL – *Sound Watt Level* (Nível de potência sonora)

UART – Universal asynchronous receiver/transmitter

USART – Universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter

VNC – Virtual Network Computing

1 Introdução

A energia elétrica é um insumo essencial, do qual depende toda a cadeia de produção de bens e serviços relacionados à vida diária (e.g.: transporte de massa, comunicações, tecnologia em geral) [1]. Devido à necessidade de fornecimento de energia elétrica, o mundo está atravessando atualmente uma transição energética [2], que faz com que a infraestrutura elétrica se integre cada vez mais à paisagem urbana. Dentre os muitos aspectos relevantes a serem levados em consideração, destaca-se a necessidade de compatibilidade acústica da infraestrutura elétrica com os requisitos das normas vigentes e da regulação ambiental aplicável, em particular nas áreas residenciais, objeto desta pesquisa de Mestrado em Metrologia. Indubitavelmente, as alterações ambientais geradas por ruídos oriundos do funcionamento de máquinas e equipamentos impactam o meio ambiente e, conseqüentemente, a qualidade de vida das pessoas.

Intrínseco ao funcionamento dos transformadores de alta tensão, o ruído acústico gerado pelo seu funcionamento (pelo fenômeno de magnetostricção) pode atingir valores entre 75 dB a 85 dB (medido a 1 m de distância da caixa do transformador) [3], o que excede, substancialmente, os limites impostos pela legislação ambiental (55 dB, no período diurno e 50 dB, no período noturno), conforme definido nas normas técnicas brasileiras NBR 10.151:2019 e NBR 10.152:2019.

Estes níveis elevados da pressão sonora não apenas ocasionam desconforto ao ouvido humano, como podem suscitar ações civis contra a concessionária. Esta pesquisa de mestrado, desenvolvida no contexto do projeto P&D *Light/Anel 00382-0128/2019* ("*Controle de níveis de pressão sonora em subestação de energia*"), sob a coordenação do Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio, visou contribuir para o entendimento do processo de medição do nível de ruído gerado pela operação da subestação de energia.

1.1 Contextualização

Durante a preparação da cidade do Rio de Janeiro para os Jogos Olímpicos de 2016, a concessionária Light Energia S.A. precisou atender a

uma exigência específica do Comitê Olímpico Internacional (COI) de ampliar a capacidade de carga da subestação Leme para suprir as demandas de potência elétrica da Arena de Vôlei de Praia instalada em Copacabana. Na época a subestação Leme operava com dois transformadores de 60 MV·A os quais, após expressivos investimentos financeiros, foram substituídos por dois novos transformadores de maior capacidade (80 MV·A). Embora o objetivo de aumentar a capacidade do fornecimento de carga tenha sido atendida, o novo regime de operação desses transformadores causou um incremento do ruído acústico na vizinhança da subestação, ultrapassando os níveis acústicos aceitáveis pela legislação ambiental vigente, fato que levou aos moradores, em setembro de 2019, a impor uma ação civil contra a concessionária de energia responsável por aquela área de concessão.

Não encontrando no mercado uma solução pronta e comerciável para resolver o problema, a concessionária Light de energia elétrica contratou o projeto de P&D *Light/Anel 00382-0128/2019 ("Controle de níveis de pressão sonora em subestação de energia")*, para cumprir os seguintes objetivos: (i) conceber e implementar uma solução acústica inovadora capaz de adequar os níveis de pressão sonora na subestação Leme de energia aos limites impostos pela legislação ambiental aplicável; e (ii) validar a solução técnica proposta na subestação do Leme, operada pela concessionária de Energia Light [4].

Contratado o projeto de P&D, o primeiro desafio imposto à equipe de pesquisadores envolvidos, coordenada pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio, foi conceber, construir e validar em laboratório e no campo alternativas de medição da pressão acústica visando orientar ações de mitigação do nível do ruído gerado pela subestação, sem, entretanto, comprometer o funcionamento da subestação de energia (no caso a Subestação Leme, operada pela concessionária de energia elétrica Light SESA). Imposição essa que, certamente, impôs novos desafios na busca da solução de atenuação a ser implantada. A literatura especializada define que as técnicas e procedimentos a serem implementados devem abordar o problema de mitigação de ruído segundo quatro estratégias distintas: (i) diretamente na fonte de ruído; (ii) no caminho de sua propagação; (iii) no receptor; e (iv) numa combinação dos anteriores [5].

Assim, o projeto de P&D foi desenvolvido segundo seis grupos de atividades (sprints) específicos, visando atingir os objetivos desejados. A Tabela 1.1 caracteriza esses seis sprints.

Tabela 1.1: Sprints do P&D “Controle da Pressão Sonora em Subestação de Energia”

Sprint	Descrição do Sprint
1	Vigilância do nível de pressão sonora (implantação e validação de sistema remoto de vigilância acústica; Unidade de monitoramento e transmissão de dados em tempo real).
2	Concepção, instalação e validação de um sistema de mascaramento de ruído tonal; medição do nível de pressão sonora dos transformadores e subsistemas no ambiente da subestação e entorno).
3	Atenuação do nível de pressão sonora (Projeto computacional do sistema de atenuação de ruído e definição do modelo de instalação).
4	Fabricação de atenuadores de pressão sonora (Fabricação na unidade industrial do sistema de atenuação de ruído concebido e ensaios para caracterização dos índices normalizados de seu desempenho acústico).
5	Instalação da solução proposta e medições (Instalação do sistema de atenuação de ruído e implementação de ajustes no sistema de mascaramento de ruído tonal visando atender as especificações do projeto).
6	Monitoramento da operação, finalização e emissão de laudos técnicos. Medições de monitoramento do desempenho das soluções tecnológicas instaladas para embasamento do laudo final. Elaboração do Manual de Operação do sistema implantado e workshop de treinamento do pessoal técnico da concessionária para capacitação da equipe interna sobre procedimentos de operação e manutenção do sistema instalado e seus sistemas assessórios.

Conforme apresentado, o primeiro momento consistiu em uma campanha de medições da pressão sonora na vizinhança e no interior da subestação de energia Leme para mapear os pontos críticos [6]. Foram criteriosamente definidos oito pontos de medições, realizadas em três cenários diferentes: (i) Cenário 1 (Cenário Base), em data anterior à implementação de qualquer intervenção de mitigação proposta pelo projeto; (ii) Cenário 2, no qual as medições foram realizadas após a intervenção de manutenção contratada pela Light e realizada pela empresa WEG no transformador 2, que realizou ajustes na carcaça externa de proteção, balanceamento dos ventiladores de refrigeração

para eliminar vibrações e fontes secundárias de ruídos que podem ser evitados e reparo do sistema de lubrificação para eliminar vazamento de óleo; e (iii) Cenário 3, que mapeou o nível de pressão sonora no entorno da subestação, durante o período da pandemia do coronavírus, portanto na ausência de outras fontes externas de ruído não atribuíveis ao funcionamento da subestação (e.g: ruídos gerados por transeuntes e movimento intenso de veículos motorizados). A Figura 1.1 mostra os pontos de medição da pressão sonora na vizinhança dos transformadores de alta tensão (TRAFOS) e em outros locais de interesse (devidamente identificados) nos ambientes interno e externo da subestação de energia Leme/Light, em operação no bairro Copacabana da cidade do Rio de Janeiro.



Figura 1.1: Definição dos pontos de monitoramento da medição da pressão sonora. Na figura, as denominações TRAFO 1 e TRAFO 2 indicam a posição dos dois transformadores de alta tensão em operação.

O programa de medição incluiu, também, uma estação remota de vigilância acústica no ambiente externo à subestação, seguindo a tendência mundial de sensoriamento remoto nas chamadas “*smart cities*”, em um ponto próximo ao potencial reclamante. Conseguiu-se, assim, monitorar em tempo real os even-

tos sonoros dos pontos indicados na Figura 1.1 e avaliar se neles, o nível de pressão sonora percebido nos períodos diurno e noturno se encontra ou não em conformidade à legislação ambiental. A estação de vigilância fez uso do sensor para medição do ruído CESVA TA 120, Tipo 1, equipado com bateria BA120, Modem 3G MR120 e suporte para medições acústicas e de um sonômetro e analisador espectral tipo 1 SC420 conforme ilustrado na Figura 1.2.



Figura 1.2: Posicionamento da estação remota de vigilância acústica.

Os resultados das medições realizadas em conformidade às recomendações das normas NBR 10.151:2019 e NBR 10.152:2019 [7, 8] confirmaram que o ruído gerado pelo funcionamento da subestação de energia Leme excedia os limites recomendados pelas mesmas (50 dB, no período noturno e 55 dB, no período diurno). Em outras palavras, os limites normativos denotados pela linha vermelha da Figura 1.3, refletem ruídos residuais que não são atribuídos à operação da subestação. A Figura 1.3 mostra a evolução temporal do nível médio de energia (índice $L_{A_{eq}}$) ponderado na curva A, durante um fim de semana em que medições da pressão sonora foram realizadas, entre o dia 10 (sexta-feira) e o dia 13 (segunda-feira), no mês de abril de 2020. Esses ruídos residuais foram medidos fazendo uso do sensor para medição de ruído TA120,

que permite a detecção de tons audíveis contínuos, intermitentes, tonais e/ou impulsivos em períodos longos.

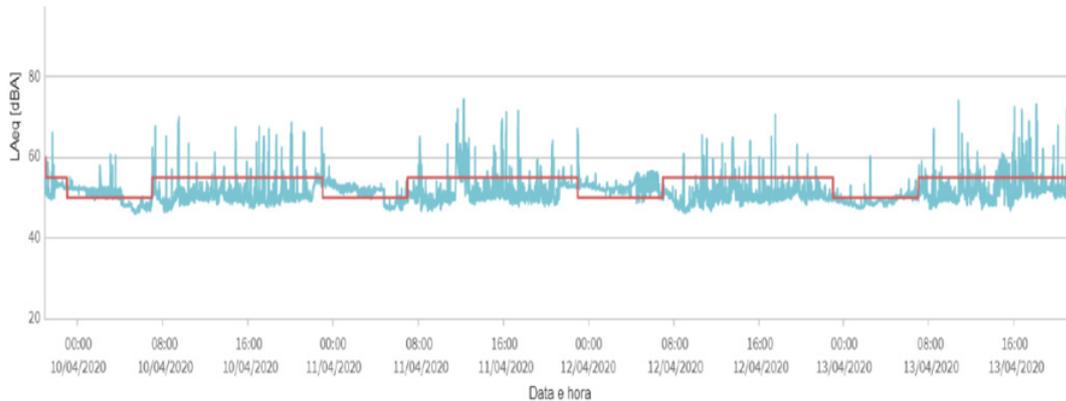


Figura 1.3: Evolução temporal do nível de pressão sonora (Parâmetro L_{Aeq} - monitoramento de longa duração).

Já na análise espectral por banda de 1/3 de oitava realizada, conseguiu-se verificar que o ruído acústico gerado pelos transformadores apresenta características tonais nas frequências de 125 Hz, 250 Hz e 400 Hz conforme ilustrado na Figura 1.4. A norma ABNT NBR 10151:2019 define som tonal como um som caracterizado por uma componente de frequência na banda de 1/3 de oitava, que excede uns níveis de pressão sonora definidos em relação a ambas bandas de 1/3 de oitava adjacentes de 1/3 de oitava. Estes níveis variam de região para região de interesse conforme documentado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2: Caracterização de som tonal [7]

Banda de 1/3 de oitava de interesse	Diferença aritmética entre	
	$L_{Z_{eq,T,fHz(1/3)}}$	da banda de interesse e o de cada banda adjacente
25 Hz a 125 Hz		≥ 15 dB
160 Hz a 400 Hz		≥ 8 dB
500 Hz a 10 000 Hz		≥ 5 dB

As barras de cor azul claro mostradas no espectro da Figura 1.4 estão associadas aos índices LA , LC e LZ (indicados à direita no eixo de frequência) e denotam níveis de pressão sonora passados por filtros utilizados para ponderar o espectro do sinal sonoro. A ponderação A (comumente referenciada em normas e diretrizes nacionais e internacionais), refere-se a um filtro cobrindo a

faixa de áudio, entre 10 Hz a 20 kHz e que traça uma curva ao sinal aplicado para simular a resposta do ouvido humano ao estímulo sonoro; a ponderação C refere-se a um filtro que traça a resposta do ouvido humano para frequências menores a 63 Hz e que é aproximadamente plano para frequências na faixa entre 63 Hz a 4000 Hz; e a ponderação Z denota o sinal medido sem tratamento por nenhum filtro.

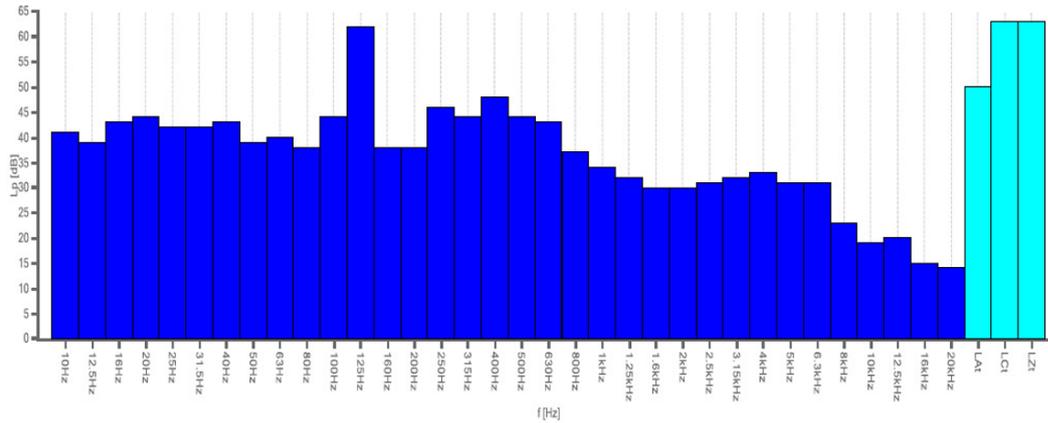


Figura 1.4: Resultados em espectro de 1/3 de oitavas (Medições associadas Ponto 1 de medição).

A Tabela 1.3 documenta registros dos valores médios das medições do nível de pressão sonora para duas rodadas de medição de descritores acústicos utilizados no mapeamento e monitoramento do nível do ruído acústico em dois pontos críticos no interior da subestação (em frente aos dois transformadores, entendidos como fontes primárias da geração de ruído na subestação). Essas medições foram realizadas durante o primeiro quadrimestre do projeto, de acordo com a norma aplicável e cujos valores são expressos em dB com ponderação A.

Tabela 1.3: Resultados das medições de pressão sonora

Cenários de Medição	Trafo 1			Trafo 2		
	L95	L _{Aeq}	LR	L95	L _{Aeq}	LR
Rodada #1 de Medição	62,5	62,9	67,5	63,9	64,9	68,9
Rodada #2 de Medição	62,0	63,0	67,0	61,9	62,9	66,9

Na tabela acima, Trafo 1 e Trafo 2 denotam os dois transformadores de energia estudados. Já os descritores estatísticos considerados foram o L95,

(descriptor estatístico que caracteriza o ruído de trânsito); o L_{Aeq} (descriptor do nível contínuo da pressão sonora, com ponderação A, proveniente dos transformadores); e o LR (descriptor do nível do L_{Aeq} corrigido, para incorporar o efeito de os transformadores gerarem ruído com componentes tonais, fator esse rigorosamente penalizado na normativa Brasileira).

Com os resultados das medições, foram propostas soluções ativas e passivas de mitigação de ruído nas frequências críticas de propagação nas áreas residenciais da vizinhança. Estas soluções incluem um sistema de mascaramento ativo que visa eliminar o componente tonal do ruído gerado pelo funcionamento da subestação [9] e a instalação de estruturas acústicas passivas, concebidas para atenuar o nível da pressão sonora percebido pelo observador externo à subestação [10, 11, 12].

A Figura 1.5 ilustra o sistema de mascaramento enquanto a Figura 1.6 ilustra os três tipos de estruturas acústicas concebidas.

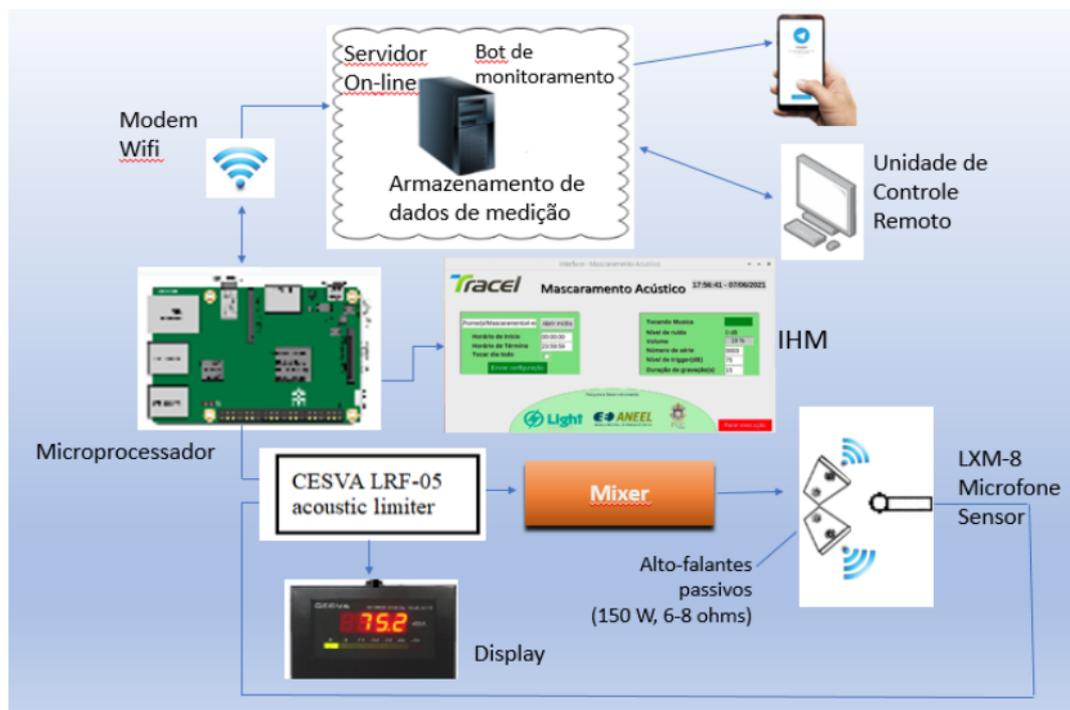


Figura 1.5: Diagrama de blocos do sistema de mascaramento acústico

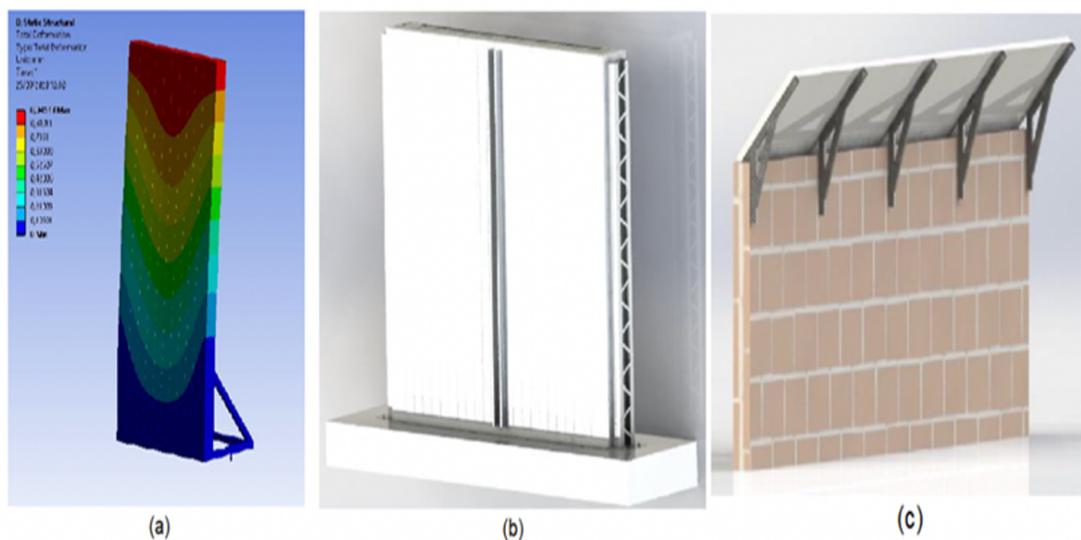


Figura 1.6: Soluções de mitigação propostas (a) barreiras modulares, (b) Biombos acústicos, (c) defletores acústicos.

A implementação deste conjunto de soluções de mascaramento e barreiras compõe a solução global de atenuação de ruído acústico identificado e mapeado.

Esta pesquisa de mestrado cumpriu o propósito de desenvolver um sonômetro de baixo custo, conforme descrito na seção a seguir.

1.2 Motivação

Atualmente, a medição de ruído acústico requer o uso de equipamentos sofisticados de custo elevado podendo, inclusive, inviabilizar projetos de cunho social que requerem medição e monitoramento da pressão sonora em ambientes habitáveis.

O desenvolvimento do sonômetro de baixo custo não apenas reduz custos associados a medições da pressão sonora como contribui para fomentar trabalhos de pesquisa de um modo geral. No caso específico do presente projeto de pesquisa de mestrado, o sonômetro concebido e validado foi utilizado para fundamentar um estudo do ruído acústico em uma subestação de energia em funcionamento em uma área de concessão da Light na cidade do Rio de Janeiro. Nesse contexto, a pesquisa de mestrado desenvolveu-se em sintonia com o projeto de P&D “Controle de níveis de pressão sonora em subestação de energia”, financiado pelo programa regulado de P&D da Aneel. De forma complementar, a pesquisa de mestrado e o projeto de P&D contribuem para o avanço do conhecimento no campo da acústica, oferecendo instrumentação

confiável e de baixo custo, assim preenchendo uma lacuna no mercado de instrumentos de medição e oferecendo alternativas de métodos híbridos de medição acústica de baixo custo, no presente estudo utilizado no controle de ruído gerado pela operação de transformadores de alta tensão.

1.3

Objetivos: geral e específicos

A pesquisa teve como objetivo geral projetar e validar um sonômetro de baixo custo capaz de realizar medições confiáveis em ambientes industriais.

Para alcançar este objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos, devidamente justificados:

- Identificar as contribuições dos referenciais normativos e regulatórios, e abordagens metodológicas associadas ao controle de ruído, aplicáveis ao desenvolvimento do sonômetro;
- Propor alternativas de validação de medições acústicas em observância à regulamentação aplicável;
- Selecionar o referencial normativo e os métodos e ferramentas a serem adotadas na fase de desenvolvimento e validação do sonômetro: a escolha dos referenciais normativos e da metodologia adequada permitirá assegurar elevado grau de confiabilidade no desenvolvimento do sonômetro;
- Avaliar o comportamento e funcionamento do sonômetro desenvolvido, objeto desta pesquisa de mestrado.

1.4

Metodologia

De acordo com a taxonomia proposta por Vergara (2003), a pesquisa pode ser classificada como descritiva, metodológica e aplicada conforme apresentado na Figura 1.7.

Descritiva uma vez que existe uma regulamentação clara para o problema de ruído no Brasil; metodológica, pois seu objetivo principal é desenvolver um dispositivo de baixo custo para medição dos níveis de pressão sonora em ambientes industriais.

O desenvolvimento da pesquisa ocorreu em conformidade aos preceitos metodológicos de interesse e às etapas e desenvolvimentos constantes do escopo do projeto de P&D que se desenvolveu em paralelo ao desenvolvimento desta pesquisa de mestrado:

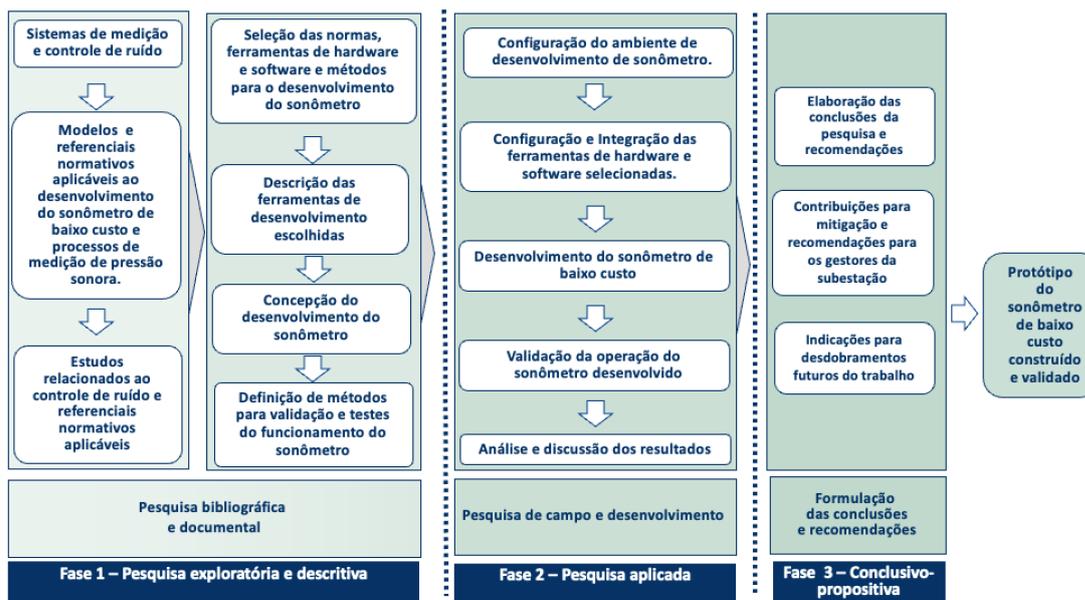


Figura 1.7: Desenho da pesquisa (fases de desenvolvimento e referencial teórico).

- Concepção e implantação do sistema de mapeamento do nível de ruído.
- Concepção e projeto construtivo do sonômetro de baixo custo.
- Validação do sonômetro com base em um programa interno de inter-comparação com o sonômetro comercial previamente calibrado por um laboratório acreditado para medições acústicas junto à Rede Brasileira de Calibração (RBC/Inmetro).

1.5

Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, relacionados à acústica, mais especificamente medições de baixo custo e confiáveis da pressão sonora, como ferramenta de controle do ruído acústico em ambientes industriais. O trabalho objetivou fornecer ao leitor uma abordagem que identifica e contextualiza lacunas da literatura científica especializada, contribuindo para a aplicação de conceitos clássicos de interesse ao controle do nível do ruído no setor elétrico.

O capítulo 1 contextualiza a dissertação, caracterizando o problema do ruído detectado na vizinhança da subestação em função do seu funcionamento, à luz da legislação aplicável.

O capítulo 2 discute conceitos e definições relacionados ao fenômeno de geração e transmissão de som no ar, bem como os aspectos relacionados à recepção de estímulos sonoros.

O capítulo 3 descreve a instrumentação e métodos de medição utilizados no projeto, assim como os referenciais normativos aplicáveis.

O capítulo 4 detalha o desenvolvimento e o projeto construtivo do sonômetro de baixo custo.

O capítulo 5 descreve a validação utilizada para qualificar o sonômetro de baixo custo desenvolvido.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões, considerações finais e propõe recomendações para desdobramentos do trabalho.

2

Conceitos e definições

O som pode ser definido de forma geral como um fenômeno físico, que consiste na transmissão de uma perturbação mecânica das partículas num meio elástico como o ar, causada por um elemento vibratório, e que pode ser captada por uma pessoa ou por um instrumento [18, 19]. Quando esta perturbação causa desconforto ou é prejudicial para os seres humanos, adquire a definição de ruído [18, 20]. Na sua propagação esta perturbação transporta energia e causa variações de pressão e volume que podem ser descritas pelas propriedades físicas dos gases.

2.1

Propagação do som

Quando uma onda sonora se propaga pelo ar, ocorrem mudanças no meio que podem ser medidas ou percebidas. As grandezas mensuráveis neste processo são variações relativas de pressão, deslocamento e velocidade das partículas.

Essas variações ocorrem pelas colisões de partículas inicialmente em estado de equilíbrio que são afetadas pelo efeito de uma determinada perturbação. Por sucessivas colisões, essa perturbação é progressivamente transferida, embora com um atraso crescente, para partes distantes do meio [19].

Um aspecto importante a ser considerado na propagação do som nos gases é que as partículas, que vibram senoidalmente, colidem entre si em ambas as direções, para frente e para trás, transferindo uma quantidade de movimento e gerando zonas de adensamento e rarefação no meio; nestas zonas de adensamento, as partículas não têm movimento, elas estão numa posição de deslocamento zero, o movimento acontece entre duas zonas de máximo adensamento, motivo pelo qual nos pontos em que a pressão é máxima, a velocidade das partículas também é máxima, mas o deslocamento das partículas é zero. Ou seja, a pressão e o deslocamento estão 90° fora de fase, mas a pressão e a velocidade das partículas estão em fase [19].

Assim de forma geral para um meio acústico como o ar, a pressão total em um ponto resulta da soma da pressão média estática com a pressão nesse ponto, gerada pela perturbação propagada, conforme mostra a equação 2-1:

$$p(x, t) = p_0 + \Delta p(x, t) \quad (2-1)$$

Nesta equação:

p = pressão total

p_0 = pressão média

Δp = perturbação do campo acústico

2.2

Unidades de medida

2.2.1

Decibel (dB)

É uma unidade de medida definida pela razão logarítmica de uma grandeza física em relação a um nível de referência dessa mesma grandeza. Em acústica, ao trabalhar na faixa audível, o decibel é utilizado para quantificar as medições de nível, potência e intensidade do som percebido pelo ouvido humano.

O decibel é igual a 0.1 bel e geralmente é representado pela letra L com um subíndice para denotar a grandeza descrita. Adicionalmente na formulação, se multiplica por um fator de 10 para converter de bel a decibel.

Quando são considerados valores de potência, a razão de um valor de potência P_1 para um valor de referência é dado pela equação 2-2.

$$L_{dB} = 10 \text{ Log} \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \quad (2-2)$$

Nesta equação:

L_{dB} = potência total

P_1 = potência medida

P_0 = potência de referência

Quando são considerados níveis de amplitude, como é o caso do *nível de pressão sonora (SPL)*, as razões são proporcionais ao quadrado da amplitude, conforme mostram as equações 2-3 e 2-4.

$$L_{dB} = 10 \text{ Log} \left(\frac{A_1^2}{A_0^2} \right) \quad (2-3)$$

$$L_{dB} = 20 \text{ Log} \left(\frac{A_1}{A_0} \right) \quad (2-4)$$

Nesta equação:

L_{dB} = nível de amplitude total
 A_1, A_1^2 = nível de amplitude medido
 A_0, A_0^2 = nível de amplitude de referência

A principal razão para usar o decibel é porque é uma unidade logarítmica, permitindo usar números pequenos para expressar valores que de outra maneira precisariam de muitos dígitos, como é o caso do limiar de audição do ouvido humano que varia de $20 \mu\text{Pa}$ a 20Pa [20].

As unidades de decibels comumente utilizadas em acústica são apresentadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1: Referência a unidades acústicas expressas em decibels

Unidade	Grandeza	valor de referência
dB (SPL)	Nível de Pressão sonora (L_P)	$20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$
dB (SWL)	Nível de Potência sonora (L_W)	$1 \times 10^{-12} \text{ W}$
dB (SIL)	Nível de Intensidade sonora (L_I)	$1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$
dB (EDL)	Nível de Densidade de energia acústica (L_D)	$1 \times 10^{-12} \text{ J/m}^3$

2.3

Parâmetros acústicos

2.3.1

Velocidade do som (c)

O som propaga-se em qualquer meio fluido ou sólido e sua velocidade de propagação depende das propriedades físicas do meio. Em fluidos compressíveis (e.g., ar), o som propaga-se na forma de ondas longitudinais enquanto em sólidos, cuja propagação é influenciada pelas condições de contorno do meio, a propagação das ondas pode ser longitudinal ou transversal [13]. Quando o meio é um gás ideal, a propagação é uma função da temperatura absoluta do gás, dado pela equação 2-5. [5]

$$c = (g_c \gamma RT)^{\frac{1}{2}} \quad (2-5)$$

Nesta equação:

c = velocidade do som $[\frac{m}{s}]$

g_c = fator de conversão de unidade ($1 \frac{kg \cdot m}{N \cdot s^2}$)

γ = razão de calor específico ($\frac{c_p}{c_v} = 1,39$)

$c_p = 1,0 \times 10^3 [\frac{J}{kg \cdot K}]$

$c_v = 0,718 \times 10^3 [\frac{J}{kg \cdot K}]$

R = constante de gás universal ($287 [\frac{J}{kg \cdot K}]$)

T = temperatura absoluta (em kelvin)

No entanto, para um fluido (líquido ou gás), sua forma geral é dada pela equação 2-6. [5]

$$c^2 = \frac{\gamma B}{\rho} \quad (2-6)$$

Nesta equação:

c = velocidade do som [$\frac{m}{s}$]

γ = razão de calor específico ($\frac{c_p}{c_v} = 1,39$)

$c_p = 1,0 \times 10^3 [\frac{J}{kg \cdot K}]$

$c_v = 0,718 \times 10^3 [\frac{J}{kg \cdot K}]$

B = Módulo de volume isotérmico ($1,01 \times 10^5 [\frac{N}{m^2}]$)

ρ = densidade do fluido (para o ar $1,184 \frac{kg}{m^3}$)

2.3.2

Amplitude (A)

É o deslocamento máximo que uma partícula vibrante sofre, conforme mostra a figura 2.1.

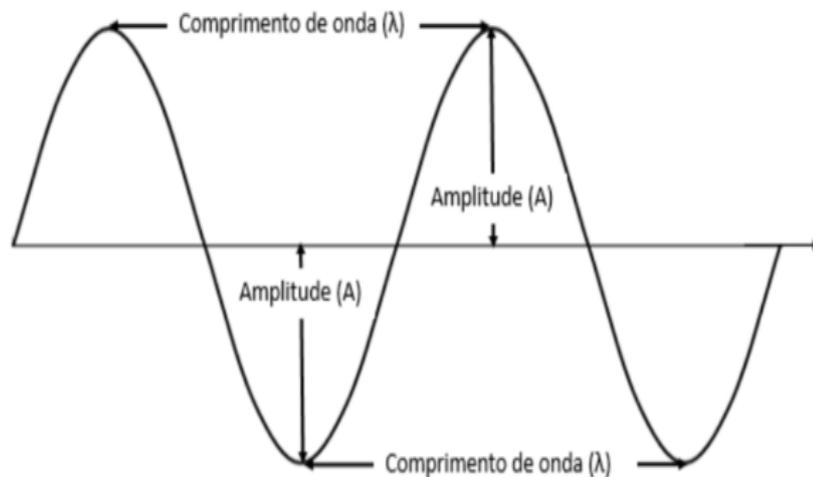


Figura 2.1: Amplitude e comprimento de onda de uma onda acústica.

2.3.3

Período (T)

É o tempo transcorrido durante um ciclo completo, podendo ser medido em dois cruzamentos por zeros consecutivos com a mesma inclinação ou entre dois máximos ou mínimos de amplitude. Também pode ser calculado pelo inverso da frequência, conforme indicado na equação 2-7.

$$T = \frac{1}{f} \quad (2-7)$$

Nesta equação:

T = período da onda [s]

f = frequência da onda [Hz]

2.3.4

Frequência (f)

É definida como o número de ciclos que uma onda completa em 1 segundo e é dada pela equação 2-8. A unidade é o hertz (Hz), que equivale a 1 ciclo por segundo ou s^{-1} . [5]

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-8)$$

Nesta equação:

f = frequência da onda [Hz]

T = período da onda [s]

Seu uso é otimizado no processo de medição e análise em acústica através de faixas de frequência. Isso significa que um som é dividido em intervalos, chamados larguras de banda. Essas larguras de banda contém uma frequência inferior, uma frequência superior e uma frequência central. O tamanho do intervalo entre a frequência inferior e a frequência superior da largura de banda é o que se chama de oitava e varia conforme a precisão necessária na medição. As relações entre as frequências superior, central e inferior nas bandas de oitava e 1/3 de oitava para a faixa audível são dadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Bandas de frequência de oitava e 1/3 de oitava [5]

Número de banda	Frequência central da banda de oitava (Hz)	Frequência central da banda de 1/3 de oitava (Hz)
12	16	16
13		20
14		25
15	31,5	31,5
16		40
17		50
18	63	63
19		80
20		100
21	125	125
22		160
23		200
24	250	250
25		315
26		400
27	50	500
28		630
29		800
30	1000	1000
31		1250
32		1600
33	2000	2000
34		2500
35		3150
36	4000	4000
37		5000
38		6300
39	8000	8000
40		10000
41		12500
42	16000	16000
43		20000

2.3.5

Comprimento de onda (λ)

É a distância entre 2 pontos consecutivos da onda que vibram em fase conforme mostra a figura 2.1. Sua unidade é o metro. É dado pela equação 2-9. [5]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2-9)$$

Nesta equação:

λ = comprimento de onda [m]

c = velocidade do som [$\frac{m}{s}$]

f = frequência da onda [Hz]

2.3.6

Número de Onda (k)

É o inverso do comprimento de onda, ou seja, o número de ciclos de onda por unidade de distância. Sua unidade é m^{-1} . É dado pela equação 2-10. [5]

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (2-10)$$

Nesta equação:

k = número de onda [$\frac{1}{m}$]

λ = comprimento de onda [m]

f = frequência da onda [Hz]

c = velocidade do som [$\frac{m}{s}$]

2.4

Grandezas acústicas

2.4.1

Pressão Sonora

A pressão sonora é o parâmetro utilizado na normativa para definir os níveis permitidos de exposição ao ruído. A esta definição estão associados quatro conceitos [19]:

- *Pressão Sonora Estática (P_0)*: É a pressão que existe em um ponto do meio de propagação na ausência de ondas sonoras, à pressão barométrica normal ($P_0 = 1 \times 10^5 Pa$).

- *Pressão Sonora Instantânea* ($p(t)$): A pressão sonora instantânea é a variação da pressão estática, em um ponto do meio de propagação, causada por uma onda sonora. Sua unidade é o *pascal*, usualmente referenciada na literatura por *pressão acústica*.
- *Pressão Sonora Efetiva* (p): É o valor quadrático médio ou *rms* (*root-mean-square*) da pressão instantânea, sobre um dado intervalo de tempo. No caso de uma pressão sonora periódica, o intervalo deve conter um número inteiro de períodos. No caso de uma pressão sonora não periódica, o intervalo deve ser o suficientemente longo para que o valor obtido seja independente da duração do intervalo. Este é o valor da pressão indicado pelos instrumentos de medição acústica.
- *Nível de Pressão sonora* (SPL - Sound Pressure Level): É a razão logarítmica entre a pressão sonora efetiva medida e a pressão sonora efetiva de referência conforme mostra a equação 2-11. O valor da pressão efetiva de referência, apresentado na Tabela 2.1, é o valor utilizado para medições de nível de som no ar dentro do limiar de audição do ouvido humano.

$$SPL = 20 \text{ Log} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \quad (2-11)$$

Nesta equação:

SPL = Nível de Pressão sonora [dB]

p = pressão sonora efetiva medida [Pa]

S = pressão sonora efetiva de referência [$20 \times 10^{-6} Pa$]

2.4.2

Velocidade da Partícula

A velocidade da partícula refere-se à velocidade na qual as partículas de um meio de propagação oscilam, para frente e para trás a partir de sua posição de equilíbrio, em resposta a uma onda sonora que passa; junto com a pressão sonora são as grandezas usadas para determinar a intensidade de um som em campo livre, e a energia acústica em ambientes fechados. A velocidade da partícula geralmente é dividida em três conceitos [19]:

- *Velocidade instantânea da partícula* ($u_p(t)$): É a velocidade em um ponto específico do meio e em um instante de tempo determinado, devida

apenas à onda sonora. É medida acima e abaixo do movimento do meio como um todo. Sua unidade é o m/s .

- *Velocidade efetiva da partícula (u_{ef}):* É o valor quadrático médio ou rms (*root-mean-square*) da velocidade instantânea em um ponto do meio. Sua unidade é o m/s .
- *Velocidade instantânea de volume $U(t)$:* É o escoamento instantâneo do campo acústico devido à onda sonora através de uma área específica S . A velocidade instantânea de volume é definida pela equação 2-12 e sua unidade é o m^3/s .

$$U(t) = S u_p(t) \quad (2-12)$$

Nesta equação:

$$\begin{aligned} U(t) &= \text{Velocidade instantânea de volume } \left[\frac{m^3}{s} \right] \\ u_p(t) &= \text{Velocidade instantânea da partícula } \left[\frac{m}{s} \right] \\ S &= \text{Área específica } [m^2] \end{aligned}$$

2.4.3 Impedância Acústica

A impedância acústica é a grandeza que relaciona a *pressão sonora efetiva* (*rms*) com a *velocidade efetiva da partícula* (*rms*). Usualmente é representada em notação complexa para mostrar tanto a magnitude quanto o ângulo de fase entre a pressão e a velocidade de partícula de uma onda. É também dividida em três conceitos dependendo se a onda é plana ou esférica [19]:

- *Impedância Acústica específica (Z_s):* É a relação entre a pressão sonora efetiva (*rms*) e a velocidade efetiva de partícula (*rms*) em um ponto de um dispositivo mecânico ou de um meio de propagação para uma onda esférica. Sua unidade é o rayl ou ohm acústico, em homenagem ao acústico britânico Lord Rayleigh. Isto é:

$$Z_s = \frac{p}{u} = \frac{Z_o k r}{(1 + k^2 + r^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2-13)$$

Nesta equação:

$$\begin{aligned} Z_s &= \text{Impedância Acústica específica [no SI rayl acústico} = \frac{Pa \cdot s}{m} = \frac{kg}{m^2 \cdot s}] \\ p &= \text{pressão sonora efetiva} \end{aligned}$$

u = velocidade efetiva de partícula

Z_o = Impedância característica [no SI *rayl* acústico = $\frac{Pa \cdot s}{m} = \frac{kg}{m^2 \cdot s}$]

k = número de onda [$\frac{1}{m}$]

r = Distância desde a fonte sonora [m]

- *Impedância característica* (Z_o): É a relação entre a pressão sonora efetiva (*rms*) e a velocidade efetiva de partícula (*rms*) em um ponto de uma onda livre, plana e progressiva. É função somente das propriedades do fluido, calculada pelo produto entre a densidade do meio e a velocidade de propagação do som neste meio.

Sua unidade é também o rayl ou ohm acústico:

$$Z_o = \rho c \quad (2-14)$$

Nesta equação:

Z_o = Impedância característica [*rayl* acústico = $\frac{Pa \cdot s}{m} = \frac{kg}{m^2 \cdot s}$]

ρ = densidade do fluido

c = velocidade do som

- *Impedância Mecânica* (Z_M): Também conhecida como impedância de radiação, é a relação entre a força efetiva que atua sobre uma área específica de um meio acústico ou dispositivo mecânico, e a velocidade efetiva de partícula (*rms*) através dessa área. É comumente usada em acústica para descrever a carga de radiação apresentada por um meio a uma superfície vibrante [13].

Sua unidade é o rayl mecânico, isto é:

$$Z_M = \frac{F}{u} \quad (2-15)$$

Nesta equação:

Z_M = Impedância Mecânica [*rayl* mecânico = $\frac{N \cdot s}{m}$]

f = força efetiva

u = velocidade efetiva de partícula

2.4.4**Fator de Diretividade (Q)**

O *Fator de diretividade* é um valor adimensional que depende da direção de propagação e frequência da onda acústica. É definido pela razão entre a intensidade de uma fonte acústica em relação a uma distância específica da mesma fonte e a intensidade que seria produzida no mesmo eixo por uma fonte esférica. Está definido pela equação 2-16.

$$Q = \frac{4\pi r^2 I}{W} \quad (2-16)$$

Nesta equação:

Q = Fator de diretividade

r = Distância à fonte sonora [m]

I = Intensidade Acústica [$\frac{W}{m^2}$]

W = Potência Acústica [W]

2.4.5**Índice de Diretividade (DI)**

O *Índice de diretividade*, quantifica o crescimento ou decréscimo do fator de diretividade de acordo com a direção de propagação, é dado pela equação 2-17 [5].

$$DI = 10 \log(Q) \quad (2-17)$$

Nesta equação:

DI = Índice de diretividade

Q = Fator de diretividade

2.4.6**Intensidade Acústica (I)**

A intensidade acústica é a *potência acústica* (W) transmitida através de uma unidade de área por unidade de tempo [5]. É utilizada entre outras coisas para quantificar a perda por transmissão em partições de edifícios, medições de impedância e para achar as propriedades de absorção de materiais [13].

Para ondas planas, a intensidade acústica está dada pela equação 2-18:

$$I = \frac{W}{S} \quad (2-18)$$

Nesta equação:

I = Intensidade Acústica [$\frac{W}{m^2}$]
 W = Potência Acústica [W]
 S = Área específica [m^2]

Para ondas esféricas, a intensidade acústica está dada pela equação 2-19:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2-19)$$

Nesta equação:

I = Intensidade Acústica [$\frac{W}{m^2}$]
 W = Potência Acústica [W]
 r = Distância desde a fonte sonora [m]

Para ondas que se propagam com um padrão direcional específico, é considerado o fator de diretividade das ondas. Neste caso a intensidade está dada pela equação 2-20.

$$I = \frac{QW}{4\pi r^2} \quad (2-20)$$

Nesta equação:

I = Intensidade Acústica [$\frac{W}{m^2}$]
 Q = Fator de diretividade
 W = Potência Acústica [W]
 r = Distância desde a fonte sonora [m]

A intensidade acústica em termos da pressão sonora é dada pela equação 2-21

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2-21)$$

Nesta equação:

I = Intensidade Acústica [$\frac{W}{m^2}$]
 p = pressão sonora efetiva
 ρ = densidade do fluido (para o ar $1,184 \frac{kg}{m^3}$)
 c = velocidade do som [$\frac{m}{s}$]

2.4.7

Densidade de energia acústica (D)

A densidade de energia acústica é definida como a *energia acústica total* por unidade de volume; é um parâmetro geralmente utilizado para medições de recintos pois é a grandeza acústica que sistemas ativos de controle de ruído buscam diminuir [13]. Está composta por uma parte de *energia cinética* e uma outra parte de *energia potencial*: [5]

- *Energia Cinética (KE)*: é a energia associada ao movimento de vibração do fluido. Para ondas planas está definida pela equação 2-22.

$$KE = \frac{p^2}{2\rho c} \quad (2-22)$$

Nesta equação:

$$\begin{aligned} KE &= \text{Energia cinética } \left[\frac{J}{m^3}\right] \\ p &= \text{pressão sonora efetiva} \\ \rho &= \text{densidade do fluido (para o ar } 1,184 \frac{kg}{m^3}\text{)} \\ c &= \text{velocidade do som } \left[\frac{m}{s}\right] \end{aligned}$$

No entanto devido que para ondas esféricas a pressão acústica e a velocidade de partícula estão fora de fase, a energia cinética está definida pela equação 2-23, pois ela depende da frequência ou do número de onda e da distância à fonte.

$$KE = \frac{p^2}{2\rho c} \left(1 + \frac{1}{k^2 r^2}\right) \quad (2-23)$$

Nesta equação:

$$\begin{aligned} KE &= \text{Energia cinética } \left[\frac{J}{m^3}\right] \\ p &= \text{pressão sonora efetiva} \\ \rho &= \text{densidade do fluido (para o ar } 1,184 \frac{kg}{m^3}\text{)} \\ c &= \text{velocidade do som } \left[\frac{m}{s}\right] \\ k &= \text{número de onda } \left[\frac{1}{m}\right] \\ r &= \text{Distância à fonte sonora } [m] \end{aligned}$$

- *Energia Potencial (PE)*: é a energia armazenada pela compressão do fluido.

Para ondas planas está definida pela equação 2-24, que é a mesma relação da equação 2-22, o que indica que para ondas planas as contribuições da energia cinética e potencial são iguais.

$$PE = \frac{p^2}{2\rho c^2} \quad (2-24)$$

Nesta equação:

PE = Energia potencial [$\frac{J}{m^3}$]

p = pressão sonora efetiva

ρ = densidade do fluido (para o ar $1,184 \frac{kg}{m^3}$)

c = velocidade do som [$\frac{m}{s}$]

Assim, a *densidade de energia acústica* para ondas planas, definida na equação 2-25, está relacionada com a *Intensidade Acústica* 2-21, e é dado pela soma da energia cinética mais a energia potencial.

$$D = \frac{p^2}{\rho c^2} = \frac{I}{c} \quad (2-25)$$

Nesta equação:

D = Densidade de energia acústica para ondas planas [$\frac{J}{m^3}$]

p = pressão sonora efetiva

ρ = densidade do fluido (para o ar $1,184 \frac{kg}{m^3}$)

c = velocidade do som [$\frac{m}{s}$]

I = Intensidade Acústica [$\frac{W}{m^2}$]

Por uma outra parte, para ondas esféricas, a *densidade de energia acústica* está dada pela equação 2-26.

$$D = \frac{p^2}{\rho c^2} \left(1 + \frac{1}{2k^2 r^2} \right) \quad (2-26)$$

Nesta equação:

D = Densidade de energia acústica para ondas esféricas [$\frac{J}{m^3}$]

p = pressão sonora efetiva

ρ = densidade do fluido (para o ar $1,184 \frac{kg}{m^3}$)

c = velocidade do som [$\frac{m}{s}$]

k = número de onda [$\frac{1}{m}$]

r = Distância à fonte sonora [m]

2.5

Equação de onda acústica

A equação de onda é expressa por uma equação diferencial parcial (EDP) que governa o comportamento de propagação de uma onda em um meio elástico. A equação de onda dada pela equação 2-27 reflete um modelo matemático em uma dimensão que define o comportamento vertical de uma corda vibrante amarrada nas extremidades. A equação contém um termo de rigidez dado pela posição e um termo de inércia dado pela velocidade de propagação.

A equação de onda pode ter muitas soluções dependendo do modelo matemático ao qual esteja sendo aplicada.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial u}{\partial t^2} \quad (2-27)$$

2.6

Tipos de ondas

Existem diferentes tipos de ondas que podem ser observados no processo de propagação [5] [13].

- *Ondas Planas*: São ondas cuja propagação é uniforme em uma direção específica em relação à fonte geradora. Um caso ideal de ondas planas pode ser gerado em laboratório propagando-se uma onda de um tom puro ao longo de um tubo com paredes rígidas. O estudo de um caso real requer o envolvimento dos parâmetros *Fator de diretividade (Q)* e *Índice de diretividade (DI)* [5].
- *Ondas Esféricas*: São ondas cuja propagação em relação à fonte geradora é uniforme em todas as direções. Neste tipo de ondas, a pressão acústica varia inversamente com o quadrado da distância, dado que a potência acústica incide sobre uma área maior à medida que a onda sonora se afasta da fonte, definido pela *lei do inverso quadrado*. [5]
- *Ondas Longitudinais*: São ondas em que as partículas oscilam na mesma direção de propagação da onda. As ondas sonoras, que se propagam em fluidos compressíveis, como o ar, são exemplos de ondas longitudinais [21] [22].
- *Ondas Transversais*: Também conhecidas como ondas de cisalhamento, são ondas onde a dinâmica das partículas é transversal à direção de propagação da onda. Geralmente são transmitidos em meios sólidos pois estes suportam tanto compressão como cisalhamento. Em sólidos

as ondas transversais não são mais consideradas som, apenas são as longitudinais, e são estudadas no campo de ultrassom e vibrações [21] [22].

2.7

Tipos de fontes

A determinação do comportamento do campo sonoro no espaço livre requer conhecer o comportamento da fonte sonora, cujo padrão diretivo para todas as frequências é considerado característica relevante. Algumas fontes são não diretivas e estão relacionadas com ondas esféricas. Ou seja, irradiam a mesma intensidade em todas as direções, enquanto outras podem ser multidirecionais irradiando ondas planas, já que são de porte elevado quando consideradas ao comprimento de onda do sinal que estão emitindo.

- *Fonte Monopolo ou omnidirecional*: É a fonte de som mais elementar, é uma fonte esférica cujo raio é pequeno quando comparado com o comprimento de onda gerado. Também é conhecido como fonte pontual ou fonte simples. O monopolo cria uma onda sonora introduzindo e removendo fluido alternadamente na área circundante enquanto irradia com a mesma intensidade em todas as direções conforme mostra a Figura 2.2. Um exemplo desse tipo de fonte é um alto-falante que irradia som de baixa frequência [13] [21].

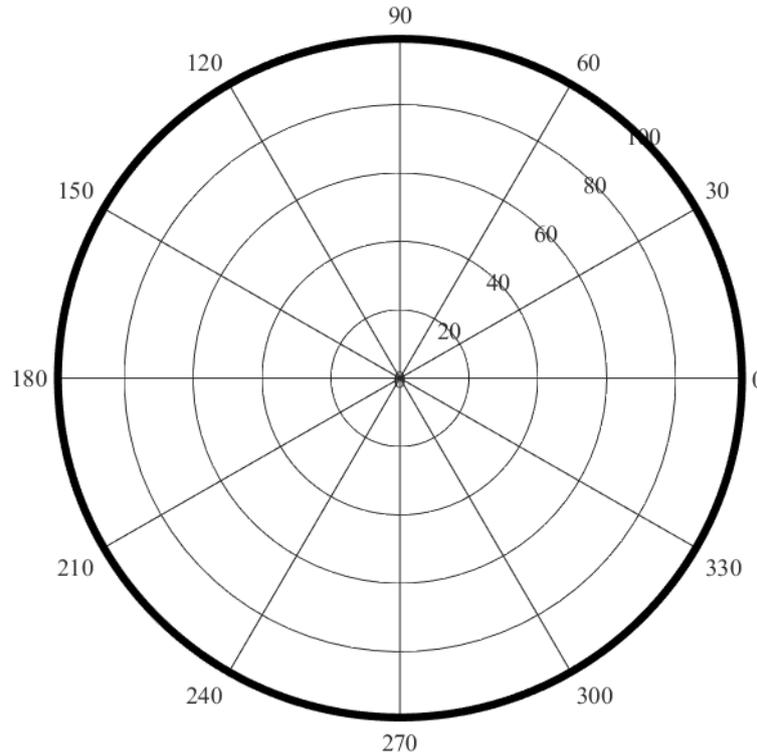


Figura 2.2: Radiação de uma fonte monopolo [13] [21].

- *Fonte Dipolo*: É composta por duas fontes monopolo com igual força (pressão - intensidade), mas com fases opostas e separadas por uma distância muito pequena em comparação com o comprimento de onda emitido. Enquanto uma fonte se expande, a outra contrai o volume de ar ao seu redor. Uma fonte dipolo não irradia o som igualmente em todas as direções. O padrão de diretividade se parece com a figura de um 8, isto é, existem duas regiões onde o som é muito bem irradiado e duas regiões onde o som é cancelado. Uma esfera que oscila para frente e para trás atua como uma fonte dipolo, conforme mostra a figura 2.3. [13] [21].

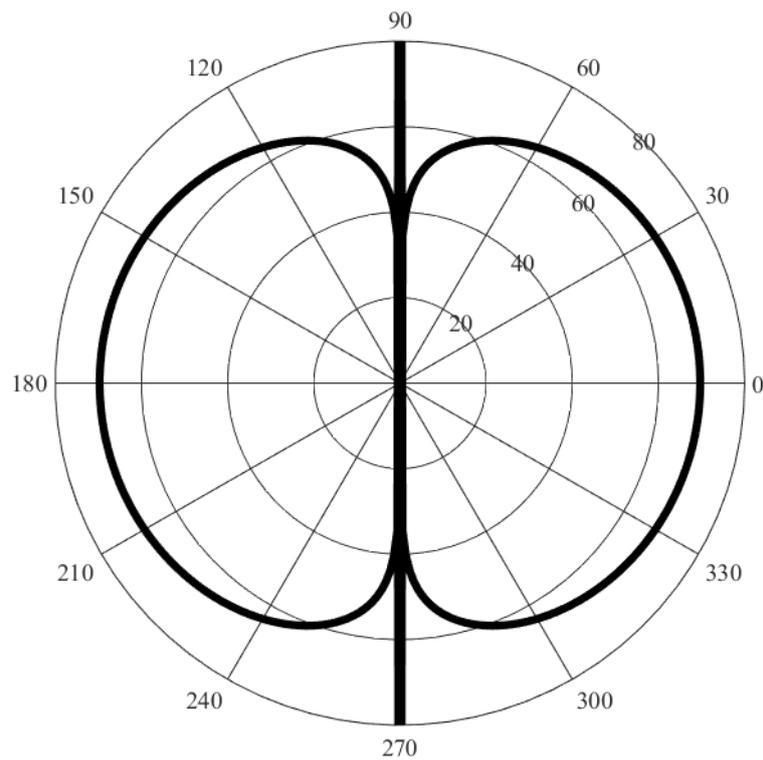


Figura 2.3: Radiação de uma fonte dipolo [13] [21].

- *Fonte Quadrupolo Linear*: Um quadrupolo linear é formado por quatro monopolos com fases alternadas, ou dois dipolos, mas que se encontram na mesma linha de radiação, o que faz com que a radiação seja eficiente na frente de cada monopolo, porém cancelados em pontos equidistantes dos monopolos adjacentes, conforme mostra a figura 2.4. [13] [21].

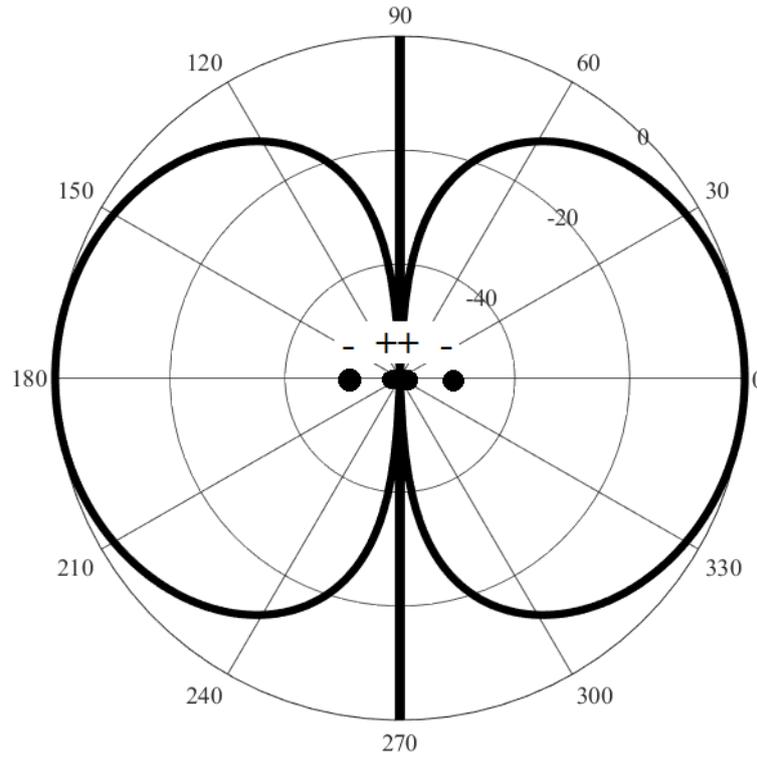


Figura 2.4: Radiação de uma fonte quadrupolo linear [13] [21].

- *Fonte Quadrupolo Lateral*: Um quadrupolo lateral é também formado por quatro monopólos ou dois dipolos com fases alternadas, mas que não se encontram na mesma linha de radiação. O padrão de radiação eficiente terá as mesmas características de um quadrupolo linear, mas o cancelamento acontece em pontos equidistantes dos monopólos adjacentes, conforme mostra a figura 2.5. [13] [21].

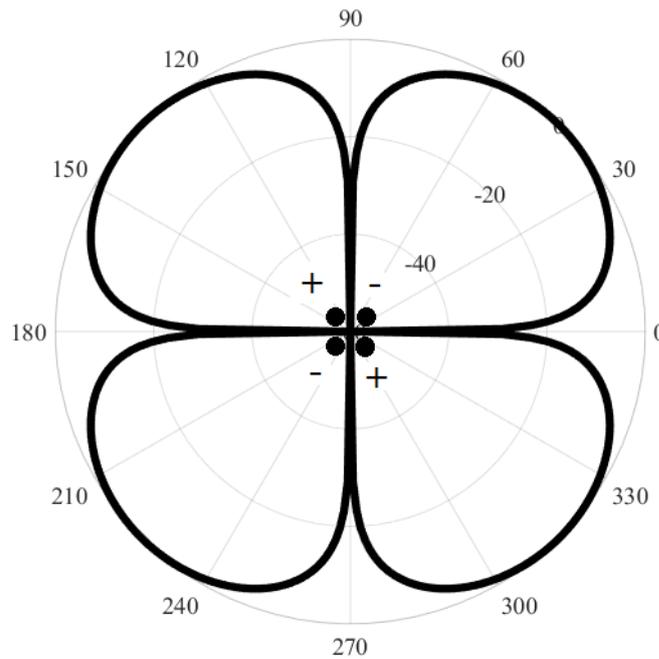


Figura 2.5: Radiação de uma fonte quadrupolo lateral [13] [21].

2.8

Sistema auditivo humano e critérios acústicos

A audição do ser humano envolve processos fisiológicos e psicológicos derivados do ato consciente de ouvir. Do ponto de vista fisiológico, existem parâmetros a exemplo da faixa de frequências audíveis e dos limiares de audição, ambos utilizados na normalização e legislação para contaminação por ruído. Do ponto de vista psicológico, encontram percepções subjetivas que também podem ser quantizadas, a exemplo do conforto e da inteligibilidade da palavra. O processo de controle de ruído deve definir qual ou quais critérios pretende atender e desenhar o sistema de controle com base nesses critérios.

2.8.1

O ouvido humano

O ouvido humano é um sistema acústico notável e uma das estruturas mecânicas mais intrincadas e complexas do corpo humano. É composto por três partes mecânicas principais, ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno, conforme mostra a Figura 2.6. Interage, também, com o sistema nervoso auditivo e com o cérebro [5] [13] [19] [23] [24].

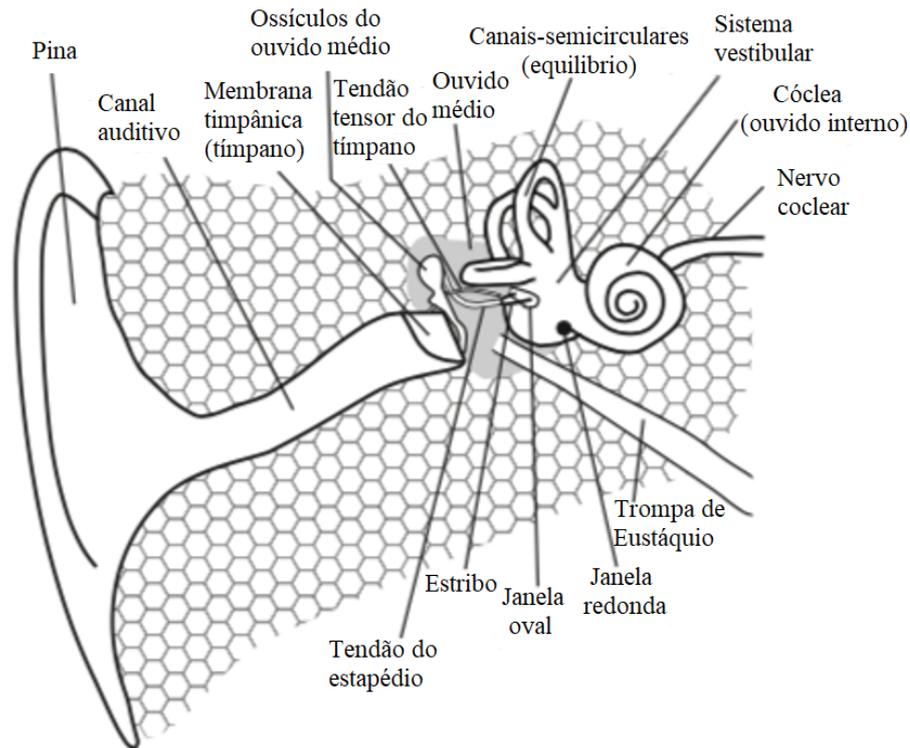


Figura 2.6: Corte transversal do ouvido humano [13].

O *ouvido externo* é formado pelo pavilhão auricular e pelo conduto auditivo externo; o pavilhão auricular mostrado na Figura 2.7 funciona como uma buzina que capta o som gerando múltiplas reflexões e ressonâncias. Já o conduto auditivo externo funciona como um tubo ressonador que aumenta o nível de pressão sonora entre 10 dB e 20 dB, dependendo da frequência da onda acústica.

A frequência de ressonância do conduto auditivo externo é da ordem de 3 kHz, portanto o aumento da pressão acústica é mais pronunciado nas bandas de oitava de 2 kHz a 4 kHz. O comprimento aproximado do canal auditivo externo é de 25 mm a 30 mm, que termina no tímpano ou membrana timpânica [5] [13] [19] [23] [24].

O *ouvido médio* encontra-se entre o tímpano e a janela oval (a janela oval constitui a entrada para o ouvido interno) dentro de uma cavidade denominada caixa do tímpano. A caixa do tímpano é uma cavidade de forma paralelepípeda irregular, com seis faces, cinco delas ossas e uma membranosa. No *ouvido médio* o movimento mecânico do tímpano é transmitido e amplificado em aproximadamente 25 dB através da ligação dos três ossículos, martelo, bigorna e estribo. Esta amplificação depende dos tamanhos relativos do tímpano e da janela oval, um tímpano maior e uma janela oval menor resultam em maior

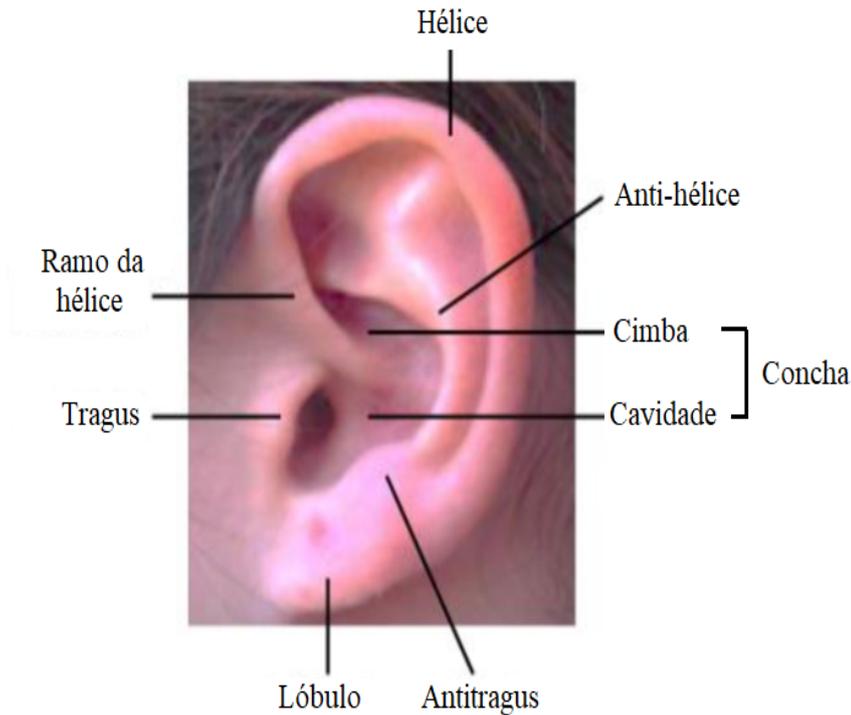


Figura 2.7: Anatomia do pavilhão auricular [33].

amplificação. Na cavidade do ouvido médio é mantida à pressão atmosférica pela abertura ocasional da trompa de Eustáquio durante a deglutição. A trompa de Eustáquio é um conduto que mede aproximadamente 31 mm a 38 mm e que conecta o *ouvido médio* com a parede lateral da rinofaringe. Se uma infecção causar inchaço ou muco e bloqueia a trompa de Eustáquio, a pressão do ar diminui abaixo da pressão atmosférica e a membrana timpânica implode. O ouvinte, então, experimenta uma surdez temporária [5] [13] [19] [23] [24].

O *ouvido interno* que se une ao *ouvido médio* pela membrana oval está localizado dentro do osso temporal, nas partes lateral, média e inferior do crânio. É formado pelo labirinto, que é um sistema de condutos dividido em duas partes, uma parte é a cóclea e a outra é o sistema vestibular.

A cóclea é um conduto membranoso em forma de caracol, com aproximadamente 35 mm de comprimento e 1,2 mm de diâmetro, dividido ao meio pela partição coclear dentro da qual está a membrana basilar. Órgão que possui cerca de 25 000 cílios nervosos banhados em endolinfa e que formam o nervo auditivo que é o encarregado de converter e transmitir as informações sobre o som do ouvido externo para o cérebro.

Já o sistema vestibular, formado pelo vestíbulo e os canais semicirculares,

é um dos três subsistemas sensoriais responsáveis pelo equilíbrio do corpo (os outros dois são o sistema visual e o sistema proprioceptivo) [5] [13] [19] [23] [24].

2.8.2

Relação entre nível de pressão, altura e frequência da onda sonora

No sistema auditivo humano, a faixa de frequência audível depende de diversos fatores e varia de uma pessoa para outra, até mesmo de um dia para outro para a mesma pessoa. Já a altura tonal ou *pitch* é uma grandeza subjetiva que permite ordenar os sons em uma escala que varia de graves a agudos. Para objeto geral de estudo define-se, para uma pessoa saudável, que a faixa de frequência audível varia de aproximadamente 20 Hz (sons mais graves) a 20 kHz (sons mais agudos), tendo em vista que o ouvido humano não tem a mesma sensibilidade em toda essa faixa de frequência. A figura 2.8 mostra a variação da dor e dos limiares auditivos em função da frequência [19] [25].

Para baixos níveis de pressão sonora, o ouvido é insensível nas frequências graves, embora também apresenta alguma atenuação nas altas frequências, mas sua resposta tende a ser mais homogênea na maior parte da faixa de frequências audíveis.

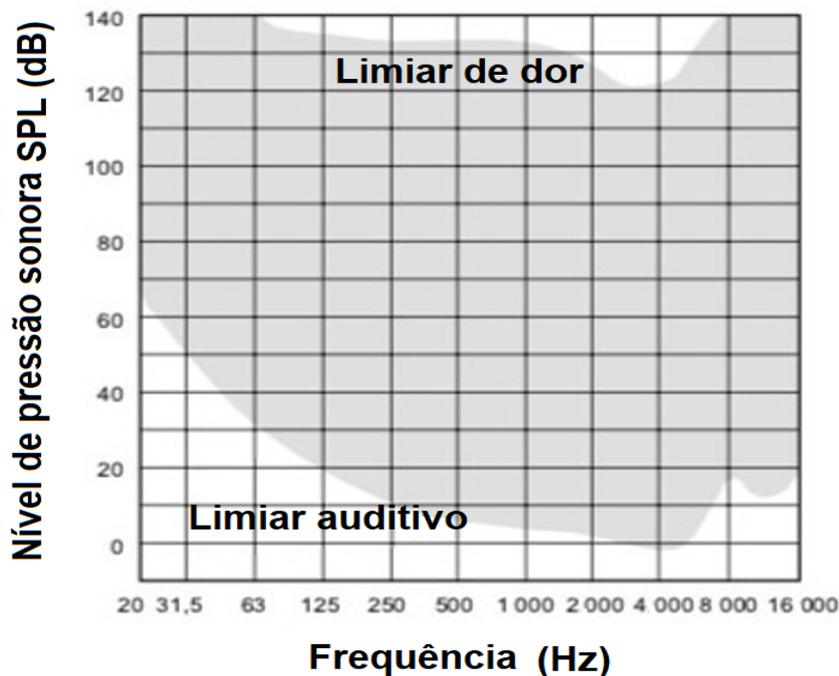


Figura 2.8: Níveis audíveis em função da frequência [25].

2.8.3

Mascaramento do som

O fenômeno do mascaramento ocorre quando um som evita parcial ou totalmente a percepção de outro som. Quantitativamente, o termo pode ser definido como o número de decibels pelo qual o limiar de audibilidade é aumentado para um som na presença de outro. O efeito de mascaramento é sempre maior acima da frequência do tom do que abaixo dela [19]. Fisiologicamente, este fenômeno se deve à resposta da membrana basilar, no ouvido interno, quando é excitada por sons de diferentes frequências. A membrana basilar estende-se ao longo da cóclea a partir da janela oval que liga o ouvido médio ao ouvido interno [25]. As vibrações na membrana basilar produzem deslocamentos na mesma conforme mostra a Figura 2.9, desde a área mais próxima da janela oval (área de alta frequência) até pontos mais distantes dela (área de baixa frequência), determinados pela frequência do som percebido, esses deslocamentos geram uma cauda que se estende até a janela oval e pode mascarar sons de frequências mais altas, mas menos amplitude.

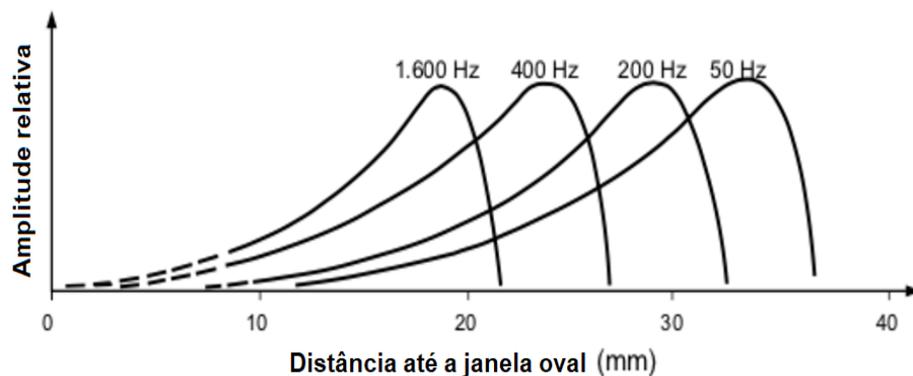


Figura 2.9: Amplitude relativa do deslocamento da membrana basilar para diferentes tons puros [25].

2.8.4

Sonoridade

A sensação de sonoridade, ou seja, de intensidade ou força de um som, está em princípio relacionada à sua amplitude. No entanto, também é fortemente dependente da frequência.

Como o ouvido é mais sensível nas frequências centrais, ou seja, entre 500 Hz e 5 kHz, do que nas frequências muito baixas ou muito altas, foi definido um som padrão de um tom de 1 kHz como referência para quantificar o nível de sonoridade (loudness) NS. Assim, o nível de sonoridade de qualquer som é

definido como o nível de pressão sonora de um tom de 1 kHz que tem tanta sonoridade quanto o som em questão [19].

A unidade para quantificar a sonoridade é chamada de phon e é determinado pelas curvas de Fletcher e Munson, ou curvas NS.

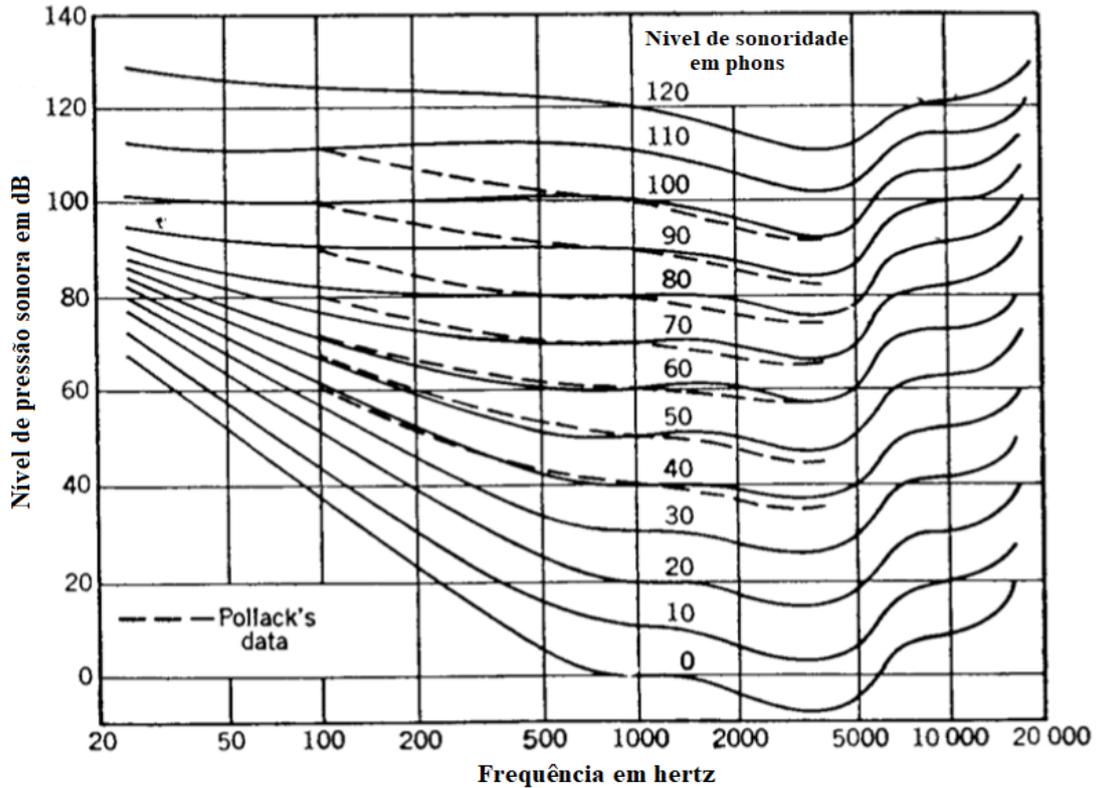


Figura 2.10: Curvas NS para tons puros [19].

Curvas extremas são os limites da audição humana conforme mostra a Figura 2.10. O que corresponde a zero phon é o limiar auditivo (depende da pessoa), abaixo do qual não é perceptível uma vibração do ar. Uma perda de 10 dB a 20 dB desse limite é considerada normal. Acima de 25 dB de perda, começam as dificuldades auditivas. A curva de 120 phon corresponde ao limiar da dor. A partir daí, ao invés do som propriamente dito, começa a ser percebida uma dor intensa, assim como o dano irreversível ao ouvido interno iniciando-se imediatamente.

3

Medição acústica: Instrumentação e normalização aplicável

Qualquer projeto de controle de ruído requer, como ponto de partida, um programa de medições *in-situ* de contextualização das grandezas físicas impactantes e de seus descritores acústicos associados, fazendo-se uso de instrumentos apropriados e devidamente calibrados. Estas medições cumprem dois propósitos: (i) assegurar conformidade às exigências impostas pela legislação ambiental aplicável [7, 8] e (ii) identificar e mapear as fontes de ruído e suas rotas naturais de propagação, visando orientar soluções adequadas de mitigação acústica.

Em campanhas de medições, como as realizadas no desenvolvimento desta pesquisa de mestrado, entende-se ser de vital importância não apenas selecionar o equipamento apropriado capaz de captar o fenômeno acústico envolvido, mas também, realizar a configuração correta dos parâmetros de medição.

Para as medições de ruído geralmente são utilizados dois tipos de equipamentos, sonômetros e dosímetros. Enquanto o sonômetro abrange muitos campos de atuação, sendo capaz de mapear níveis de pressão em áreas definidas e fornecer estes níveis em valores médios e ponderados, o dosímetro é um instrumento que permite medir a exposição individual de uma pessoa a um determinado ruído.

3.1

Medições de pressão sonora e potência sonora

Medições de pressão sonora são medições de variações da pressão num ponto específico do ambiente. São realizadas com o intuito de validar se os níveis medidos estão em conformidade com os limites da normativa ambiental e os limites recomendados pela literatura em acústica, conforme apresenta a Tabela 3.1. Os níveis são quantificados de forma geral de acordo com três níveis de faixa dinâmica, a seguir caracterizados:

- Nível 1: inferior a 60 dB, que caracteriza a faixa de comunicação oral;
- Nível 2: intensidade acústica entre 60 dB e 90 dB, caracterizando uma faixa de ruído relativamente normal, sujeita à percepção total.

- Nível 3: intensidade acústica acima de 90 dB, que caracteriza uma faixa em que o nível de pressão sonora é prejudicial à saúde.

As medições de potência sonora são medições da potência acústica gerado por uma fonte acústica, independentemente do ambiente em que está inserida. O objetivo da medição é obter informações sobre o espectro de potência da fonte.

Alternativamente a Tabela 3.1 apresenta, com base em experiências do autor, uma escala de decibels para caracterizar níveis típicos de ruído acústico para diferentes faixas audíveis do ouvido humano (“intolerável; doloroso; extremamente elevado; incomodativo e confortável), incluindo-se, algumas medições realizadas em pontos de interesse da cidade do Rio de Janeiro.

Tabela 3.1: Níveis típicos de ruído acústico

Percepção pelo ouvido humano	dB	Nível típico de ruído (dB) gerado por:
Nível sonoro intolerável	180	explosões
	170	lançamento de naves espaciais
	160	shows de Rock and Roll
	150	disparo de arma de fogo
Nível sonoro doloroso	140	queima de fogos
	130	motor a jato
Nível sonoro extremamente elevado	120	sirenes
	110	motosserras
	100	motocicletas
	90	cortadores de grama motorizados
Nível sonoro incomodativo	80	descarga de vaso sanitário
	70	máquina de lavar pratos
Nível sonoro confortável	60	aparelho de ar condicionado Obs.: Nível do ruído acústico da cidade do Rio de Janeiro (medido no alto do Morro do Corcovado, a 704 m de altura) indicou 58,1 dB
	50	canto de pássaros Obs.: Medições realizadas em Subestações de energia elétrica imersas em bairros residenciais indicam que o ruído acústico gerado pelos transformadores de alta tensão podem variar entre 42 dB e 65 dB.
	40	ruídos típicos no ambiente de uma residência Obs.: O nível do ruído acústico medido no bairro da Urca (considerado o mais silencioso, já que protegido pela barreira acústica natural imposta pelo maciço do Pão de Açúcar) indicou $L_{95} = 42,5$ dB; enquanto no ambiente aberto da Lagoa Rodrigo de Freitas, localizado na zona sul do Rio de Janeiro indicou $L_{95} = 45,3$ dB.
	30	sussurros suaves
	20	movimentação de folhas ao vento
	10	sons fracos audíveis
	0	Silêncio

3.1.1

O Sonômetro

O sonômetro é um instrumento que permite medir a pressão sonora em um determinado ponto, em um instante ou intervalo de tempo. O sinal acústico integra os sinais capturados pelo transdutor de entrada e estes são tratados durante as fases de amplificação, processamento e visualização.

O fluxo de sinal no sonômetro, de forma geral, pode ser dividido em etapas de transdução, amplificação, processamento e visualização conforme ilustrado na Figura 3.1.

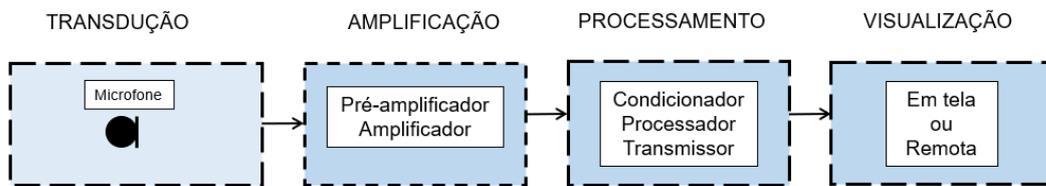


Figura 3.1: Cadeia de medição do sonômetro

A etapa de transdução é realizada por um microfone responsável por converter o sinal acústico (pressão acústica) em um sinal elétrico (tensão elétrica). Esse sinal, geralmente na faixa de milivolt (mV), é amplificado e processado por filtros de ponderação no tempo e em frequência para, finalmente, mostrar o sinal na tela física e/ou remota do instrumento.

Por força das normativas aplicáveis, o uso de acessórios adicionais é recomendado, a exemplo de protetor contra a corrente de vento e de calibrador. O protetor de vento é uma peça esférica de espuma que pode ser encaixada sobre o microfone do sonômetro para minimizar o efeito da turbulência do vento, pois medições de pressão sonora não são eficazes quando a velocidade do vento excede 19 m/s. Já o calibrador é um dispositivo portátil inserido no microfone do sonômetro, gerando um tom puro na frequência de 1 kHz, em um nível específico (geralmente 114 dB).

A leitura do sonômetro é comparada com a saída do calibrador, assim orientando um ajuste na medição.

3.1.2

Tipos de sonômetro

Os sonômetros se classificam em sonômetro convencional, sonômetro de nível equivalente e sonômetro integrador [26, 27]. O sonômetro convencional permite fazer medições da pressão sonora com ponderação no tempo e na

frequência, o sonômetro de nível equivalente é capaz de obter a média temporal do nível sonoro ponderado em frequência, enquanto o sonômetro integrador permite medir os níveis sonoros com diferentes ponderações tanto no tempo quanto na frequência. Para se efetuar uma avaliação acústica realista e para que o sonômetro tenha uma resposta semelhante à do ouvido humano, o seu detector rms é usualmente provido de um sistema capaz de efetuar diferentes ponderações. O sonômetro integrador, segundo a literatura é dividido em quatro classes de acordo com sua precisão, classes 0, 1, 2 e 3 [5, 13, 28], no entanto a norma IEC 61672-1 considera apenas a classe 1 e a classe 2, que diferem principalmente nos limites de tolerância e na faixa de temperaturas operacionais:

- *Sonômetro classe 0*: usado para fins específicos, geralmente em laboratório para obter níveis de referência.
- *Sonômetro classe 1*: permite a realização de medições em campo que atendem aos requisitos da normativa internacional.
- *Sonômetro classe 2*: permite realizar medições gerais em trabalhos de campo.
- *Sonômetro classe 3*: associado a um menor rigor de medição, é usualmente utilizado em aplicativos para dispositivos móveis.

3.1.3

Descritores Acústicos

A grandeza medida pelo sonômetro está associada ao nível médio de energia num determinado intervalo de tempo (ou *pressão sonora efetiva*), denotado como L_{eq} e expresso pela equação 3-1, que significa que a pressão medida é elevada ao quadrado e depois calculada a média do total de amostras num intervalo de tempo definido pelo usuário na configuração do sonômetro [5, 7, 13].

$$L_{eq,T_e} = 10 \text{Log} \left[\frac{1}{T} \int_0^{T_e} 10^{\frac{L(T)}{10}} dt \right] \quad (3-1)$$

Nesta equação:

L_{eq,T_e} = Nível de pressão sonora contínuo equivalente [dB]

T_e = Tempo de integração [s]

T = Período da medição [s]

$L(T)$ = Nível de pressão sonora instantânea [Pa]

A essa grandeza estão associados diferentes índices acústicos que dependem do objetivo da medição. Os descritores utilizados neste trabalho são:

- **Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado A, $L_{A_{eq}}$.**

Entende-se por nível contínuo equivalente $L_{A_{eq}}$ da pressão sonora, o sinal medido que é passado pelo filtro de ponderação A, antes de ser elevado ao quadrado e calculada a média de seu valor [13]. O nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado A, é usado como o descritor de ruído ocupacional padrão da normativa ambiental internacional para os períodos diurno e noturno, e é dado pela equação 3-2. Na norma ABNT NBR 10151:2019 utilizada neste projeto é também referenciado como L_d , para o período diurno e L_n para o período noturno.

$$L_{A_{eq},T_e} = 10 \text{Log} \left[\frac{1}{T} \int_0^{T_e} 10^{\frac{L_A(T)}{10}} dt \right] \quad (3-2)$$

Nesta equação:

L_{A_{eq},T_e} = Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado A [dB]

T_e = Tempo de integração [s]

T = Período da medição[s]

$L_A(T)$ = Nível de pressão sonora instantânea ponderado A [Pa]

- **Nível de pressão sonora representativo de períodos completos,**

L_d, L_n, L_{dn} .

Conforme indicado no item anterior o L_d caracteriza o nível de pressão sonora equivalente ponderada em A, $L_{A_{eq}}$, para o período diurno. Já para o período noturno a nomenclatura utilizada é L_n [7]. Os períodos diurnos, de 7 h às 22 h, e noturnos, das 22 h às 7 h do dia seguinte, definidos na norma ABNT NBR 10151:2019 [7, 8] são definidos em função do tipo de área e apresentados na Tabela 3.2. Para caracterizar o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A, para um período de 24 h, utiliza-se o descritor L_{dn} , que implementa uma média logarítmica ponderada dos resultados obtidos de L_d e L_n conforme definido na equação 3-3.

$$L_{dn} = 10 \text{Log} \left[\frac{d}{24} 10^{\frac{L_d}{10}} + \frac{n}{24} 10^{\frac{L_n + \Delta}{10}} \right] \quad (3-3)$$

Nesta equação:

- L_{dn} = Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado A para um período de 24 h [dB]
- d = Número de horas do período diurno
- n = Número de horas do período noturno
- L_d = Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente ponderado A para o período diurno [dB]
- L_n = Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente ponderado A para o período noturno [dB]
- Δ = Diferença aritmética entre os valores RL_{Aeq} medidos nos períodos diurno e noturno, que são os limites dos níveis de pressão sonora em função dos tipos de áreas habitadas e do período [7]. a ser considerado para se estabelecer conformidade aos limites impostos pela legislação aplicável.

- **Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado A corrigido, LR**

É o L_{Aeq} medido, incluindo-se a contribuição do(s) som(s) provenientes(s) da(s) fonte(s) objeto de avaliação, no respectivo período/horário e levando-se em consideração os limites de RL_{Aeq} definidos na Tabela 3.2. O LR é calculado conforme definido na equação 3-4, que caracteriza o nível sugerido pela norma ABNT NBR 10151:2019.

$$LR = L_{Aeq} + K_I + K_T \quad (3-4)$$

Nesta equação:

LR = Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado A corrigido [dB]

L_{Aeq} = Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado A associado às fontes de avaliação para sons contínuos ou intermitentes [dB]

K_I = Valor de correção, é igual a 5 quando o ruído gerado pela fonte for caracterizada como som impulsivo [7]

K_T = Valor de correção, é igual a 5 quando o ruído gerado pela fonte for caracterizada como som tonal [7]

- **Descritores estatísticos L_{10} , L_{50} , L_{90} e L_{95}**

Estes descritores caracterizam diferentes sons que incidem na medição por períodos de tempo aleatórios, a exemplo ruído do tráfego ou ruído

de fundo em ambientes urbanos e rurais. De forma geral, um descritor L_x indica o nível de ruído que foi excedido durante a sua medição num determinado intervalo de tempo. Os descritores mais usados são L_{10} para ruído de trânsito e L_{90} para ruído de fundo.

Tabela 3.2: Limites de pressão sonora por tipos de área habitada e por período [7].

Tipos de áreas habitadas	$RL_{A_{eq}}$ Limites de níveis de pressão sonora (dB)	
	Período diurno	Período Noturno
	Área de residências rurais	40
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista predominantemente residencial	55	50
Área mista com predominância de atividades comerciais e/ou administrativa	60	55
Área mista com predominância de atividades culturais, lazer e turismo	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

3.1.4

Ponderação em frequência

Os filtros de ponderação em frequência apresentados na Figura 3.2 foram projetados para corresponder à resposta do ouvido humano ao som [5, 13]. A ponderação A corresponde à resposta do ouvido humano para um nível de pressão de 70 dB no espectro completo de frequências audíveis; a ponderação C corresponde à resposta do ouvido humano apenas para frequências abaixo de 63 Hz e é aproximadamente plana para frequências entre 63 Hz a 4000 Hz; a ponderação Z refere-se ao sinal medido sem ser processado por nenhum filtro em frequência; e a ponderação G é usada para determinar o dano que o ruído

causa ao ouvido humano devido ao infrassom na faixa de frequência de 1 Hz a 20 Hz.

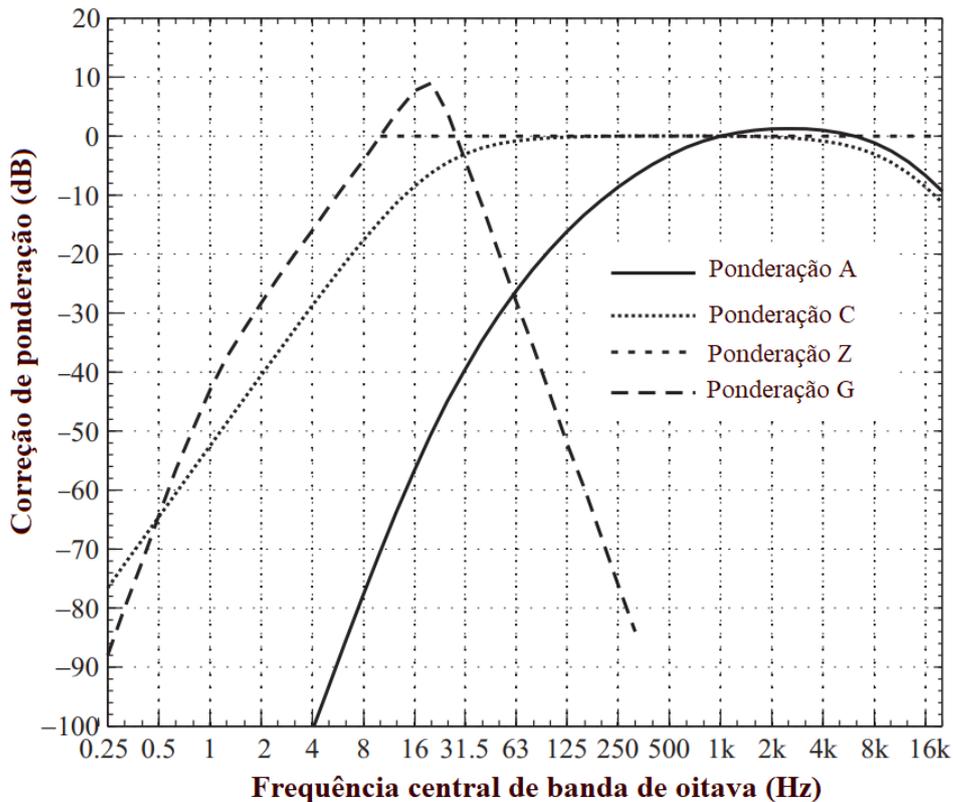


Figura 3.2: Curvas de ponderação usadas na avaliação do ruído [13].

3.1.5

Ponderação em tempo

A ponderação no tempo faz referência à velocidade com que cada uma das amostras de uma medição é realizada. Existem quatro ponderações [26, 27]:

- Lento (slow, S): o valor RMS (ou valor médio) é de aproximadamente 1 segundo. Esse tipo de ponderação é amplamente usado com a ponderação de frequência A, pois se assemelha muito ao comportamento do ouvido humano.
- Impulsiva (Impulse, I): esta ponderação é utilizada para medir a resposta do ouvido humano a sons de curta duração e intensidade moderada, com um valor RMS (ou valor médio) de aproximadamente 35 ms.
- Rápido (Fast, F): o valor RMS (ou valor médio) é de aproximadamente 125 ms. Esse tipo de ponderação é mais eficaz na presença de flutuações.

- Pico (Peak, P): ponderação utilizada para avaliar o alto risco de perda auditiva diante de sons impulsivos de valor muito intenso. O valor RMS (ou valor médio) varia entre 50 e 100 ms.

3.1.6

Sonômetro Cesva SC420

O sonômetro SC420 fabricado pela Cesva [29] é um instrumento de medição bastante intuitivo e amigável que cumpre com a norma internacional IEC 61672-1 para a classe 1, tanto para ondas incidentes sobre o microfone na direção de referência em campo livre como para ondas de incidência aleatória em campo difuso. Pelo seu tamanho e peso é de fácil manuseio, conforme ilustrado na Figura 3.3.



Figura 3.3: Sonômetro Cesva SC420.

O sonômetro Cesva SC420 possui uma arquitetura modular de funcionalidades facilmente configuradas no momento da medição na forma de modos de medição. O modo básico de funcionamento é o modo sonômetro, não obstante outros diferentes módulos poderem ser adicionados no momento da compra do dispositivo e/ou atualizados por encomenda ao fornecedor. Os módulos disponíveis para este modelo são:

- Módulo analisador de espectro em tempo real por bandas de oitava (1/1), com filtros Classe 1 [30, 31].

- Módulo analisador de espectro em tempo real para bandas de terço de oitava (1/3), com filtros Classe 1 [30, 31].
- Módulo de medição do tempo de reverberação pelo método de ruído interrompido (em bandas de 1/1 oitava e 1/3 de oitava).
- Módulo de medição do tempo de reverberação pelo método da resposta ao impulso integrada (em bandas de 1/1 oitava e 1/3 de de oitava).
- Módulo de avaliação de funções PRL (Prevenção de Riscos Laborais).
- Módulo de análise de frequência de banda estreita FFT (*Fast Fourier Transform*).
- Módulo de gravação de áudio com qualidade de análise.

Dois foram os módulos utilizados nas medições realizadas durante o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado, o módulo sonômetro e o módulo analisador de espectro para bandas de 1/3 de oitava, ambos apresentados na Figura 3.4. O módulo sonômetro realiza medições de níveis globais de pressão sonora, para valores instantâneos e médios, enquanto o módulo analisador de espectro realiza uma análise de frequência do nível de pressão sonora contínuo equivalente nas bandas de 1/3 de oitava de 10 Hz a 20 kHz quando nenhuma ponderação de frequência é aplicada.

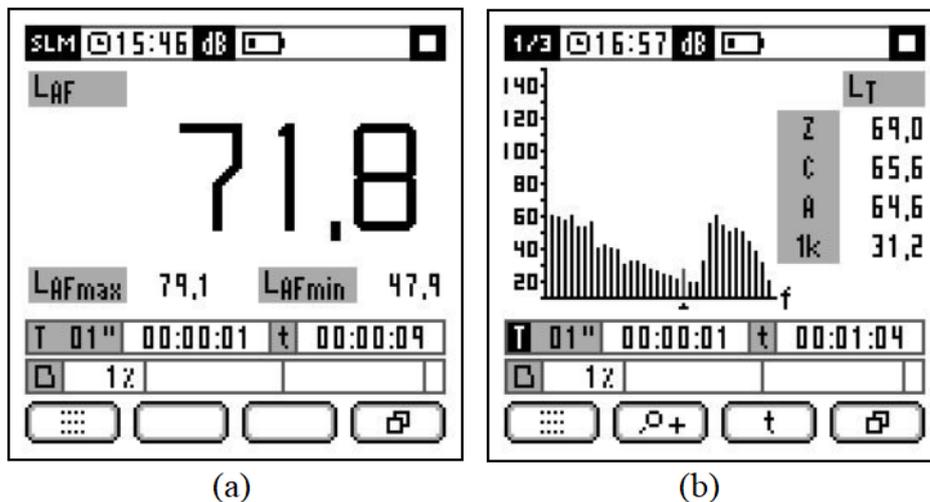


Figura 3.4: Modos de medição sonômetro SC420: (a) Modo sonômetro (b) Modo analisador de espectro para bandas de 1/3 de oitava.

O sonômetro Cesva SC420 também disponibiliza o programa Cesva Lab [32] que permite a visualização numérica e gráfica dos dados das medições bem

como exportá-los para geração de relatórios. A Figura 3.5 mostra a janela de análise do Cesva Lab.

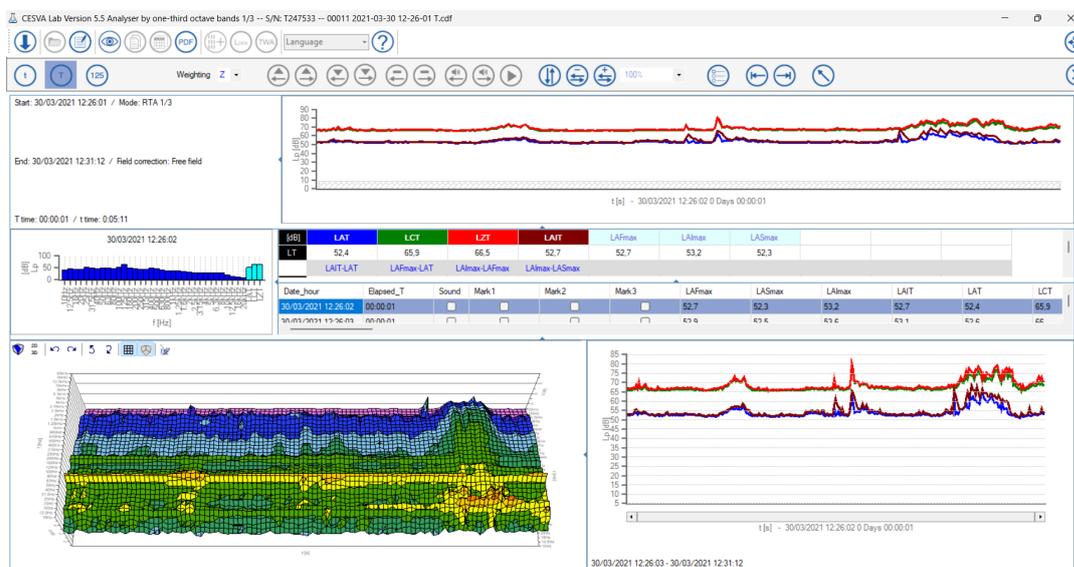


Figura 3.5: Software Cesva Lab.

3.2

O Processo de medição

O tipo de medição dos níveis de pressão sonora dependerá da finalidade da medição; para um projeto de controle de ruído é necessário determinar o tipo da(s) fonte(s) geradoras do problema, assim como obter níveis em dB com ponderação A, e níveis em banda de oitava e/ou terço de oitava que permitam determinar se os critérios definidos na normativa foram excedidos e/ou permitem a comparação com modelos computacionais. Este processo requer especial atenção aos detalhes para a eliminação de possíveis fontes de erro de medição. A seguir, definem-se alguns pontos críticos que devem ser considerados durante o processo de medição [13, 7]:

- **Características de resposta do instrumento de medição:** antes de uma medição devem-se consultar as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante do instrumento utilizado para garantir que tanto a amplitude da pressão (mínima ou máxima) quanto a frequência do sinal estejam dentro das faixas especificadas.
- **Efeito do ruído de fundo:** é o fator com maior probabilidade de afetar as leituras do nível de pressão sonora. Deve-se considerar, quando possível, o nível de ruído de fundo com a fonte desligada. Se a diferença

abaixo do nível total com a fonte ligada for inferior a 10 dB, deve ser feita uma correção para cada leitura, mas se a diferença for menor que 3 dB para qualquer banda de 1/3 de oitava, provavelmente não será possível fazer medições acústicas significativas nessa banda [13].

- **Efeito do ruído do vento:** como prática usual, recomenda-se evitar leituras espúrias devido ao vento, particularmente em frequências abaixo de 200 Hz. Esses efeitos podem ser reduzidos colocando espumas acústicas porosas sobre o microfone do instrumento de medição, desde que a velocidade do vento não exceda 20 km/h. Se for necessário fazer medições de ruído quando o vento é mais forte do que esse limite, far-se-á necessário utilizar uma tela adicional [13].
- **Efeito da Temperatura ambiente:** a maioria de componentes eletrônicos são sensíveis à temperatura, tendo uma incidência direta na sua vida útil. Embora não se possa dispensar a calibração periódica dos microfones de condensador, estes geralmente mantêm a sua calibração dentro de 0,5 dB em uma faixa de -40 °C a 150 °C, mas podem ser danificados quando expostos a temperaturas mais altas [13].
- **Efeito da Umidade e Poeira:** estes fatores afetam em especial o microfone do condensador já que estes são sensíveis à umidade e poeira no seu diafragma. Tais efeitos causam um alto nível de ruído de fundo. Quando o equipamento não estiver em uso, recomenda-se armazená-los em um local seco e manter o microfone protegido [13].
- **Efeito dos locais e pontos de medição:** antes de que qualquer medição seja realizada, recomenda-se selecionar os locais e pontos de medição de acordo com o objetivo da medição e as especificações descritas na norma a utilizar [7]. No curso de desenvolvimento desta pesquisa de mestrado, os seguintes objetivos foram considerados: avaliação sonora ambiental e avaliação de incidência sonora na fachada de edificações, escolhendo-se pontos de medição em áreas habitadas próximas à subestação de energia.
- **Efeito de reflexões de superfícies próximas:** objetos próximos à(s) fonte(s) ou posicionados no caminho de propagação podem afetar a avaliação da verdadeira potência acústica da(s) fonte(s). Quando os objetos não podem ser removidos, estes devem ser cobertos com material absorvente de som, cuja espessura deve aumentar à medida que a frequência de interesse diminui [13]. Ou, também, posicionar o instrumento de medição a pelo menos 2 m de distância de qualquer

barreira, a exemplo de paredes ou muros de fachadas e edificações. No caso de medições executadas no nível do solo, o dispositivo de medição deve ser posicionado, preferencialmente, entre 1,2 m e 1,5 m do solo [7].

- **Efeitos dos métodos de medição:** são as especificações que devem ser observadas de acordo com o objetivo da medição e características da(s) fonte(s), especialmente se estas apresentam características de sons tonais e impulsivos [7]. Os métodos de medição geralmente fornecem os passos de configuração do(s) dispositivo(s) de medição, recomendações para tempo das medições, descritores acústicos a obter, e indicações na geração de relatórios.

3.3

Normalização e legislação aplicável

Termos e recomendações relacionadas à contaminação ambiental e poluição sonora devem ser obrigatoriamente considerados ao aplicar as diferentes normas e legislações internacionais, tendo em vista que estas visam assegurar segurança e a qualidade de vida das pessoas expostas ao ruído acústico [33].

3.3.1

Normas técnicas e diretivas relacionadas ao tema da pesquisa

As normas técnicas e diretivas relacionadas ao tema da pesquisa definem as diretrizes, terminologia e procedimentos de avaliação na área da acústica com o propósito de descrever, padronizar e harmonizar a operação de todos os atores envolvidos dentro do clima social, econômico e político de cada região.

3.3.1.1

Normas internacionais relacionadas ao tema da pesquisa

Os métodos e termos usados para descrição, medição e avaliação do ruído ambiental são definidos na norma internacional ISO 1996-1:2016 [34], enquanto os procedimentos para determinação de níveis admissíveis de pressão sonora são definidos na norma ISO 1996-2:2017 [35].

As especificações para os medidores de nível de pressão sonora encontram-se definidas nas normas IEC 61672-1 [26] e IEC 61672-3 [27].

As especificações para implementação dos filtros por banda de 1/1 de oitava e 1/3 de oitava se encontram definidas na norma IEC 61260-1 [30] enquanto as especificações para testes periódicos se encontram definidas na norma IEC 61260-3 [31].

3.3.1.2

Normas técnicas brasileiras relacionadas ao tema da pesquisa

O organismo encarregado pela elaboração das normas técnicas em todo o território nacional é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), cujo escopo de atuação inclui, também, normas, terminologia e definições em acústica. Dentre as normas brasileiras de interesse à acústica, destaca-se a norma ABNT NBR 16.313:2014 [37], enquanto os procedimentos de medição e determinação dos níveis de pressão sonora para ambientes externos são definidos na norma ABNT NBR 10151 [7], e os ambientes internos tratados na norma ABNT NBR 10152 [8].

As especificações para os medidores de nível de pressão sonora encontram-se definidas nas normas brasileiras ABNT NBR IEC 61672-1:2021 [38] e ABNT NBR IEC 61672-3:2018 [39] que foram incorporadas a partir da tradução das normas IEC 61672-1:2002 e IEC 61672-3:2013. Já a implementação de filtros por banda de 1/1 de oitava e 1/3 de oitava é tratado na norma brasileira ABNT NBR IEC 61260-3 [40], que define especificações para testes periódicos normalizados.

4

Protótipo de sonômetro: concepção e desenvolvimento

Este capítulo apresenta as etapas de desenvolvimento do sonômetro de baixo custo, objeto desta pesquisa de mestrado, concebida no âmbito das ações de projetos de sensores e instrumentação do Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio.

A alternativa de sonômetro concebida integra os seguintes elementos: (i) um transdutor de entrada (um microfone dbx RTA-M [41]); (ii) um sistema de amplificação, implementado por uma interface de áudio focusrite 2i2 [42] de primeira geração; (iii) um condicionador do sinal implementado em um sistema embarcado Linux Orange Pi PC Plus [43] [44]; e (iv) um sistema de visualização remota, acessado por protocolo HTTP.

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de blocos do protótipo do sonômetro desenvolvido nesta dissertação de mestrado:

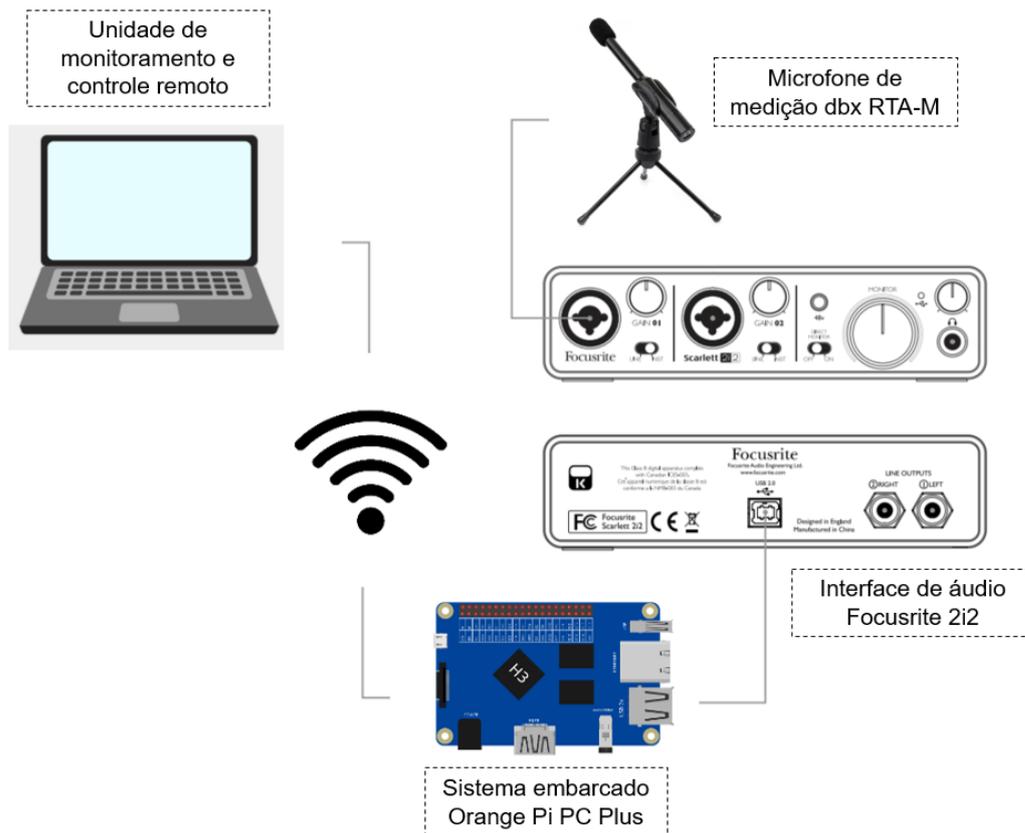


Figura 4.1: Diagrama do protótipo de sonômetro.

4.1

Sistemas embarcados

Um sistema embarcado é um dispositivo eletrônico utilizado para gerenciar informações de interesse (e.g.: grandezas físicas; sinais de controle). Alguns exemplos de dispositivos construídos com sistemas embarcados são escâneres de DNA (ácido desoxirribonucleico), unidades de medição inercial para aviões e carros de corrida, sistemas de geolocalização de disparos e diversos dispositivos médicos e de consumo [45] [46]. Possuindo uma arquitetura dada pelo processador somado a um conjunto de componentes, esses sistemas fazem parte de uma família de computadores que visam cumprir um propósito específico. Como tal, são sistemas físicos e estão limitados a fatores ambientais e operacionais, no entanto seu projeto pode ser otimizado para aplicações específicas pela implementação de interfaces de *hardware* e *software*.

Já um sistema embarcado Linux é um sistema embarcado que usa o kernel de Linux e vários componentes *open-source* na construção do *software* de seu sistema operacional [44].

Em geral, os sistemas embarcados possuem diferentes interfaces de en-

trada e saída de dados, conhecidas como *communication buses*. Fazem uso de portas de conexão serial (I2C, SPI, UART, USART, SDIO, PCI); portas para conexão USB; portas HDMI, para conexão de telas do tipo *touch screen*, o que fornece ao desenvolvedor uma vantagem estética do produto, assim como amplo suporte para conexão de rede (Ethernet, WiFi, Bluetooth, CAN, etc.).

O desenvolvimento de projetos que fazem uso de sistemas embarcados Linux requer uma série de ferramentas em seu sistema hospedeiro e no sistema embarcado, conforme ilustrado na Figura 4.2. Estas ferramentas são:

- *Cadeia de ferramentas de compilação cruzada (Cross-compiler tool-chain)*: Coleção de arquivos binários, executados na máquina de desenvolvimento, e que permitem compilar, montar, vincular e depurar (além de outras funcionalidades) código para o dispositivo alvo.
- *Bootloader*: Aplicativo iniciado pelo *hardware*, responsável pela inicialização básica, carregamento e execução do Kernel.
- *Kernel do Linux*: Núcleo do sistema que permite a comunicação entre o sistema operacional e os recursos físicos e lógicos do *hardware*. O Kernel é a primeira camada de *software* do sistema e contém as rotinas para o gerenciamento de processos e memória, pilha de rede, *drivers* de dispositivos, além de fornecer os serviços para aplicativos no espaço de usuário.
- *Bibliotecas C*: Bibliotecas de funções na linguagem C, que fornecem a interface entre o Kernel e os aplicativos do espaço de usuário.
- *Bibliotecas e aplicações*: Bibliotecas e/ou aplicações de terceiros ou próprias.

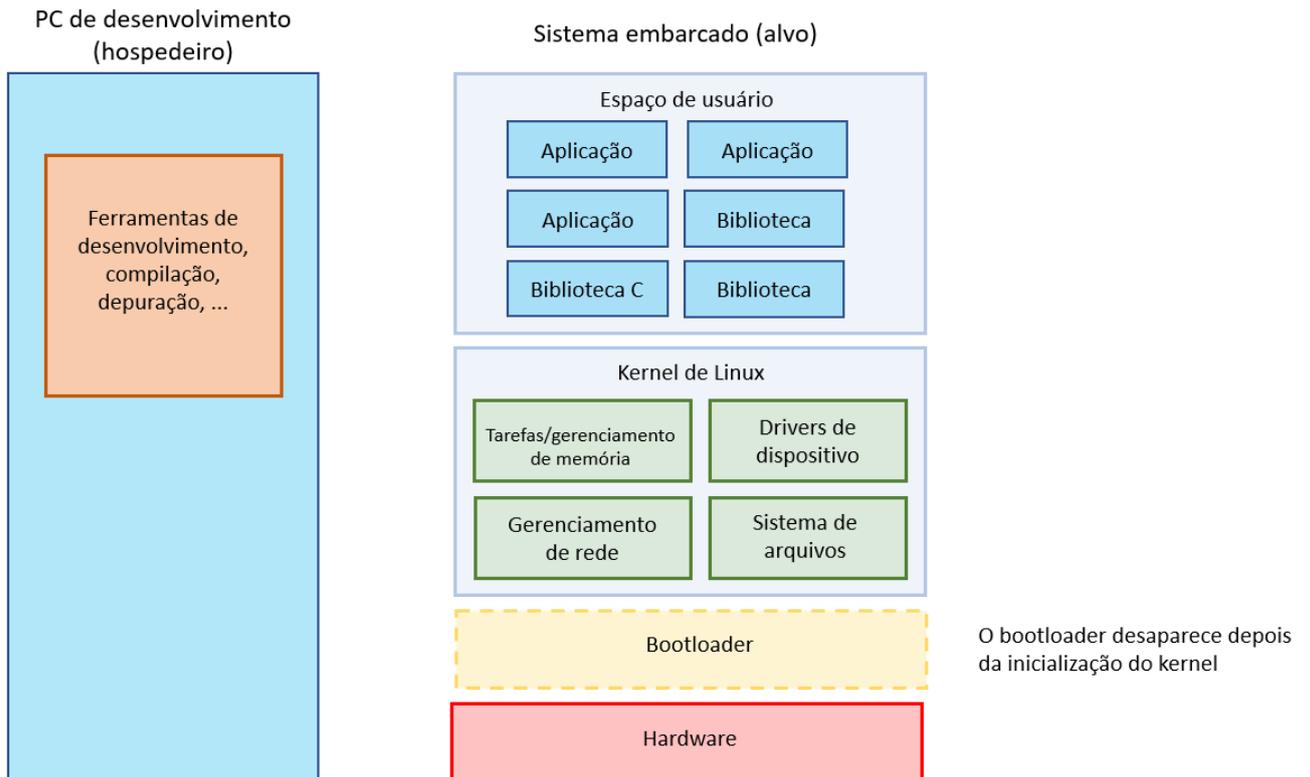


Figura 4.2: Arquitetura de um sistema embarcado Linux.

Estes sistemas estão se tornando ferramentas de uso crescente devido à possibilidade de implementar e desenvolver diferentes produtos de consumo, assim como aplicações e módulos externos de *hardware* configuráveis e integráveis com diferentes plataformas web, sistemas na nuvem e sistemas de gestão [44]. A Figura 4.3 apresenta uma linha de tempo do desenvolvimento de sistemas embarcados Linux:

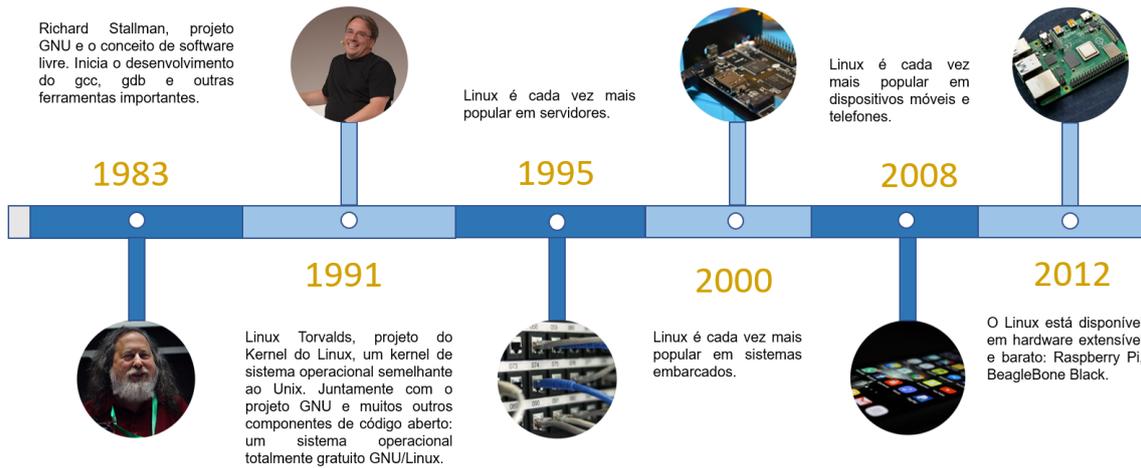


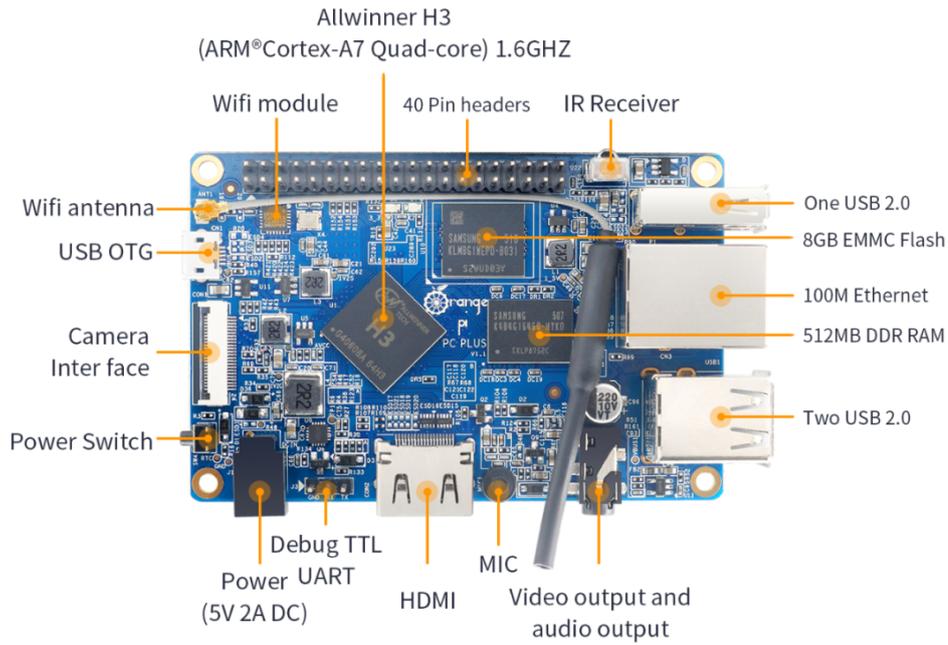
Figura 4.3: Linha do tempo de sistemas Linux embarcados.

4.1.1

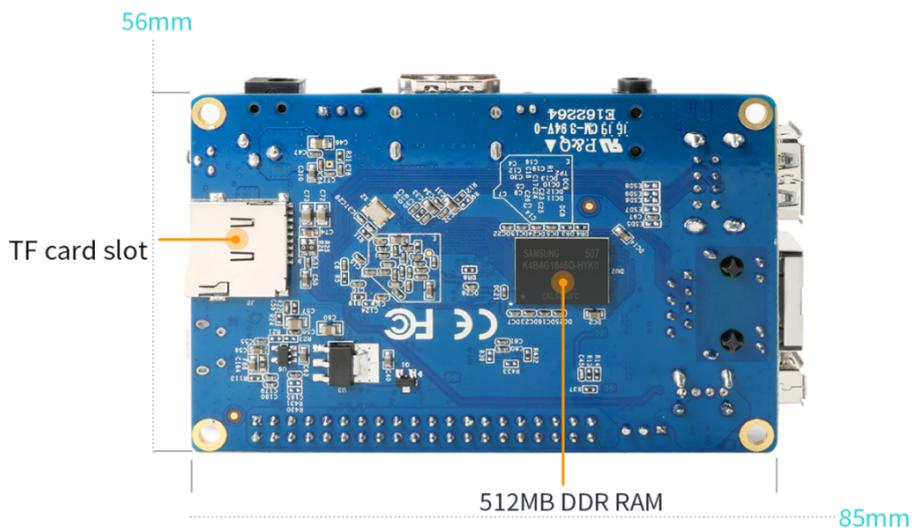
SBC Orange Pi PC Plus

A Orange Pi PC Plus [43] é uma SBC (*Single board computer*) *open-source* usada para o desenvolvimento de produtos com a integração de *hardware* e *software*. Possui um processador baseado na arquitetura *ARM* (*Advanced RISC Machine*), o processador Cortex A7 [48], 1 GB de memória RAM DDR3 compartilhada com a GPU, armazenamento interno de 8 GB e um *slot* para cartão micro SD de até 32 GB. Possui uma interface GPIO de 40 pinos, 1 porta *Fast Ethernet* RJ45 e NIC WiFi integrada, entradas e saídas de áudio e vídeo, 3 portas USB 2.0 Host e 1 porta USB 2.0 OTG, 1 porta serial UART Tx e Rx para depuração, 1 led de status, 1 botão configurável e entrada de poder DC.

A Figura 4.4 apresenta as vistas do topo (a) e do verso (b) da placa, enquanto a Figura 4.5 apresenta a configuração de pinagem da placa Orange Pi PC Plus. A configuração do sistema é apresentada em detalhe no Apêndice B.



(a)



(b)

Figura 4.4: Componentes Orange Pi PC Plus (a) vista do topo (b) e do verso da placa [47].

Pin#	NAME		NAME	Pin#
01	VCC-3V3	⬜	VCC-5V	02
03	TWI0-SDA (PA12)	⬜	VCC-5V	04
05	TWI0-SCK (PA11)	⬜	GND	06
07	PWM1(PA6)	⬜	(PA13)UART3_TX	08
09	GND	⬜	(PA14)UART3_RX	10
11	UART2_RX(PA1)	⬜	(PD14) PD14	12
13	UART2_TX(PA0)	⬜	GND	14
15	UART2_CTS(PA3)	⬜	(PC4)PC4	16
17	VCC-3V3	⬜	(PC7) CAN_RX	18
19	SPI0_MOSI(PC0)	⬜	GND	20
21	SPI0_MISO(PC1)	⬜	(PA2)UART2_RTS	22
23	SPI0_CLK(PC2)	⬜	(PC3)SPI0_CS0	24
25	GND	⬜	(PA21)PA21	26
27	TWI1-SDA(PA19)	⬜	(PA18)TWI1-SCK	28
29	PA7(PA7)	⬜	GND	30
31	PA8(PA8)	⬜	(PG8)UART1_RTS	32
33	PA9(PA9)	⬜	GND	34
35	PA10(PA10)	⬜	(PG9)UART1_CTS	36
37	PA20(PA20)	⬜	(PG6) UART1_TX	38
39	GND	⬜	(PG7) UART1_RX	40

Figura 4.5: Pinagem Orange Pi PC Plus [47].

4.2

Estrutura de áudio no Linux

Dentre os aspectos relevantes a serem gerenciados na Orange Pi PC Plus, e no armbian, destaca-se o fluxo de áudio, que incorpora distintas tecnologias envolvidas [49] [50] e cujo entendimento não é trivial. O fluxo de áudio no Linux é organizado na forma de camadas, podendo ser entendido como análogo ao modelo *TCP/IP* de redes conforme ilustrado na Figura 4.6. No entanto, em termos de hierarquia e organização, as camadas podem variar com a implementação de novas tecnologias.

A camada mais baixa do modelo é a camada física, compreendendo os dispositivos de hardware, como interfaces de áudio internas e/ou externas. Em seguida encontra-se a segunda camada, que abriga as tecnologias que interagem com o kernel do sistema:

- *FFADO (Free Firewire Audio Drivers for Linux)* [51]: é uma solução open-source para suportar dispositivos de áudio através de conexão Firewire, utilizado no áudio profissional.
- *OSS (Open Sound System)* [52] [53]: é uma arquitetura de som para sistemas compatíveis com Unix e Posix. OSS foi a primeira tentativa de unificar a arquitetura digital para Unix e foi o padrão do Linux até 2002

quando foi substituído pelo ALSA e se tornou um produto proprietário. Em 2007 o projeto voltou a ser *open-source*.

- *ALSA (Advanced Linux Sound Architecture)* [54] [55] [56]: é o componente atual do Kernel do Linux para fornecer drivers de dispositivos de som. ALSA também disponibiliza uma extensa biblioteca no espaço de usuário para desenvolvimento.

Na camada três encontram-se os servidores de áudio. Estes são pacotes de software projetados para gerenciar os drivers fornecidos pela arquitetura de áudio do sistema, seja ALSA, OSS ou FFADO. Alguns são fornecidos, por padrão, com as distribuições, pois são usados pelos navegadores e/ou reprodutores de mídia da distribuição, enquanto outros precisam ser instalados e configurados. Os dois principais servidores para áudio são Jack Audio Server [57] e Pulse Audio, embora existam diversos outros servidores para trabalhar com *stream* multimedia.

- *Jack* [57] [58] [59]: este é um servidor de áudio multiplataforma que fornece execução síncrona e conexão de baixa latência, assim como a infraestrutura através de API para aplicativos de áudio se comunicarem entre si e com o hardware de áudio. O nome Jack faz referência à forma clássica dos conectores de áudio para cabos físicos. No momento deste projeto de pesquisa de mestrado, havia duas implementações da API Jack disponíveis, jack1 e jack2. Para a implementação do protótipo do sonômetro foi utilizado o Jack1.
- *Pulse Audio* [60] [61]: é um servidor de som multiplataforma que fornece funcionalidade de rede para gerenciamento remoto de som.

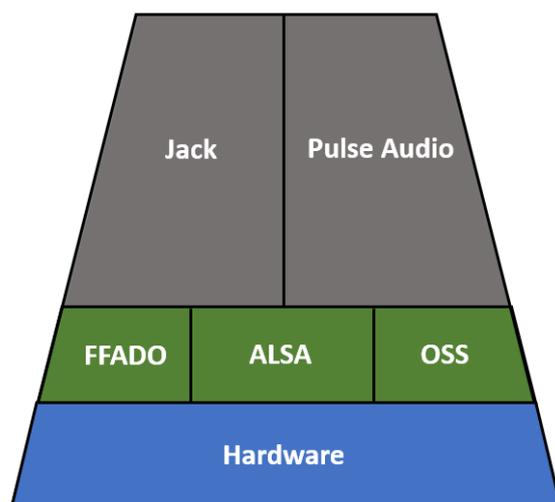


Figura 4.6: Estrutura básica de áudio no Linux.

A configuração do sistema para o processamento dos sinais de áudio encontra-se explicado em detalhe na seção B3 do Apêndice B.

4.3 Implementação do sonômetro

A seguir se descrevem as etapas de implementação apresentadas na Figura 4.1:

4.3.1 Etapa de entrada

A etapa de entrada do sinal é realizada por um microfone de condensador dbx RTA-M [41] ilustrado na Figura 4.7. Este é encarregado de converter as variações de pressão em sinais elétricos. Para tal foi selecionado, tendo em vista a sua precisão e consistência, que são características amplamente reconhecidas no processo de otimização de sistemas profissionais de reforço de som.



Figura 4.7: Microfone dbx RTA-M.

Sua resposta em frequência é aproximadamente plana para a faixa de 20 Hz a 20 kHz conforme ilustrado na Figura 4.8 com característica omnidirecional conforme ilustrado na Figura 4.9:

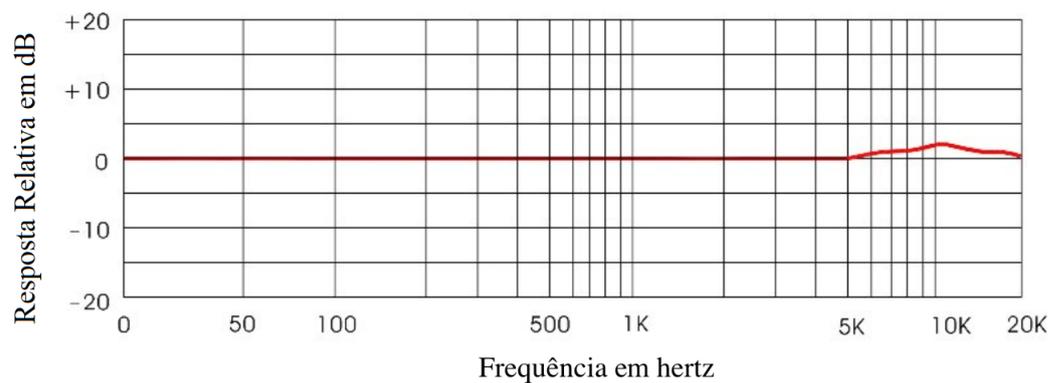


Figura 4.8: Gráfico de resposta em frequência do microfone dbx RTA-M.

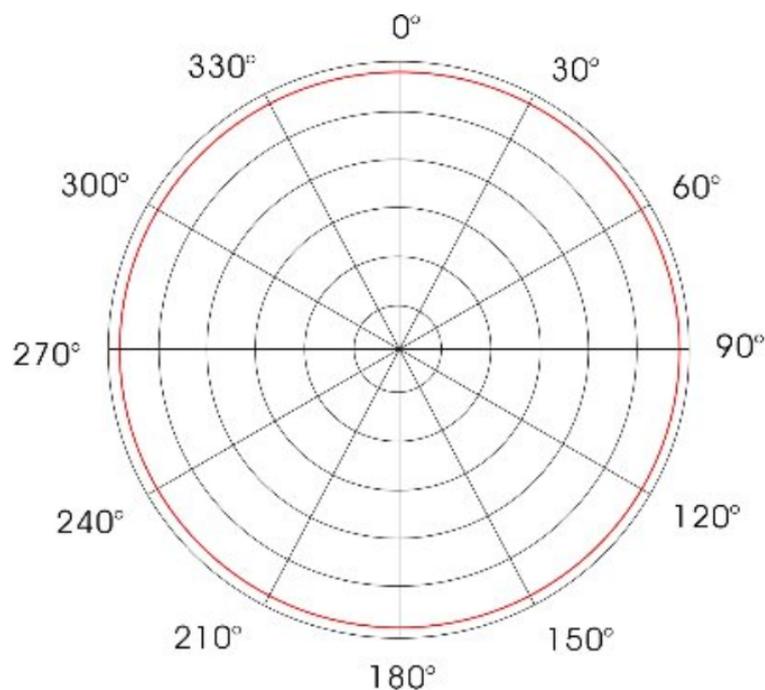


Figura 4.9: Gráfico de resposta direcional do microfone dbx RTA-M.

As principais especificações técnicas são:

- Sensibilidade: $-63 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}$.
- Impedância: $250 \Omega \pm 30 \%$ (a 1000 Hz).
- Padrão polar: omnidirecional.
- Resposta de frequência: 20 Hz - 20 kHz.
- Elemento: condensador de polarização externa.
- Tensão de operação: phantom power (9 V - 52 V CC).

4.3.2

Etapa de Amplificação

A etapa de amplificação foi implementada em uma interface profissional de áudio, Focusrite 2i2 [42] de primeira geração. Esta interface, apresentada na figura 4.10, incorpora pré-amplificadores analógicos Focusrite de alta qualidade, conexão USB 2.0 e os meios necessários para conectar dispositivos de som de nível de linha ao sistema embarcado Orange Pi PC Plus.



Figura 4.10: Interface de áudio Focusrite 2i2 - primeira geração.

Os sinais físicos podem ser roteados via software, desde que o sistema esteja com os drivers corretamente instalados e configurados, quando os sinais de monitoramento aparecerão nas saídas físicas da interface. Neste ponto é importante esclarecer que os drivers da primeira geração desta interface não estão disponíveis para o kernel do Linux, portanto faz-se necessário reescrever um driver para outro modelo e geração para conseguir a sua utilização.

4.3.3

Etapa de condicionamento e processamento do sinal

O módulo JAPA é um analisador de espectro de áudio perceptual ou psicoacústico, o que significa que os filtros usados para analisar o espectro têm larguras de banda que não são proporcionais à frequência central, da mesma forma como acontece em um analisador de banda de 1/3 de oitava, o que o converte em uma ferramenta ideal para avaliação de ruído ambiente; em contraste com o módulo JAAA, que é uma ferramenta mais técnica baseada na transformada rápida de Fourier, permitindo fazer medições precisas no espectro completo de frequências.

Ambas as ferramentas trabalham no domínio digital, utilizando a escala de medição é dBFS (dB Full Scale) [62] [63], uma unidade relativa que apresenta os valores em relação ao nível máximo do sistema digital, designado como 0 dBFS, que corresponde à amplitude máxima que pode ser representada no sistema sem haver saturação. Por isso, para converter os valores para a escala dB SPL, é preciso conhecer os valores de referência do dispositivo embarcado envolvido na cadeia de medição. No caso da Orange pi, o SoC H3 de Allwinner, embora possa trabalhar tanto com 16 bits como com 24 bits, conforme seu datasheet vem configurado por padrão para trabalhar com 16 bits, e portanto

0 dBFS corresponde a 94 dB SPL. Assim é aplicada a equação 2-5 [62] para comparar os níveis de pressão sonora medidos com o sonômetro CESVA SC420.

$$dB SPL = dBFS + k \quad (4-1)$$

Nesta equação:

$dB SPL$ = Nível de pressão sonora em decibels

$dBFS$ = Nível de amplitude no domínio digital em decibels full scale

k = fator de conversão (94 dB)

O tratamento para divisão da frequência em bandas de 1/3 de oitava é implementado calculando a largura de banda com a equação 2-5 [13] para todas as frequências centrais apresentadas na Tabela 2.2, e normalizando as amplitudes.

$$\Delta f = 0.2316 + f_c \quad (4-2)$$

Nesta equação:

Δf = Largura de banda

f_c = Frequência central

A implementação das curvas de ponderação A e C é feita aplicando os fatores de ponderação correspondentes [40], apresentados na Tabela 4.1 aos valores de amplitude de cada frequência.

Tabela 4.1: Fatores para curvas de ponderação A e C [40]

Frequência central (Hz)	Fatores curva de ponderação A	Fatores curva de ponderação C
20	-50,4	-6,2
25	-44,8	-4,4
31,5	-39,5	-3,0
40	-34,5	-2,2
50	-30,3	-1,3
63	-26,2	-0,8
80	-22,4	-0,5
100	-19,1	-0,3
125	-16,2	-0,2
160	-13,2	-0,1
200	-10,8	0,0
250	-8,7	0,0
315	-6,6	0,0
400	-4,8	0,0
500	-3,2	0,0
630	-1,9	0,0
800	-0,8	0,0
1000	0,0	0,0
1250	0,6	0,0
1600	1,0	-0,1
2000	1,2	-0,2
2500	1,3	-0,3
3150	1,2	-0,5
4000	1,0	-0,8
5000	0,6	-1,3
6300	-0,1	-2,0
8000	-1,1	-3,3
10000	-2,5	-4,4
12500	-4,3	-6,2
16000	-6,7	-8,6
20000	-9,3	-11,3

Como exemplo, a Figura 4.11 ilustra um espectro de 1/3 de oitava com ponderação Z (ou seja, sem ponderação), e as Figuras 4.12. 4.13. mostram, respectivamente, a aplicação das ponderações A e C ao mesmo sinal acústico.

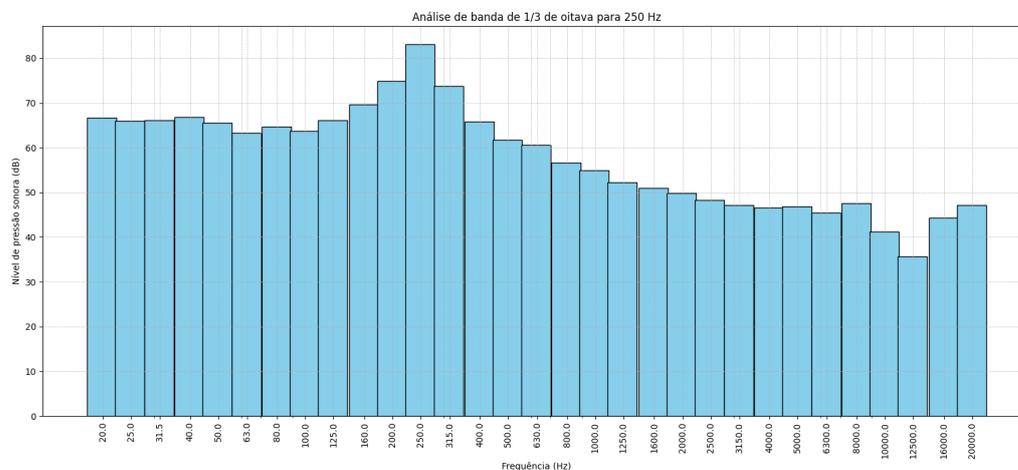


Figura 4.11: Gráfica de frequência sem ponderação.

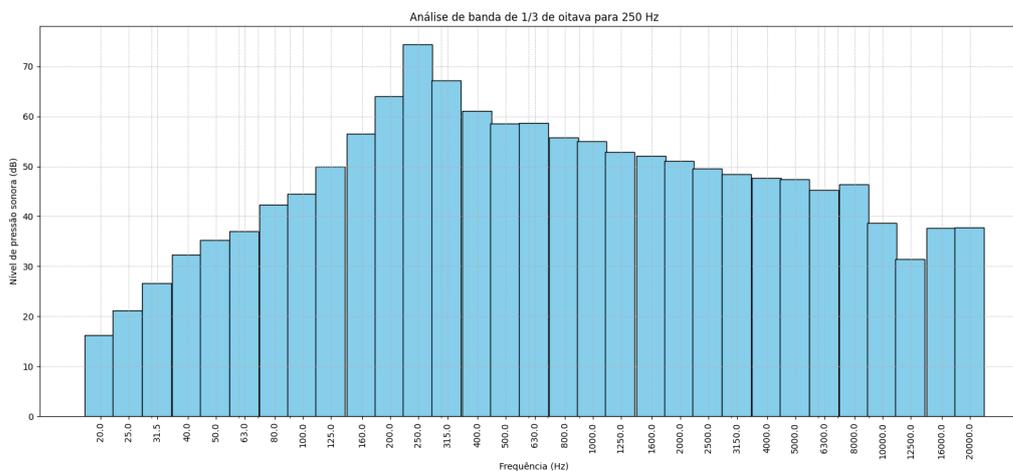


Figura 4.12: Implementação curva de ponderação A.

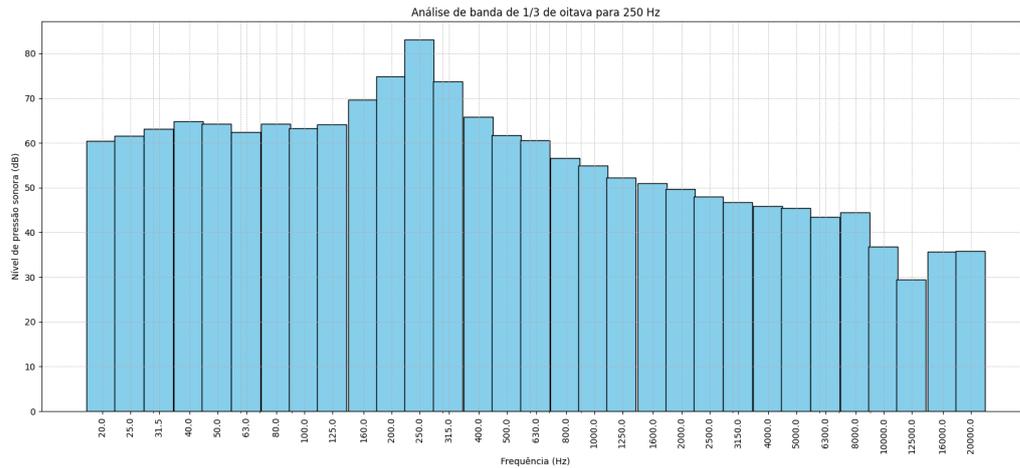


Figura 4.13: Implementação curva de ponderação C.

Uma vez implementadas as rotinas para representação gráfica dos sinais no protótipo foram gerados tons puros nas bandas de 1/3 de oitava em condições controladas e feita a comparação dos resultados.

4.3.4

Etapa de visualização

Foi desenvolvida uma aplicação de escritório multiplataforma (Figura 4.14) integrando as linguagens de alto nível Python e Javascript com o framework Electron Js, e as bibliotecas React JS, Matplotlib, Numpy e Pandas para implementa uma interface gráfica de usuário e permitir la visualização dos dados de espectro em bandas de 1/3 de oitava.

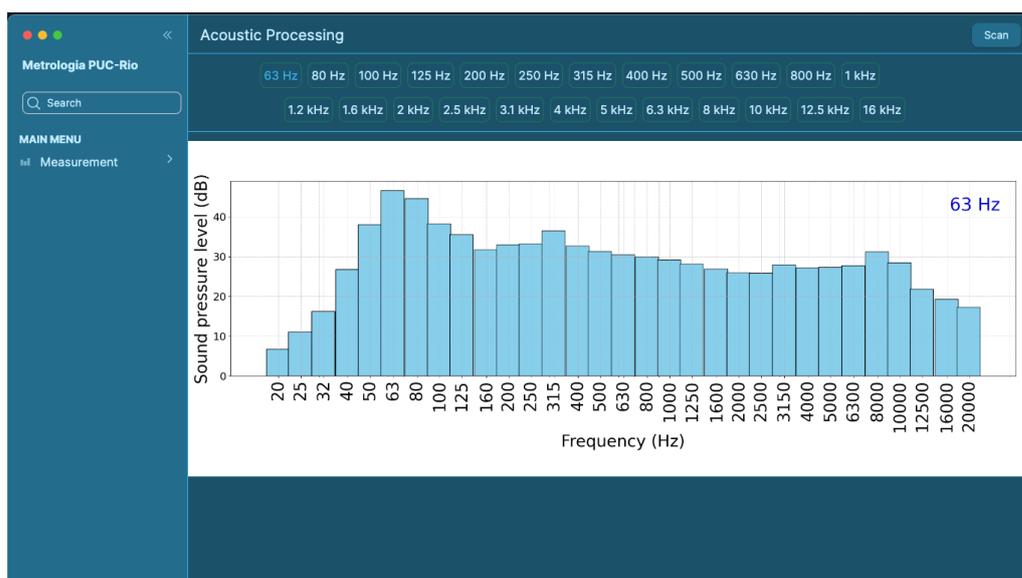


Figura 4.14: Interface gráfica de usuário da aplicação desktop.

A ferramenta compreende três módulos principais para garantir a funcionalidade e a usabilidade dela (Figura 4.15).

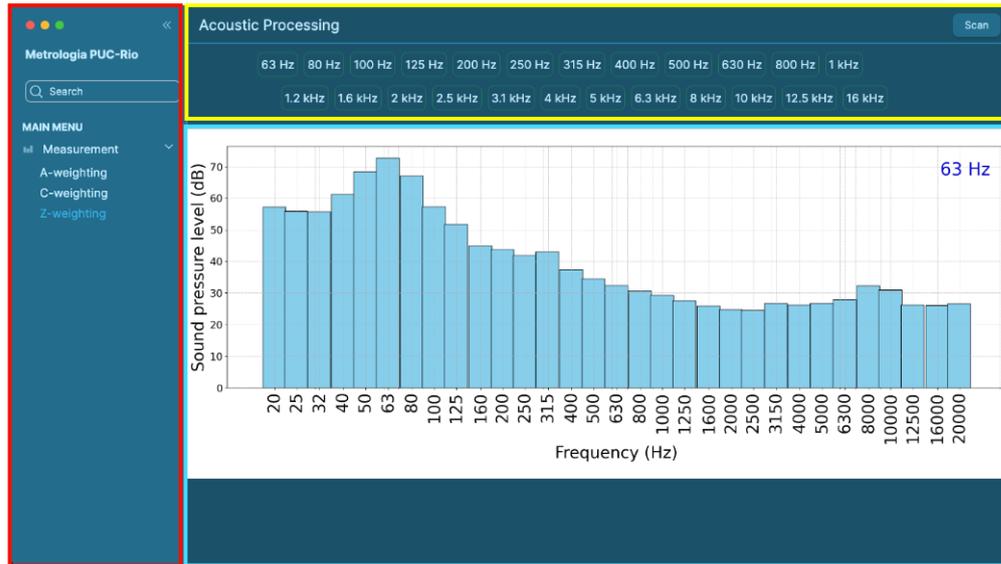


Figura 4.15: Módulo Sidebar (vermelho), módulo Acoustic Processing (amarelo), e módulo Graphics (azul) da aplicação desktop.

O módulo *Sidebar* inclui o nome do Programa de Pós-graduação e a universidade em que foi desenvolvida esta pesquisa de mestrado, seguido de um campo de busca para facilitar a procura de informações. No menu principal deste módulo existe o campo *Measurement* com as opções de visualização das curvas de ponderação A, C e Z. A aplicação mostra o gráfico com ponderação A por padrão.

O módulo *Acoustic Processing* inclui um botão para fazer o scan na rede do protótipo e conectar via *web-socket* com ele, assim como botões para gerar os gráficos de cada uma das frequências por banda de 1/3 de oitava.

O módulo *Graphics* exhibe as figuras de espectro selecionadas, incluindo na legenda a frequência visualizada.

5

Validação do protótipo do sonômetro de baixo custo

Este capítulo apresenta medições realizadas em campo com o protótipo de sonômetro detalhado no Capítulo 4 e uma comparação com um sonômetro comercial CESVA SC420 (descrito na seção 3.1.6).

Este sonômetro comercial foi previamente calibrado pelo laboratório Chrompack Instrumentos Científicos Ltda, que é um laboratório acreditado junto à Rede Brasileira de Calibração (RBC/Inmetro), em observância à Norma IEC 61094-6:2004. Conforme consta do certificado de calibração apresentado no Anexo D, para uma tensão de polarização de 200 V, a sensibilidade do microfone calibrado é de $43,50 \text{ mV Pa}^{-1}$, tomando como referência um sinal de 250 Hz.

5.1

Local das Medições

As medições foram realizadas no interior da Paróquia dos Santos Anjos, localizada no bairro do Leblon, na cidade de Rio de Janeiro, e ilustrada na Figura 5.1.



Figura 5.1: Paróquia Santos Anjos

A Figura 5.2 apresenta a planta baixa do interior da paróquia, destacando em vermelho as quatro caixas de som instaladas e usadas como fontes sonoras, e em azul o ponto no qual foram realizadas as medições com o protótipo e com o sonômetro CESVA SC420.

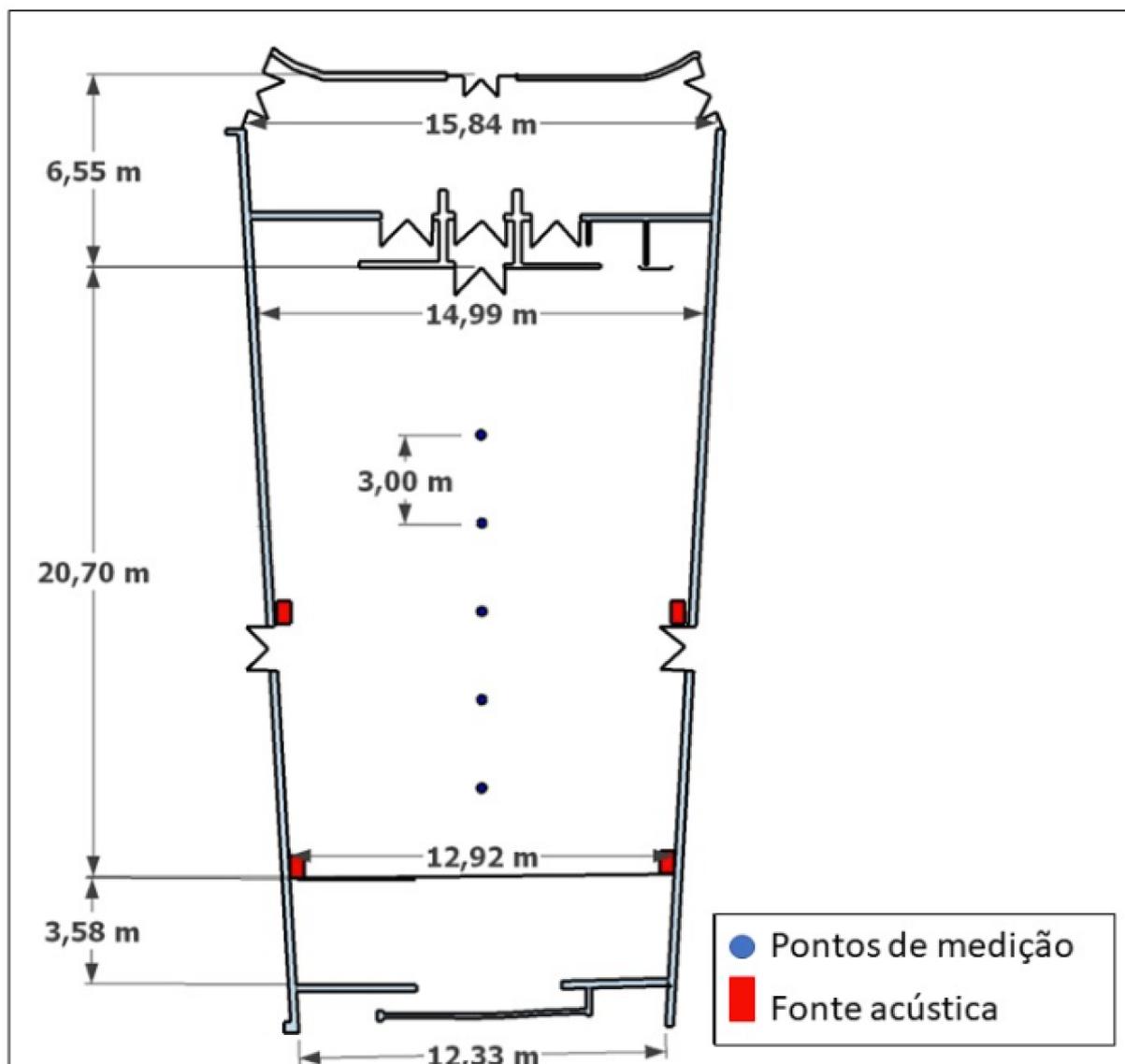


Figura 5.2: Planta da Paróquia Santos Anjos e localização das fontes sonoras (retângulos vermelhos) e do ponto de medição (círculo azul).

A figura 5.3 apresenta imagens interior da paróquia, com os equipamentos de medição posicionados simultaneamente no ponto de medição indicado na Figura 5.2.

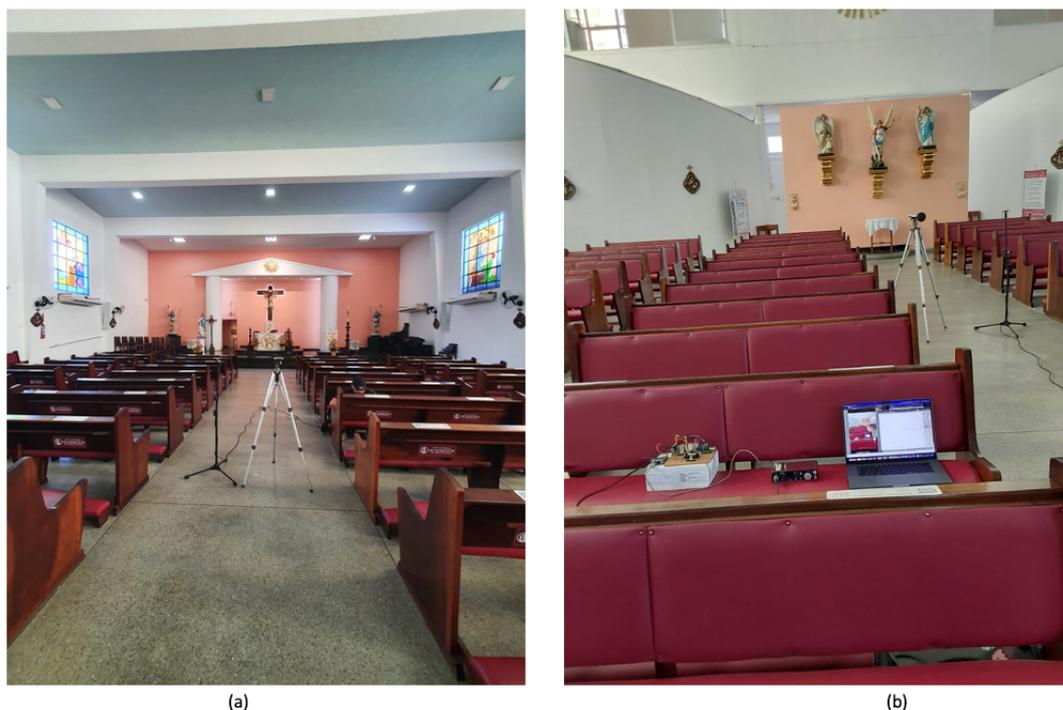


Figura 5.3: Montagem sonômetro CESVA SC420 e microfone dbx RTA-M do sonômetro de baixo custo desenvolvido. (a) Vista Posterior (b) Vista frontal.

5.2 Medições de Tons Puros

Utilizou-se o sistema de áudio da paróquia para gerar tons puros correspondentes aos centros das diversas bandas de 1/3 de oitava, medindo-se os correspondentes espectros com o sonômetro comercial CESVA SC420 e com o protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação.

Assim, as Figuras 5.4 a 5.28 apresentam as comparações entre os espectros de banda de 1/3 de oitava medidos pelo sonômetro CESVA SC420 e pelo módulo JAPA do protótipo de sonômetro desenvolvido, para as diversas medições envolvendo tons puros de 63 Hz a 16 kHz, respectivamente.

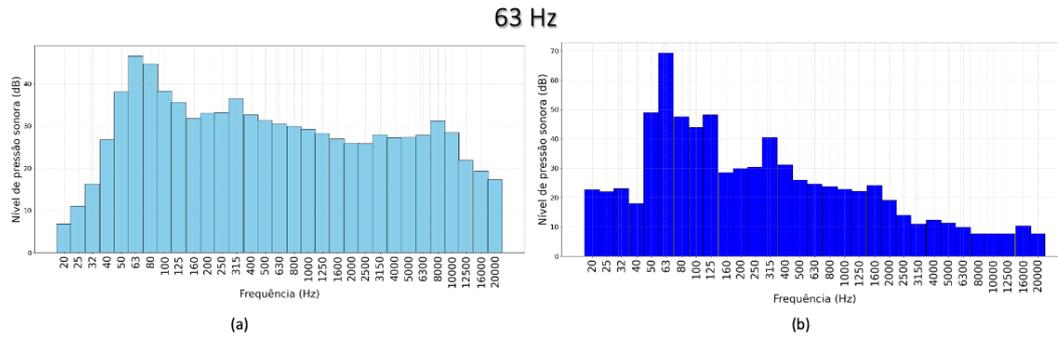


Figura 5.4: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 63 Hz.

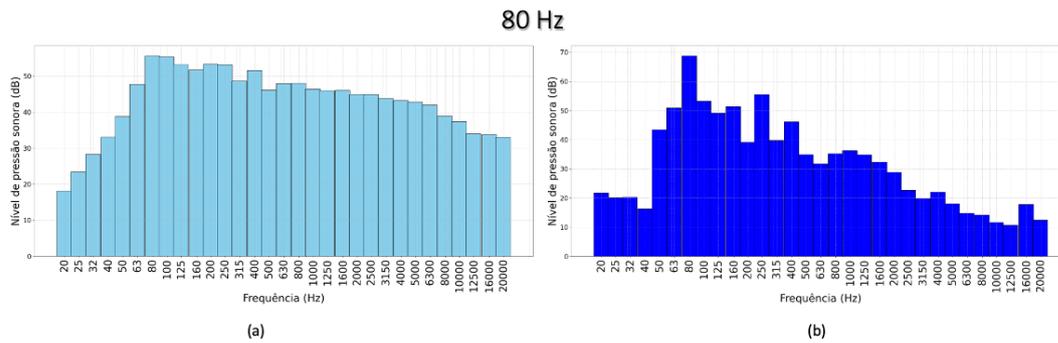


Figura 5.5: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 80 Hz.

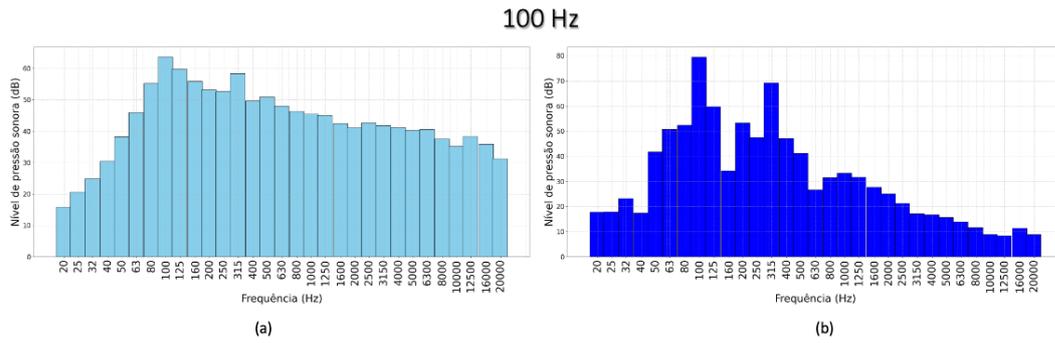


Figura 5.6: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 100 Hz.

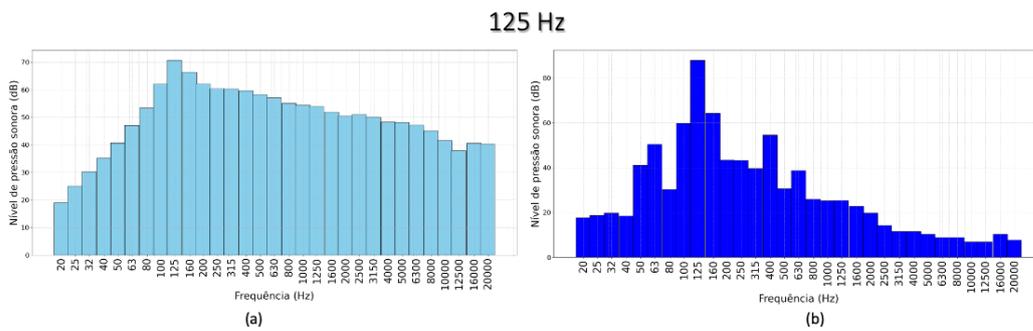


Figura 5.7: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 125 Hz.

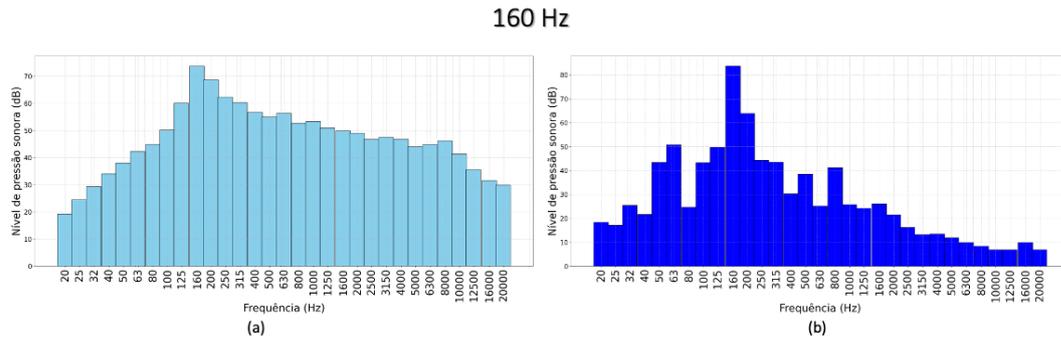


Figura 5.8: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 160 Hz.

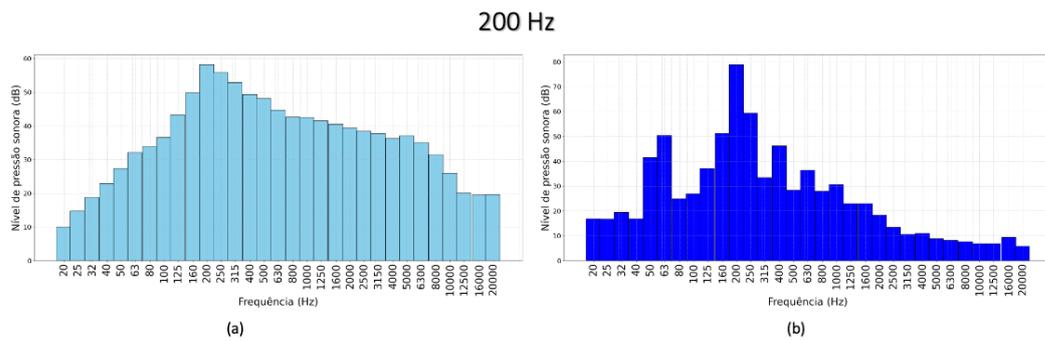


Figura 5.9: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 200 Hz.

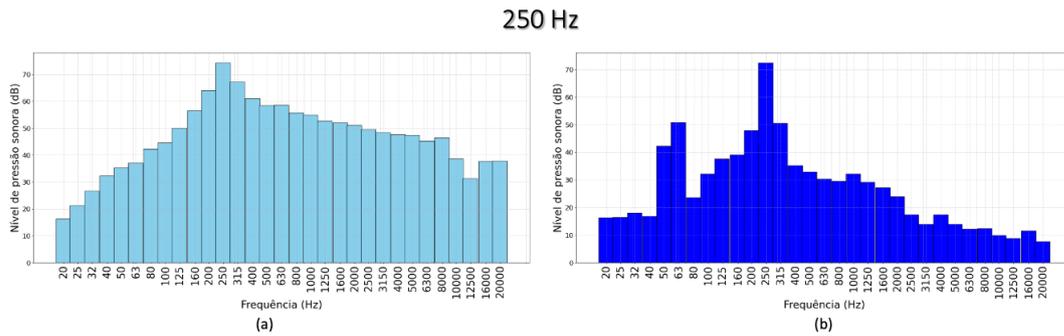


Figura 5.10: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 250 Hz.

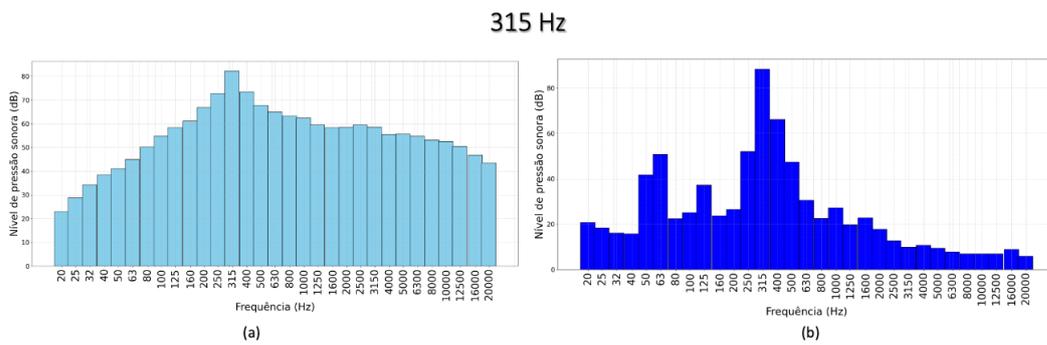


Figura 5.11: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 315 Hz.

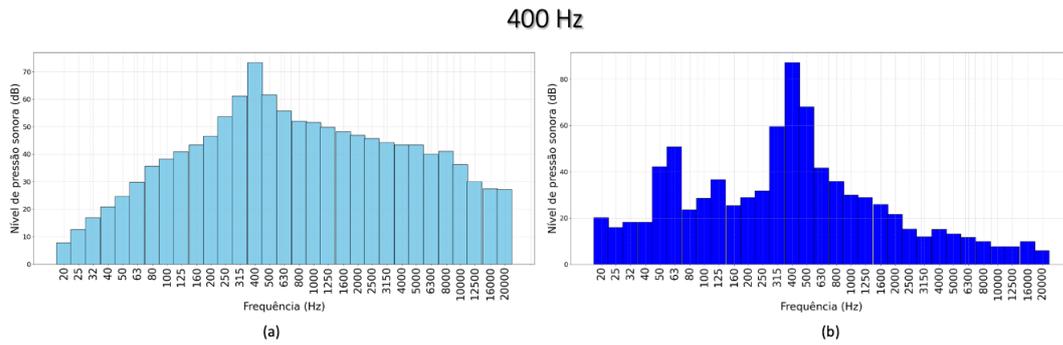


Figura 5.12: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 400 Hz.

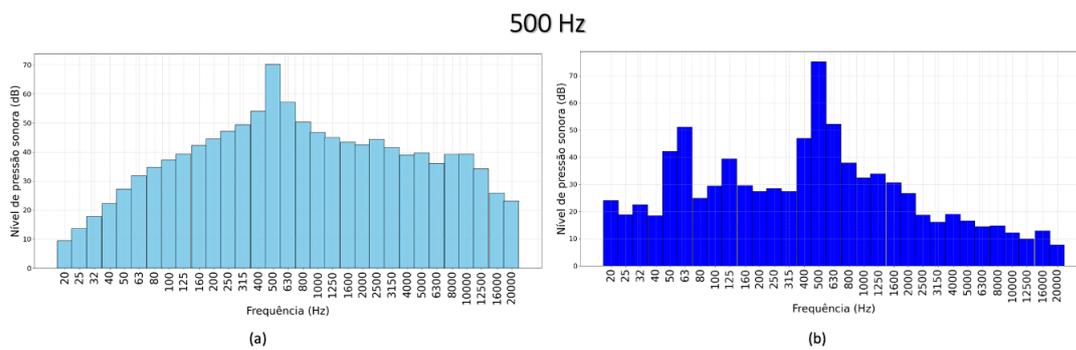


Figura 5.13: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 500 Hz.

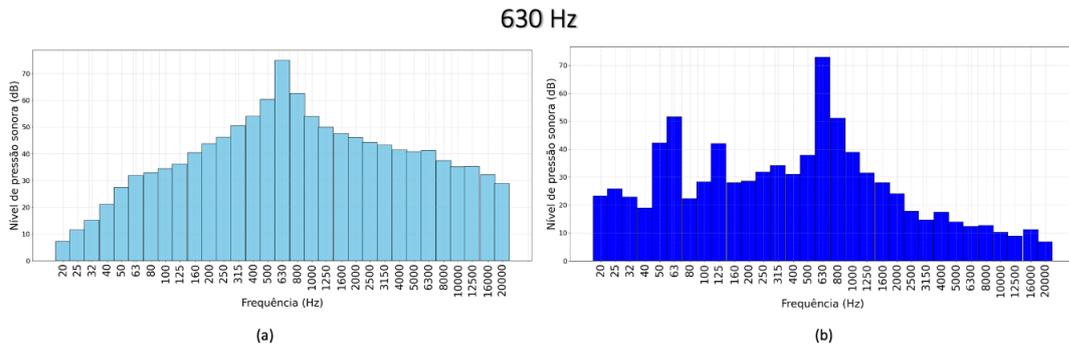


Figura 5.14: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 630 Hz.

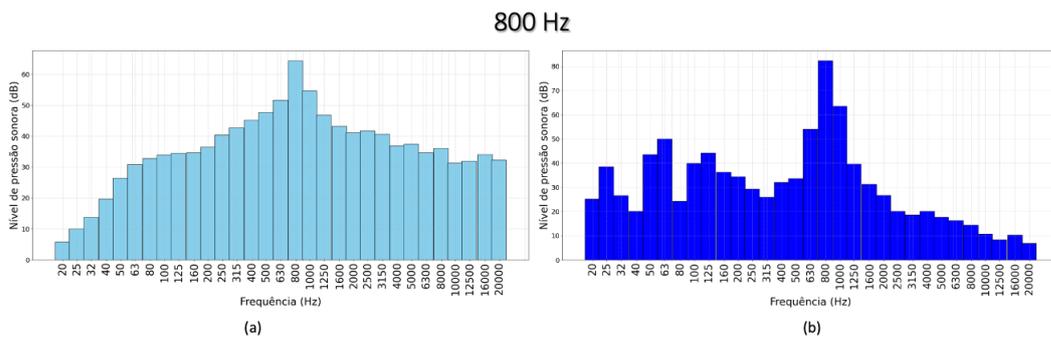


Figura 5.15: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 800 Hz.

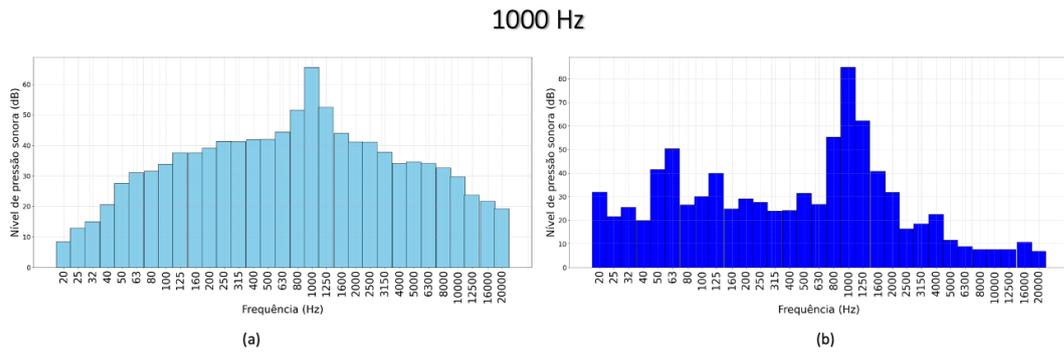


Figura 5.16: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 1000 Hz.

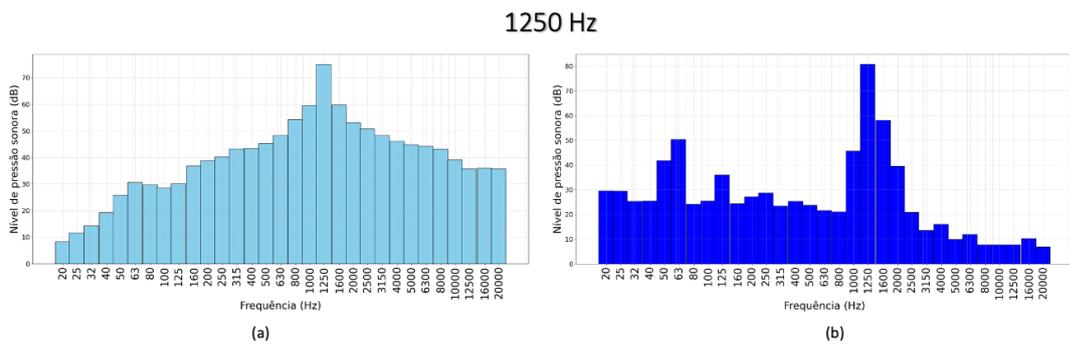


Figura 5.17: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 1250 Hz.

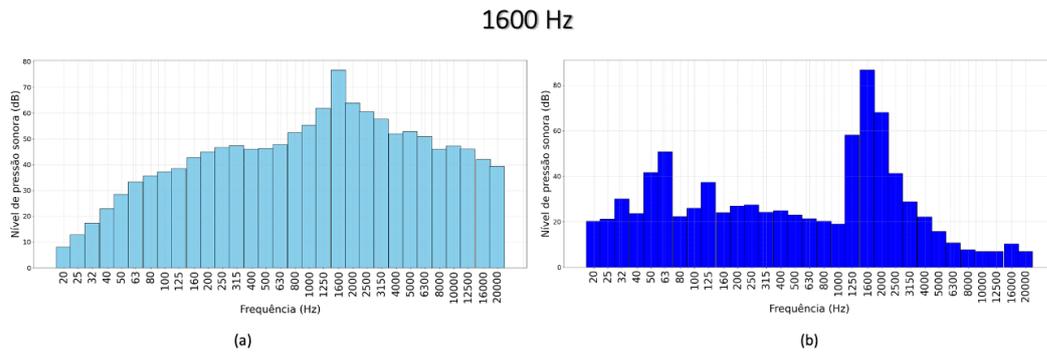


Figura 5.18: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 1600 Hz.

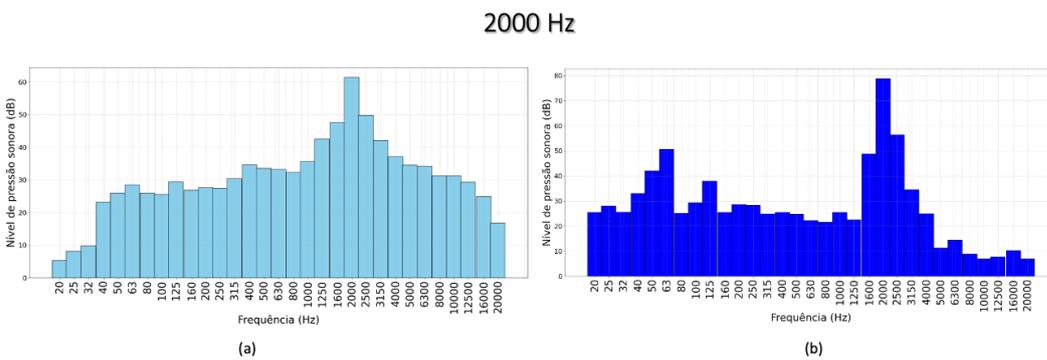


Figura 5.19: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 2000 Hz.

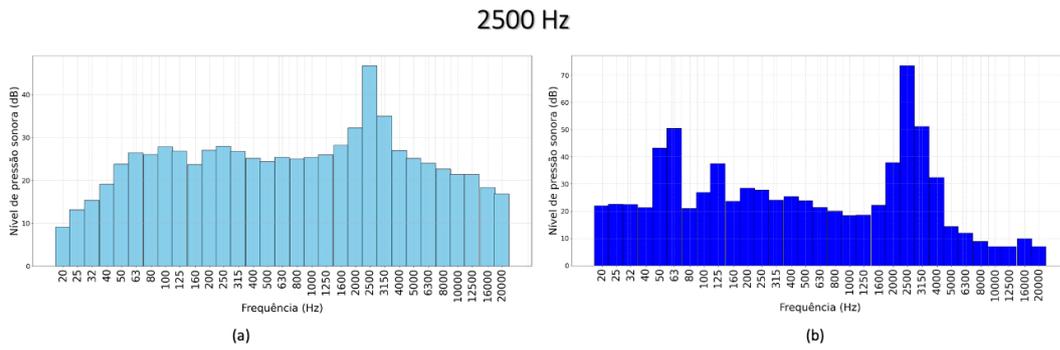


Figura 5.20: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 2500 Hz.

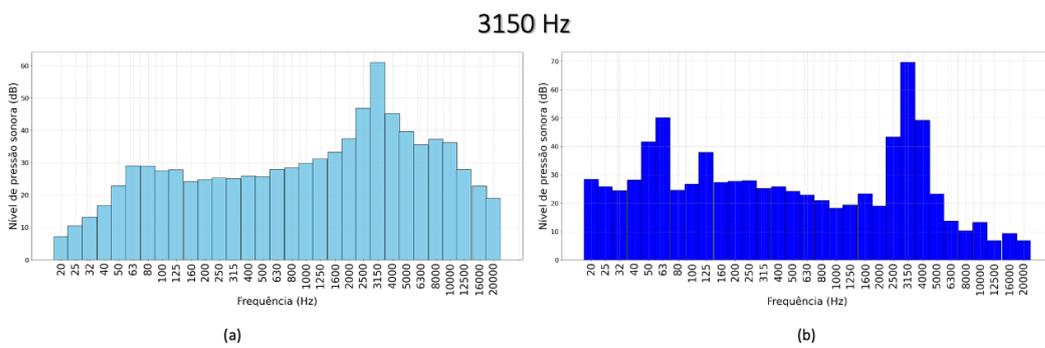


Figura 5.21: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 3150 Hz.

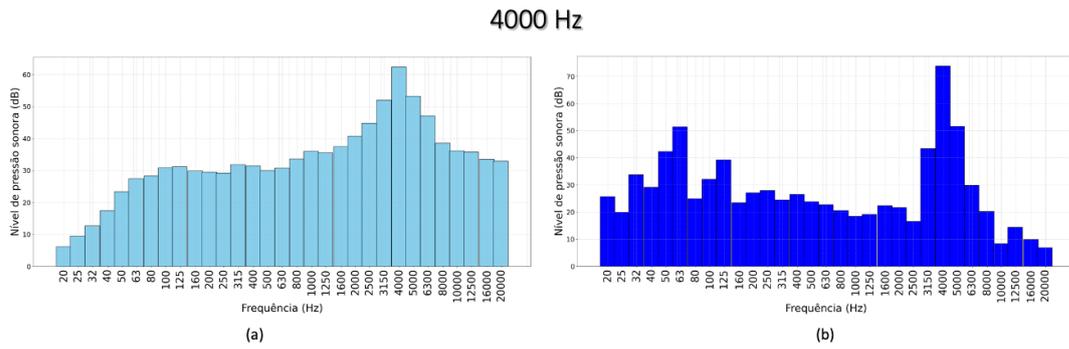


Figura 5.22: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 4000 Hz.

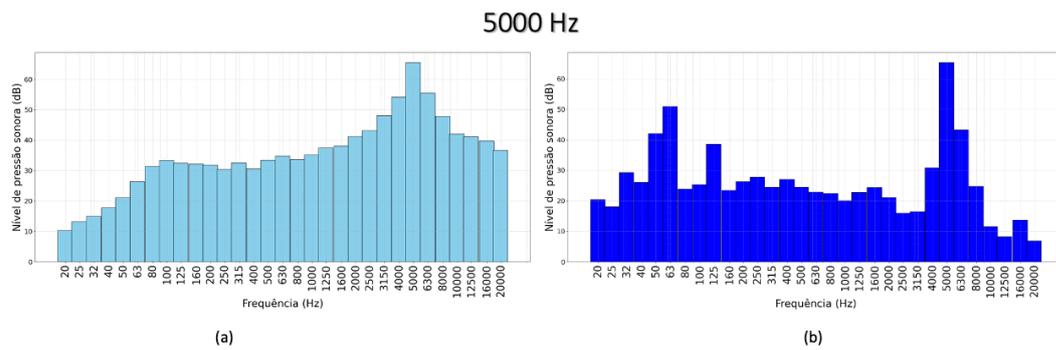


Figura 5.23: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 5000 Hz.

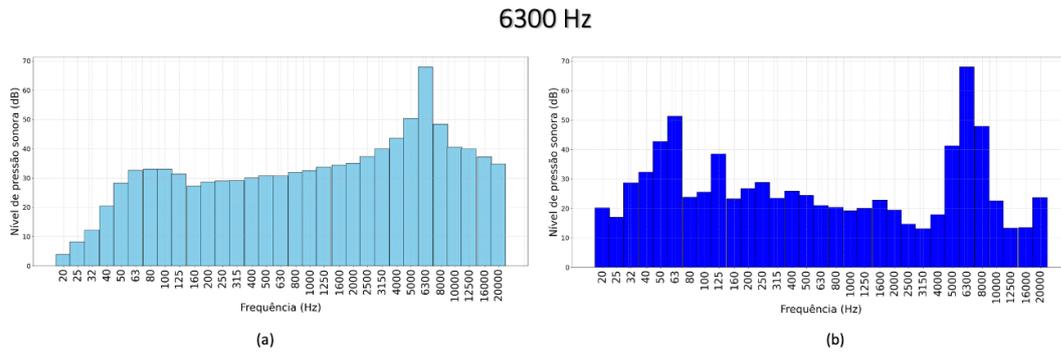


Figura 5.24: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 6300 Hz.

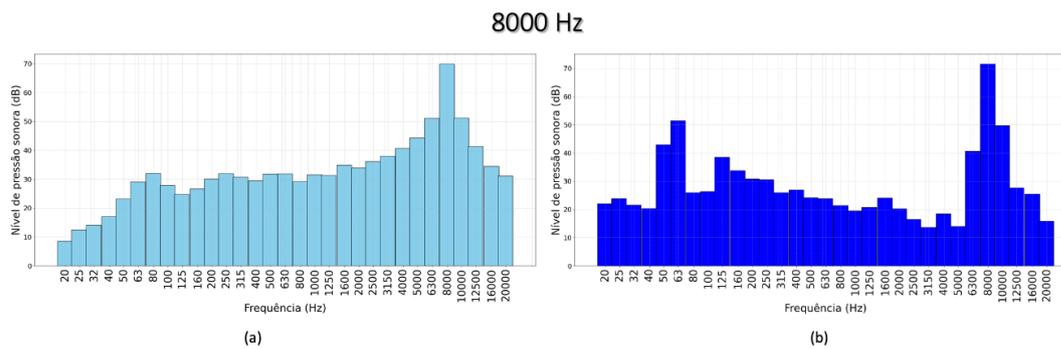


Figura 5.25: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 8000 Hz.

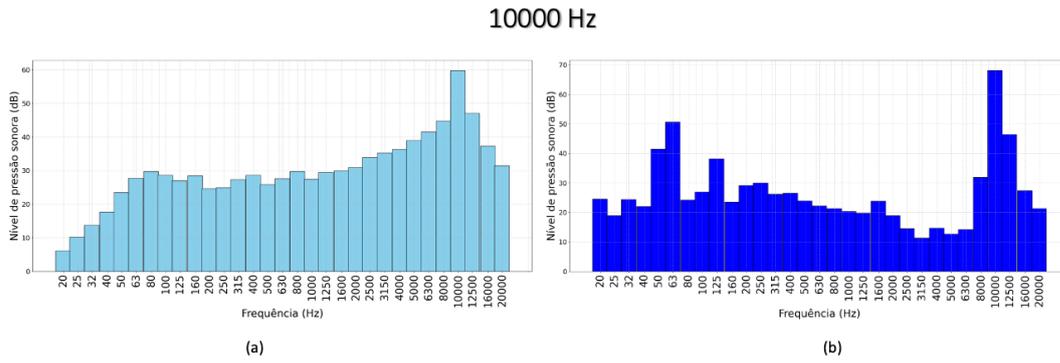


Figura 5.26: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 10000 Hz.

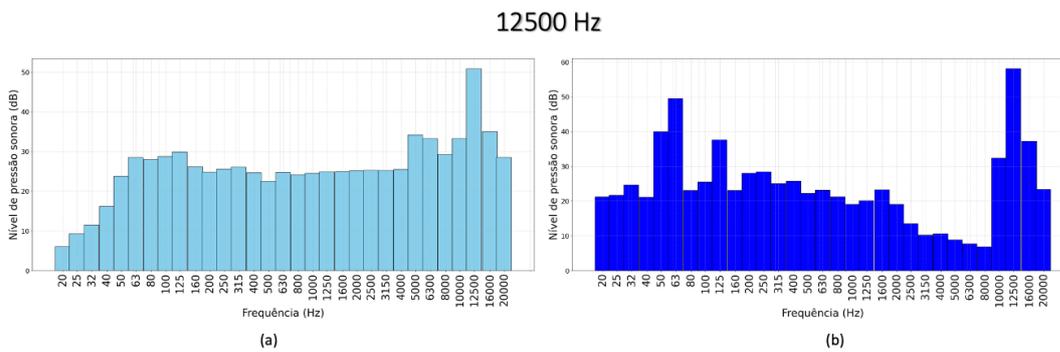


Figura 5.27: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 12500 Hz.

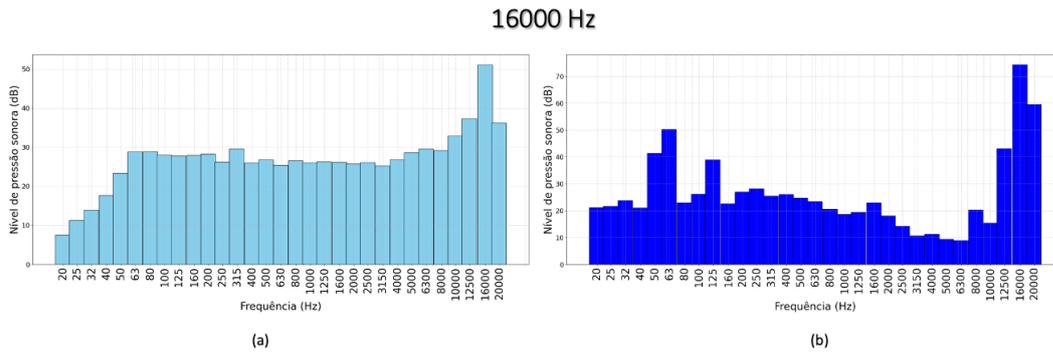


Figura 5.28: Comparação entre os espectros de frequência de banda de 1/3 de oitava medidos pelo (a) protótipo de sonômetro desenvolvido nesta dissertação e (b) sonômetro comercial CESVA SC420 para a medição de um tom puro de 16000 Hz.

Segundo os resultados obtidos acima, poderia-se afirmar que o comportamento geral entre os resultados tende a ser bastante próximo uma vez que o protótipo de sonômetro desenvolvido neste trabalho (mesmo com todas suas limitações de recursos) consegue registrar o valor máximo (ou pico) na mesma ordem de grandeza do valor registrado pelo sonômetro comercial CESVA SC420 para cada frequência de análise.

Complementando, a Tabela 5.1 apresenta os níveis em dB dos valores mais altos obtidos por ambos os sistemas de medição para os diversos tons puros emitidos pelo sistema de áudio da paróquia.

Tabela 5.1: Níveis obtidos nas frequências de interesse.

Frequência de interesse (Hz)	Protótipo Sonômetro (dB)	Sonômetro Cesva (dB)
63	46,03	69,4
80	55,60	68,8
100	63,64	79,5
125	70,77	87,9
160	73,76	83,8
200	58,22	78,9
250	74,36	78,9
315	82,30	88,4
400	73,40	87,3
500	70,26	75,2
630	75,08	73
800	64,43	82,4
1000	65,65	85
1250	75,11	80,8
1600	76,76	58,1
2000	61,43	78,8
2500	46,77	73,6
3150	61,09	69,8
4000	62,45	73,9
5000	65,52	65,4
6300	68,00	68,1
8000	69,89	71,6
10000	59,83	68,2
12500	50,91	58,2
16000	51,18	74,4

Os resultados da Tabela 5.1, evidenciam que a medida que aumenta a frequência de interesse, a diferença entre o valor máximo (ou pico) entre os resultados registrados pelo protótipo de sonômetro e pelo sonômetro comercial CESVA SC420 são cada vez menores, podendo-se afirmar que poderiam se obter resultados mais próximos para frequências mais altas de análise.

Pode se afirmar também que a precisão dos resultados registrados pelo protótipo de sonômetro desenvolvido neste trabalho podem estar sendo afeta-

dos pelos seguintes motivos:

- A distorção harmônica do microfone tem aumentado com o tempo pelo uso constante do mesmo
- A interface de áudio Focusrite 2i2 utilizada é da primeira geração desde modelo. O constante uso também é um indicador de que sua relação sinal-ruído tem sido reduzida. Da mesma maneira, este modelo é o único que não conta com driver nativo para Linux e a sobrescrita de um driver de outra geração pode não fornecer a performance esperada.
- A Orange Pi PC Plus é uma sbc de propósito geral sem maiores otimizações e recursos para captura e processamento de audio.

6

Conclusões e Recomendações

Esta pesquisa de mestrado concebeu, desenvolveu e avaliou o desempenho de um protótipo de um sonômetro de baixo custo. O sistema de medição integra um hardware comercial sobre um sistema Linux embarcado para captura, amplificação, processamento dos dados medidos e tratamento do sinal de áudio, permitindo a visualização do sinal acústico.

Conforme comprovado por diferentes ensaios de intercomparação realizados com um sonômetro comercial calibrado por laboratório acreditado para realizar medições acústicas (CESVA SC420, utilizado como referência), o protótipo do sonômetro de baixo custo concebido foi validado para diferentes frequências de interesse, típicas de situações ambientais reais, nas faixa de 63 Hz a 16.000 Hz, comprovando resultados promissores (Tabela 5.1).

No que concerne o sistema integrado concebido, este comprovou ser capaz de realizar medições de formas de onda capturadas de uma fonte de microfone por meio de um servidor de áudio jack, operado por sistema Linux *open-source* embarcado, oferecendo uma aplicação desktop para monitoramento e visualização dos sinais acústicos medidos.

Recomendações para desdobramento do trabalho

Embora o objetivo de oferecer um sonômetro de baixo custo tenha sido cumprido e o protótipo validado contra referências confiáveis e rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidades (SI), melhorias são factíveis de implementação, dentre as quais destacam-se:

- mitigar vulnerabilidades associadas ao sistema operacional do protótipo de sonômetro visando agregar segurança contra ataques maliciosos já que o diretório `.git` exposto na pasta do protótipo (diretório de usuário do sistema) é suscetível de comprometer a confidencialidade dos dados da aplicação;
- reduzir limitações associadas à aplicação desktop para leitura dos dados do sonômetro a partir de arquivos de texto plano, o que compromete a representação gráfica em bandas de 1/3 de oitava quando os filtros de ponderação A e C dos sinais medidos são aplicados;

- implementar funcionalidades para realizar a representação em bandas de oitava, funcionalidades de exportação e compartilhamento de dados, assim como a integração com plataformas na nuvem;
- explorar alternativas para substituir a sbc Orange Pi PC Plus, já que este é um hardware comercial de propósito geral, não recomendável para viabilizar a produção comercial do sonômetro de baixo custo, assim tornando-o mais disponível para potenciais fabricantes e/ou fornecedores do protótipo no mercado nacional. Para superar essa dificuldade, recomenda-se desenvolver um hardware próprio baseado no processador ARM Cortex A7, assim permitindo otimizar o projeto construtivo do sonômetro de baixo custo concebido.
- investigar alternativas de otimizar o desempenho do atual protótipo evocando uma aplicação que seja capaz de integrar ("*add-ons*") os executáveis dos módulos JAAA e JAPA. Este aprimoramento poderá introduzir ganhos de desempenho no atual protótipo do sonômetro que, em sua configuração atual executa o servidor de áudio Jack e os módulos JAAA e JAPA de forma independente, por meio de um *bash script* que é ejecutado por um serviço na inicialização do sistema operacional;
- contornar a limitação do atual aplicativo desktop que, embora ofereça a vantagem de operar em multi-plataforma, ou seja, é possível instalá-lo em sistemas Mac OS, Windows e Linux, limita-se a possuir um computador. A eliminação desta limitação tornará o sistema em um aplicativo web e/ou móvel, mais acessível e mais prático para trabalhos de campo.

Em síntese, para viabilizar a comercialização do protótipo desenvolvido em um produto de mercado, as seguintes ações são recomendadas: (i) superar vulnerabilidades da plataforma computacional utilizada para desenvolver o protótipo; (ii) implementar novas funcionalidades na aplicação desktop; (iii) realizar novas rodadas de qualificação e de validação referenciadas a fontes-padrão de sinal acústico; (iv) realizar novas rodas em ambientes industriais expostas a fontes estáveis e contínuas de ruído acústico, e (v) desenvolver um projeto de *design* de produto, visando transformar a atual versão do protótipo preliminar do instrumento de medição ainda em placa de desenvolvimento para torná-lo um produto comercializável capaz de concorrer com alternativas disponíveis no competitivo mercado de instrumentos de medição acústica.

Referências bibliográficas

- [1] PELLERIN T, D.; VINOIS. J.; RUBIO, E.; FERNANDES S. **Making the energy transition a european success.** American Journal of Physics, 114:104, 2017.
- [2] BUCK M.; GRAF. A.; GRAICHEN, P. **European energy transition 2030: The big picture.** American Journal of Physics, 153:228, 2019.
- [3] PIANA A.; ROOZEN. N. **On the control of low-frequency audible noise from electrical substations: A case study.** Applied Science, 10:20, 2020.
- [4] FROTA, M.; REGAZZI. R.; CUNHA, B.; MIRANDA. H.; HALL. C. R. ALVARENGA. J.; BRAGANTINE. S. **Monitoramento da operação, finalização e emissão de laudos.** Relatório Técnico 1, 95p., PUC-Rio, 2020.
- [5] BARRON, R. F. **Industrial Noise Control and Acoustics.** Taylor & Francis, Louisiana, 2nd edition, 2003.
- [6] FROTA, M.; REGAZZI. R.; CUNHA, B.; MIRANDA. H.; HALL. C. R. ALVARENGA. J.; BRAGANTINE. S. **Vigilância do nível de pressão sonora.** Relatório Técnico 1, 95p., PUC-Rio, 2019.
- [7] ABNT NBR 10151:. **Acústica – medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – aplicação de uso geral.** Standard 1, 95p., Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.
- [8] ABNT NBR 10152:. **Acústica – níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações.** Standard 1, 95p., Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.
- [9] FROTA, M.; REGAZZI. R.; CUNHA, B.; MIRANDA. H.; HALL. C. R. ALVARENGA. J.; BRAGANTINE. S. **Mascaramento do ruído acústico tonal.** Relatório Técnico 1, 31p., PUC-Rio, 2019.
- [10] FROTA, M.; REGAZZI. R.; CUNHA, B.; MIRANDA. H.; HALL. C. R. ALVARENGA. J.; BRAGANTINE. S. **Atenuação do nível de pressão**

- sonora (projeto acústico do sistema de atenuação de ruído e definição do modelo de instalação). Relatório Técnico 1, 16p., PUC-Rio, 2020.
- [11] FROTA, M.; REGAZZI, R.; CUNHA, B.; MIRANDA, H.; HALL, C. R. ALVARENGA, J.; BRAGANTINE, S. **Fabricação de atenuadores de pressão sonora**). Relatório Técnico 1, 16p., PUC-Rio, 2020.
- [12] FROTA, M.; REGAZZI, R.; CUNHA, B.; MIRANDA, H.; HALL, C. R. ALVARENGA, J.; BRAGANTINE, S. **Instalação da solução proposta e medições**. Relatório Técnico 1, 16p., PUC-Rio, 2020.
- [13] BIES, D. A.; HANSEN, C.; HOWARD, C. **Engineering Noise Control**. Taylor & Francis, New York, 5th edition, 2017.
- [18] VÉR I. L.; BERANEK, L. L. **Noise and Vibration Control Engineering**. John Wiley & Sons, INC., New Jersey, 2nd edition, 2006.
- [19] BERANEK, L. L. **Acoustics**. AMERICA, A. S. O., New York, 2nd edition, 1993.
- [20] DAVIS, G. **The Sound Reinforcement Handbook**. Hal Leonard, Milwaukee, 2nd edition, 1989.
- [21] RUSELL, D, **Longitudinal and Transverse Wave Motion**. 2016. Disponível em: <<https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>>. Acesso: 2022/09/28.
- [22] JIMENEZ, N, **Wave simulations**. 2023. Disponível em: <https://nojigon.webs.upv.es/simulations_waves.php>. Acesso: 2022/09/28.
- [23] BELTRÁN, J.; PORCUNA V.; ORÚS D. **Libro virtual de formación en Otorrinolaringología SEORL**. Sociedad española de otorrinolaringología y patología cérvico-facial, Barcelona, 1st edition, 2014.
- [24] LAGOS, A.; WINTER M.; THÖNE N.; JOFRÉ D.; GONZÁLEZ C. **Otorrinolaringología para médicos generales**. Pontificia Universidad Católica de Chile: Departamento de Otorrinolaringología, Santiago, 1st edition, 2020.
- [25] CARRIÓN, A. I. **Diseño acústico de espacios arquitectónicos**. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, Barcelona, 1st edition, 1998.

- [26] IEC 61672-1.: **Eletoacustics – sound level meters - part 1: Specifications**. Standard 1, 51p., International Electrotechnical Commission, 2002.
- [27] IEC 61672-1.: **Eletoacustics – sound level meters - part 3: Periodic tests**. Standard 1, 51p., International Electrotechnical Commission, 2013.
- [28] BENAVIDES, M. B. P. **Diseñar y construir un prototipo de sonómetro digital con ponderación de frecuencia A**, 2018.
- [29] CESVA SC420. Disponível em: <<https://www.cesva.com/pt/produtos/sonometros/sc420/>>. Acesso: 2023/07/07.
- [30] IEC 61260-1.: **Electroacoustics – octave-band and fractional-octave-band filters - part 1: Specifications**. Standard 1, 88p., International Electrotechnical Commission, 2014.
- [31] IEC 61260-3.: **Electroacoustics – octave-band and fractional-octave-band filters - part 3: Periodic tests**. Standard 1, 19p., International Electrotechnical Commission, 2016.
- [32] CESVA CESVA Lab. Disponível em: <<https://www.cesva.com/pt/produtos/software-para-pc/cesva-lab/>>. Acesso: 2023/07/07.
- [33] GOKULKUMAR S.; PR THYLA L.; SATHISH S.. **Measuring methods of acoustic properties and influence of physical parameters on natural fibers: A review**. Journal of Natural Fibers, 17:21, 2019.
- [34] ISO 1996-1.: **Acoustic – description, measurement and assessment of environmental noise - part 1: Basic quantities and assessment procedures**. Standard 1, 54p., International Organization for Standardization, 2016.
- [35] ISO 1996-2.: **Acoustic – description, measurement and assessment of environmental noise - part 2: Determination of sound pressure levels**. Standard 1, 68p., International Organization for Standardization, 2017.
- [37] ABNT NBR 16313.: **Acústica – terminologia**. Standard 1, 54p., Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- [38] ABNT NBR 61672-1.: **Eletoacústica – sonômetros - parte 1: Especificações**. Standard 1, 51p., Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

- [39] ABNT NBR 61672-3: **Eletroacústica – sonômetros - parte 3: Testes periódicos**. Standard 1, 17p., Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.
- [40] ABNT NBR 61260-3: **Eletroacústica – filtros de banda de oitava e fração de oitava - parte 3: Testes periódicos**. Standard 1, 19p., Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.
- [41] **RTA-M product description**. Disponível em: <<https://dbxpro.com/en/products/rta-m>>. Acesso: 2023/06/28.
- [42] **Focusrite 2i2 product description**. Disponível em: <<https://focusrite.com/products/scarlett-2i2>>. Acesso: 2023/06/28.
- [43] **Orange Pi PC Plus product description**. Disponível em: <<http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/Orange-Pi-PC-Plus.html>>. Acesso: 2023/06/28.
- [44] **bootlin embedded linux and kernel engineering**. Disponível em: <<https://bootlin.com/doc/training/embedded-linux/>>. Acesso: 2023/07/09.
- [45] WHITE, E.. **Making Embedded Systems**. O'REILLY, Sebastopol, Califórnia, EUA, 1st edition, 2011.
- [46] **Linux on Mars helicopter leveraged linux to accomplish their mission presentation from tim canham (jpl, nasa)**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=0_GfMcBmbCg&t=111s>. Acesso: 2023/07/09.
- [47] YAGHMOUR, K.; MASTERS, J.; BEN-YOSEFF, G.; GERUM, P.. **Building Embedded Linux Systems: Concepts, Techniques, Tricks & Traps**. O'REILLY, Sebastopol, Califórnia, EUA, 2nd edition, 2008.
- [48] **ARM cortex-a7 floating-point unit technical reference manual**. Disponível em: <<https://developer.arm.com/documentation/ddi0463/f/?lang=en>>. Acesso: 2023/07/04.
- [49] **Debian Sound**. Disponível em: <<https://wiki.debian.org/Sound?action=show&redirect=CategorySound>>. Acesso: 2023/07/04.
- [50] SPÄTH, P.. **Audio Visualization Using ThMAD**. Apress, New York, NY 10004-1562, 1st edition, 1998.

- [51] **FFADO** Free Firewire Audio for Linux. Disponível em:. <<http://www.ffado.org/>>. Acesso: 2023/07/07.
- [52] **OSS** Open Sound System for Linux x86/AMD64. Disponível em:. <<http://www.opensound.com/linux.html>>. Acesso: 2023/07/07.
- [53] **Arch Linux** Open Sound System. Disponível em:. <https://wiki.archlinux.org/title/Open_Sound_System>. Acesso: 2023/07/07.
- [54] **ALSA** Advanced Linux Sound Architecture project homepage. Disponível em:. <https://www.alsa-project.org/wiki/Main_Page>. Acesso: 2023/07/07.
- [55] **Arch Linux** Advanced Linux Sound Architecture . Disponível em:. <https://wiki.archlinux.org/title/Advanced_Linux_Sound_Architecture>. Acesso: 2023/07/07.
- [56] **The Linux Kernel** Sound Subsystem Documentation . Disponível em:. <<https://docs.kernel.org/sound/index.html>>. Acesso: 2023/07/07.
- [57] **JACK** Audio Connection Kit . Disponível em:. <<https://jackaudio.org/>>. Acesso: 2023/07/07.
- [58] **JACK** Audio Connection Kit API . Disponível em:. <<https://jackaudio.org/api/index.html>>. Acesso: 2023/07/07.
- [59] **JACK** Official Repository . Disponível em:. <<https://github.com/jackaudio>>. Acesso: 2023/07/07.
- [60] **Pulse Audio** Official Site . Disponível em:. <<https://www.freedesktop.org/wiki/Software/PulseAudio/>>. Acesso: 2023/07/07.
- [61] **Pulse Audio** API . Disponível em:. <<https://freedesktop.org/software/pulseaudio/doxygen/>>. Acesso: 2023/07/07.
- [62] EVEREST, A.; POLHMANN K.. **Master handbook of acoustics**. Mc Graw Hill, New York, 7th edition, 2021.
- [63] BOULANGER, R.; LAZZARINI V.. **The audio programming book**. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1st edition, 2010.
- [64] **Armbian orange pi pc plus so**. Disponível em:. <<https://www.armbian.com/orange-pi-pc-plus/>>. Acesso: 2023/07/04.

- [65] **Balena Etcher official site.** Disponível em: <<https://etcher.balena.io/>>. Acesso: 2023/07/04.
- [66] **Armbian Documentation official site.** Disponível em: <https://docs.armbian.com/User-Guide_Getting-Started/#how-to-prepare-a-sd-card>. Acesso: 2023/07/04.
- [68] **Arch Linux network manager.** Disponível em: <<https://wiki.archlinux.org/title/NetworkManager>>. Acesso: 2023/07/04.
- [69] **Debian network manager.** Disponível em: <<https://wiki.debian.org/NetworkManager>>. Acesso: 2023/07/04.
- [70] **Arch Linux x11 vnc.** Disponível em: <<https://wiki.archlinux.org/title/x11vnc>>. Acesso: 2023/07/04.
- [71] **Real vnc official site.** Disponível em: <<https://www.realvnc.com/es/connect/download/viewer/linux/>>. Acesso: 2023/07/04.
- [72] **QjackCtl Jack Audio Connection Kit - Qt GUI Interface .** Disponível em: <<https://qjackctl.sourceforge.io/qjackctl-index.html#Intro>>. Acesso: 2023/07/08.
- [73] **Qt Qt Documentation .** Disponível em: <<https://doc.qt.io/>>. Acesso: 2023/07/09.
- [74] **JACK How to use PulseAudio and Jack .** Disponível em: <https://jackaudio.org/faq/pulseaudio_and_jack.html>. Acesso: 2023/07/09.
- [75] **JACK WalkThrough User PulseOnJack .** Disponível em: <https://github.com/jackaudio/jackaudio.github.com/wiki/WalkThrough_User_PulseOnJack>. Acesso: 2023/07/09.
- [76] **JACK Make JACK Work With PulseAudio .** Disponível em: <<https://github.com/brummer10/pajackconnect>>. Acesso: 2023/07/09.
- [77] **JAAA JACK and ALSA Audio Analyser .** Disponível em: <<http://kokkinizita.linuxaudio.org/linuxaudio/index.html>>. Acesso: 2023/07/12.
- [78] **JAAA Papers and technotes .** Disponível em: <<http://kokkinizita.linuxaudio.org/papers/index.html>>. Acesso: 2023/07/12.

- [79] **JAAA Audio Measurements using JAAA** . Disponível em: <<http://kokkinizita.linuxaudio.org/papers/jaaa-pres.pdf>>. Acesso: 2023/07/12.
- [80] **WATKINSON, J.. The art of digital audio.** Elseiver, Cambridge, Massachusetts, 3rd edition, 2001.
- [81] **Node.js Guides.** Disponível em: <<https://nodejs.org/en/docs/guides>>. Acesso: 2023/06/30.
- [82] **Ryan Dahl Github repository.** Disponível em: <<https://github.com/ry>>. Acesso: 2023/06/29.
- [83] **V8 Google engine.** Disponível em: <<https://v8.dev/>>. Acesso: 2023/06/29.
- [84] **libuv libuv library site.** Disponível em: <<https://libuv.org/>>. Acesso: 2023/07/02.
- [85] **Node.js Event Loop.** Disponível em: <<https://nodejs.org/es/docs/guides/event-loop-timers-and-nexttick>>. Acesso: 2023/07/02.
- [86] **Nvm NVM repository.** Disponível em: <<https://github.com/nvm-sh/nvm>>. Acesso: 2023/07/02.
- [87] **Npm Node Package Manager Official Documentation.** Disponível em: <<https://docs.npmjs.com/about-npm/>>. Acesso: 2023/07/02.
- [88] **Yarn Yarn Package Manager Official site.** Disponível em: <<https://www.npmjs.com/>>. Acesso: 2023/07/02.
- [89] **GRIFFITH, C.; WELLS L.. Electron: From Beginner to Pro. Learn to Build Cross Platform Desktop Applications from GitHub's Electron.** Apress, New York, NY 10004-1562, 1st edition, 2017.
- [90] **Cheng Zhao Electron Official Repository.** Disponível em: <<https://github.com/electron/electron>>. Acesso: 2023/07/02.
- [91] **Atom Official Repository.** Disponível em: <<https://github.com/atom>>. Acesso: 2023/07/02.
- [92] **Visual Studio Code Official Site.** Disponível em: <<https://code.visualstudio.com/>>. Acesso: 2023/07/02.

- [93] **Electron Showcase.** Disponível em: <<https://www.electronjs.org/apps>>. Acesso: 2023/07/03.
- [94] **Electron Process Model.** Disponível em: <<https://www.electronjs.org/docs/latest/tutorial/process-model>>. Acesso: 2023/07/03.
- [95] **React Official Page.** Disponível em: <<https://react.dev/>>. Acesso: 2023/07/03.
- [96] **Patterns Rendering Patterns.** Disponível em: <<https://www.patterns.dev/posts/rendering-patterns>>. Acesso: 2023/07/03.
- [97] **Python Official Site.** Disponível em: <<https://www.python.org/>>. Acesso: 2023/07/13.
- [98] **Python The Python Language Reference.** Disponível em: <<https://docs.python.org/3.10/reference/index.html>>. Acesso: 2023/07/13.
- [99] DEITEL, P.; DEITEL, H. **Intro to Python for Computer Science and Data Science.** Pearson & Deitel, New York, 5th edition, 2020.
- [100] **Pip The PyPA recommended tool for installing Python packages..** Disponível em: <<https://pypi.org/project/pip/>>. Acesso: 2023/07/13.
- [101] **PyPI Python Package Index..** Disponível em: <<https://pypi.org/>>. Acesso: 2023/07/13.
- [102] **Pip Pip Development Documentation..** Disponível em: <<https://pip.pypa.io/en/latest/development/>>. Acesso: 2023/07/13.
- [103] **Pip Pip Official Repository..** Disponível em: <<https://github.com/pypa/pip>>. Acesso: 2023/07/13.

A

Artigos Publicados

Esta dissertação de mestrado rendeu as seguintes publicações que servem como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio.

A.1

Artigo publicado em revista científica

A campanha de medições realizada neste trabalho rendeu uma publicação na revista "*Measurement: Sensors*" do artigo "*Experimental study of the noise generated by urban high-voltage electrical substations*". Juan José Gómez Acosta, *Maurício N. Frota, Carlos R. Hall Barbosa and Thiago D'Angelo Oliveira, Experimental Study of the noise generated by urban high-voltage electrical substations,

A.2

Artigo submetido para congresso internacional

O protótipo de sonômetro de baixo custo desenvolvido em esta dissertação de mestrado rendeu uma publicação para o Congresso Mundial de Metrologia 2024; "*Development of a low-cost sound level meter: advances and experimental evidence of promising prospects*". Juan José Gómez Acosta, Maurício Nogueira Frota and *Carlos Roberto Hall Barbosa, aceito para apresentação no "2024 World Metrology Congress", Hamburg/Germany, Aug/2024, e para publicação nos Proceedings do Congresso.

B Configuração Orange PI PC Plus

O projeto foi desenvolvido integrando tecnologias web de software com tecnologias embarcadas de hardware.

B.1 Instalação do sistema operacional

A imagem do sistema operacional utilizado no desenvolvimento desta pesquisa de mestrado foi a do *Armbian jammy 23.02.2* com ambiente gráfico *XFCE* [64] conforme mostra a Figura B.1:

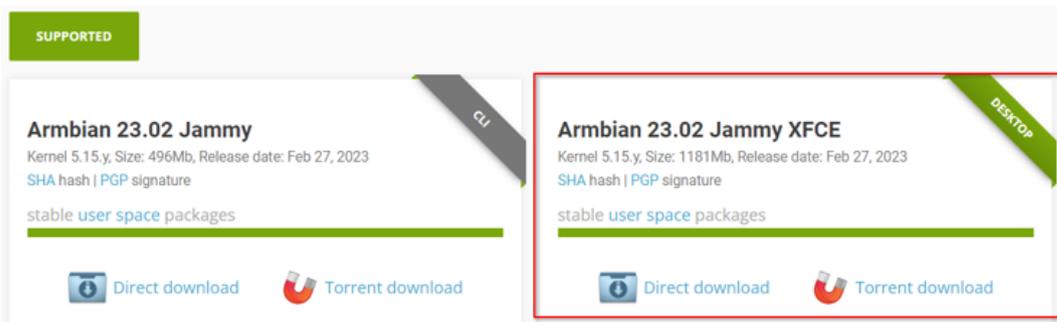


Figura B.1: Imagem do SO Armbian jammy 23.02.2 [64].

Para a instalação do sistema é preciso gravar a imagem em um cartão sd fazendo uso do programa *Balena Etcher* e acionando o primeiro *boot* do sistema pelo seu cartão [65] [66]. Em seguida, deve-se acessar o sistema usando um protocolo seguro para transmissão de dados em rede, no caso o *SSH* (*Secure Socket Shell*) para fazer a configuração de usuário e senha, assim como atualização do sistema.

Uma vez feita a atualização do sistema é recomendável adicionar o usuário criado ao grupo administrador do sistema editando o arquivo */etc/sudoers*. Para adicionar o usuário deve-se proceder o comando abaixo da linha do usuário root, conforme mostra a Figura B.2:

```
$ sudo nano /etc/sudoers
username    ALL=(ALL:ALL) ALL
```

```
# User privilege specification
root    ALL=(ALL:ALL) ALL
opi     ALL=(ALL:ALL) ALL
```

Figura B.2: Adicionar usuário ao grupo administrador do sistema.

B.1.1

Instalação de pacotes e bibliotecas

A instalação dos pacotes e bibliotecas necessários para o desenvolvimento é feita através do comando `apt-get install`, com permissões de administrador, a seguir definido:

```
$ sudo apt-get -y install aptitude build-essential
gcc g++ gdb make cmake net-tools nmap openssh-
client openssh-server curl wget connman libusb-
1.0-0 libusb-dev libusb-1.0-0-dev usbutils alsa-
base alsa-utils libudev-dev git fdisk lsb-release
x11vnc lshw linux-source bc kmod cpio flex libelf-
dev liblz4-tool lz4 libncurses-dev libssl-dev time
rsync dwarves openssl zlib1g-dev libssl-dev
libbz2-dev libreadline-dev libedit-dev libsqlite3-
dev libncursesw5 libncursesw5-dev lzma lzma-dev
llvm liblzma-dev python3-tk python3-tk-dbg python3-
-pyqt5 libffi-dev libgl1 libgl1-mesa-glx libjpeg-
dev libclthreads-dev libclxclient-dev libfreetype6
libfreetype6-dev libfreetype-dev libfftw3-dev
libzita-alsa-pcmi-dev libasound libasound-dev
libasound2 libasound2-dev libjack-dev
```

Apresenta-se a seguir uma descrição dos pacotes e bibliotecas instalados [73]:

- *aptitude*: é uma interface baseada em texto para o sistema de pacotes Debian GNU/Linux, que permite ao usuário visualizar a lista de pacotes e executar tarefas de gerenciamento a exemplo da instalação, atualização e remoção de pacotes.
- *build-essential*: contém uma coleção de pacotes necessários na compilação de bibliotecas e software do sistema
- *gcc*: coleção de compiladores e bibliotecas para linguagem C da GNU.

- *g++*: coleção de compiladores e bibliotecas para linguagem C++ da GNU.
- *gdb*: Depurador da GNU.
- *make*: ferramenta de compilação da GNU que controla a geração de executáveis e os arquivos não fonte de um program a partir de um arquivo chamado *makefile* que lista os arquivos fonte.
- *cmake*: família de ferramentas multiplataforma que gera sistemas de compilação para criar, testar e empacotar software.
- *net-tools*: coleção de ferramentas de rede NET-3 para o sistema operacional Linux.
- *nmap*: ferramenta que fornece funcionalidades para mapeamento de redes ajudando a descobrir portas abertas em hosts locais ou remotos.
- *libclthreads-dev*: arquivos de desenvolvimento da biblioteca *clthreads* que especifica um conjunto de interfaces para programação de *threads* (divisão de um processo principal em dois ou mais processos menores e concorrentes).
- *libclxclient-dev*: arquivos de desenvolvimento da biblioteca *CLX Client*, que fornece funcionalidades para interagir com servidores *X11* para criação de interfaces gráficas de usuário, manipulação de janelas, etc.
- *libfftw3-dev*: arquivos de desenvolvimento para a biblioteca *FFTW* (*Fastest Fourier Transform in the West*) versão 3. Uma biblioteca altamente otimizada para calcular a transformada discreta de Fourier (*DFT*) em uma ou mais dimensões.
- *libzita-alsa-pcmi-dev*: arquivos de desenvolvimento da ferramenta *zita-alsa-pcmi*, um *wrapper* ou biblioteca que fornece uma interface intuitiva para facilitar a implementação da API de ALSA.
- *libjack-dev*: arquivos de desenvolvimento para a implementação da API do servidor de áudio *Jack*.

Finalmente é utilizado o seguinte comando para gerar uma chave SSH que é usada no desenvolvimento conforme mostra a Figura B.3:

```
$ ssh-keygen -t rsa
```

```

opi@orangepicplus:~$ ssh-keygen -t rsa
Generating public/private rsa key pair.
Enter file in which to save the key (/home/opi/.ssh/id_rsa):
Created directory '/home/opi/.ssh'.
Enter passphrase (empty for no passphrase):
Enter same passphrase again:
Your identification has been saved in /home/opi/.ssh/id_rsa
Your public key has been saved in /home/opi/.ssh/id_rsa.pub
The key fingerprint is:
SHA256:vEvpY3yssrdFF9pi0a7QCNuFpc013bxoMrHTfQla2So opi@orangepicplus
The key's randomart image is:
+---[RSA 3072]-----+
|
|             .
|          = +o
|         S * ++=
|        . O OoBoo.
|       .B.OEX.*.
|      .o=.oO.+
|     .==*.
|-----[SHA256]-----+
opi@orangepicplus:~$

```

Figura B.3: Geração chave SSH.

B.2

Configuração de rede

configurada a NIC WiFi usando o protocolo DHCP para ser a conexão padrão do sistema [68] [69]:

- Verificar conexão de rede (a Figura B.4 confirma que somente a NIC Ethernet encontra-se habilitada):

```
$ sudo connmanctl services
```

```

opi@orangepicplus:~$ sudo connmanctl services
*AR Wired          ethernet_0281345ad49c_cable

```

Figura B.4: Conexão de rede em uso pelo sistema.

- Verificar estado da NIC WiFi (a Figura B.5 mostra que NIC WiFi está desabilitada no sistema):

```
$ nmcli radio
```

```
opi@orangepicplus:~$ nmcli radio
WIFI-HW  WIFI      WWAN-HW  WWAN
enabled  disabled  enabled   enabled
```

Figura B.5: Estado desabilitado da NIC WiFi.

- Habilitar NIC WiFi

```
$ nmcli radio wifi on
$ nmcli radio
```

```
opi@orangepicplus:~$ nmcli radio wifi on
opi@orangepicplus:~$ nmcli radio
WIFI-HW  WIFI      WWAN-HW  WWAN
enabled  enabled   enabled   enabled
```

Figura B.6: Estado habilitado da NIC WiFi.

- Listar redes WiFi disponíveis

```
$ nmcli device wifi list
```

```
opi@orangepicplus:~$ sudo connmanctl services
*AO Wired          ethernet_0281345ad49c_cable
  MuGoLVIVOFIBRA-2-4  wifi_1281345ad49c_4d75476f4c5649564f46494252412d322d34_managed_psk
```

Figura B.7: Varredura de redes WiFi disponíveis.

- Conectar-se a rede WiFi

```
$ nmcli device wifi connect <SSID> password <
  wifi-password>
```

```
opi@orangepicplus:~$ nmcli device wifi connect MuGoLVIVOFIBRA-2-4 password   
Device 'wlan0' successfully activated with '0f48f32f-def4-4c10-97e2-5585a663cd5d'.
```

Figura B.8: Conexão a rede WiFi.

- Verificar endereço IP da NIC WiFi

```
$ ifconfig
```

```
opi@orangepicplus:~$ ifconfig
eth0: flags=-28605<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST,DYNAMIC> mtu 1500
    inet 192.168.15.31 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.15.255
    inet6 2804:1b3:7002:5b52:e23c:7a1f:404e:6116 prefixlen 64 scopeid 0x0<global>
    inet6 fe80::6a04:fc17:de5b:1608 prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
    inet6 2804:1b3:7002:5b52:719b:b898:6a26:cd12 prefixlen 64 scopeid 0x0<global>
    ether 02:81:34:5a:d4:9c txqueuelen 1000 (Ethernet)
    RX packets 40868 bytes 54284109 (54.2 MB)
    RX errors 0 dropped 62 overruns 0 frame 0
    TX packets 13347 bytes 1302326 (1.3 MB)
    TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0
    device interrupt 48

lo: flags=73<UP,LOOPBACK,RUNNING> mtu 65536
    inet 127.0.0.1 netmask 255.0.0.0
    inet6 ::1 prefixlen 128 scopeid 0x10<host>
    loop txqueuelen 1000 (Local Loopback)
    RX packets 1 bytes 248 (248.0 B)
    RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
    TX packets 1 bytes 248 (248.0 B)
    TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

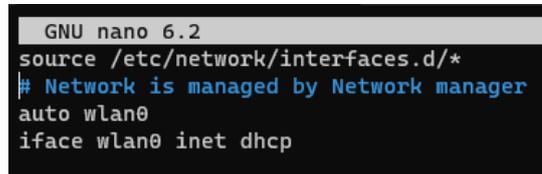
wlan0: flags=-28605<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST,DYNAMIC> mtu 1500
    inet 192.168.15.37 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.15.255
    inet6 2804:1b3:7002:5b52:93ad:5a65:4558:1091 prefixlen 64 scopeid 0x0<global>
    inet6 fe80::77e6:fe0c:2da3:f1c2 prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
    inet6 2804:1b3:7002:5b52:34c0:4d37:a0cb:3ef0 prefixlen 64 scopeid 0x0<global>
    ether 12:81:34:5a:d4:9c txqueuelen 1000 (Ethernet)
    RX packets 372 bytes 82449 (82.4 KB)
    RX errors 0 dropped 4 overruns 0 frame 0
    TX packets 147 bytes 22263 (22.2 KB)
    TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

wlan1: flags=-28669<UP,BROADCAST,MULTICAST,DYNAMIC> mtu 1500
    ether 12:81:34:5a:d6:9c txqueuelen 1000 (Ethernet)
    RX packets 0 bytes 0 (0.0 B)
    RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
    TX packets 0 bytes 0 (0.0 B)
    TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0
```

Figura B.9: Endereços IP das NIC do sistema.

- Configurar NIC WiFi como conexão padrão na inicialização do sistema editando o arquivo `/etc/network/interfaces`:

```
$ sudo nano /etc/network/interfaces
auto wlan0
iface wlan0 inet dhcp
```



```
GNU nano 6.2
source /etc/network/interfaces.d/*
# Network is managed by Network manager
auto wlan0
iface wlan0 inet dhcp
```

Figura B.10: Configuração NIC WiFi como conexão padrão do sistema.

Agora é possível desconectar cabo de rede e continuar trabalhando pela conexão WiFi.

B.2.1

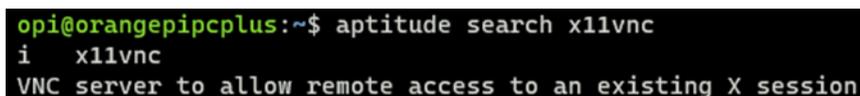
Instalação e configuração do servidor gráfico X11 VNC Server

O X Server é um aplicativo que gerencia um ou mais *displays* gráficos conectados ao sistema embarcado, funcionando como um servidor que pode rodar tanto no dispositivo local quanto na rede. As aplicações que precisam mostrar e/ou receber informações na, e desde a tela, podem se comunicar com o X Server, enquanto este se encarrega de gerenciar as janelas para mostrá-las fisicamente num monitor ou virtualmente na janela de um navegador web ou de um aplicativo.

O X11 VNC Server é um servidor VNC, isto é, uma aplicação que permite compartilhar informação gráfica de um sistema, pelo que torna possível visualizar e interatuar remotamente com o X Server [70].

- Verificar pacote x11vnc

```
$ aptitude search x11vnc
```



```
opi@orangepipcplus:~$ aptitude search x11vnc
i x11vnc
VNC server to allow remote access to an existing X session
```

Figura B.11: Verificação de instalação do pacote x11vnc no sistema.

- Configurar senha de acesso

```
$ sudo x11vnc -storepasswd /etc/x11vnc.passwd
```

```
opi@orangeipcplus:~$ sudo x11vnc -storepasswd /etc/x11vnc.passwd
[sudo] password for opi:
Enter VNC password:
Verify password:
Write password to /etc/x11vnc.passwd? [y]/n y
Password written to: /etc/x11vnc.passwd
opi@orangeipcplus:~$ |
```

Figura B.12: Configuração de senha para acesso remoto pelo vnc.

- Criar script para configurar x11vnc como serviço do sistema

```
$ sudo nano /etc/systemd/system/x11vnc.service

[Unit]
Description=Start x11vnc at startup
After=multi-user.target

[Service]
Type=simple
ExecStart=x11vnc -auth guess -forever -loop -
            noxdamage -repeat -rfbauth /etc/x11vnc.
            passwd -rfbport 5900 -shared

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

```
GNU nano 6.2 /etc/systemd/system/x11vnc.service
[Unit]
Description=Start x11vnc at startup
After=multi-user.target

[Service]
Type=simple
ExecStart=x11vnc -auth guess -forever -loop -noxdamage -repeat -rfbauth /etc/x11vnc.passwd -rfbport 5900 -shared

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

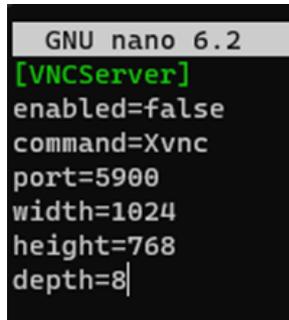
Figura B.13: Configuração do x11vnc como serviço do sistema.

- Editar arquivo *lightdm.conf* para configurar resolução da tela (criar arquivo caso este não exista)

```
$ sudo nano /etc/lightdm/lightdm.conf

[VNCServer]
enabled=false
command=Xvnc
port=5900
```

```
width=1024
height=768
depth=8
```



```
GNU nano 6.2
[VNCServer]
enabled=false
command=Xvnc
port=5900
width=1024
height=768
depth=8|
```

Figura B.14: Configuração de resolução da tela.

- Reiniciar gerenciador de serviços

```
$ sudo systemctl daemon-reload
```

- Habilitar serviço x11vnc

```
$ sudo systemctl enable x11vnc
```

- Inicializar serviço x11vnc

```
$ sudo systemctl start x11vnc
```

Neste passo já é possível conectar um cliente `vncviewer`, configurando o endereço ip da SBC e nome de usuário [71].

- Instalar e executar `vncviewer` a partir da máquina host e configurar endereço IP e nome de usuário da Orange Pi PC Plus.

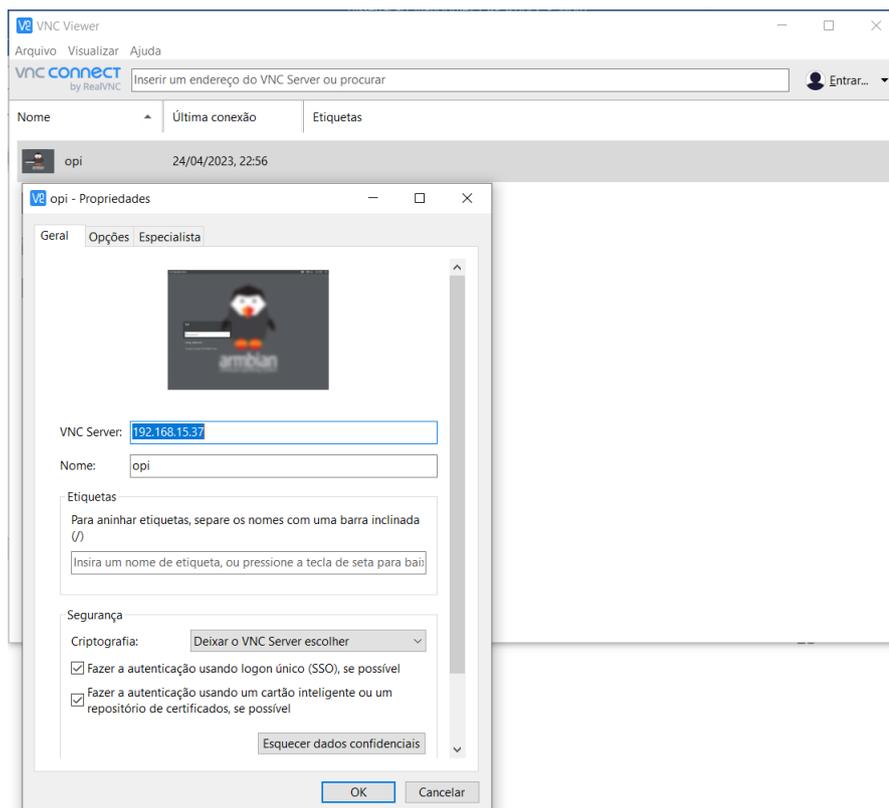


Figura B.15: Configuração de endereço IP e nome de usuário para conexão remota.

- Selecionar dispositivo e opção de conectar

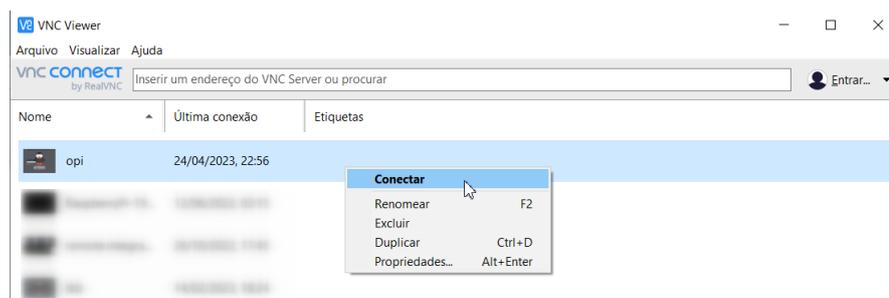


Figura B.16: Conexão a Orange Pi PC Plus.

- Aceitar conexão sem criptografia

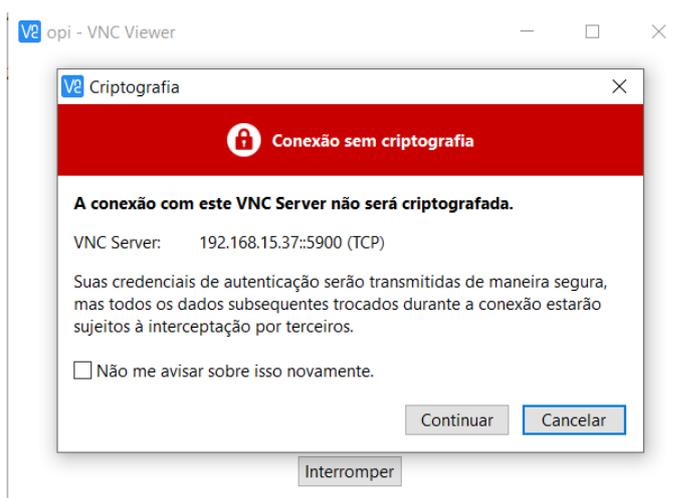


Figura B.17: Notificação de conexão sem criptografia.

- Ingressar senha para conexão

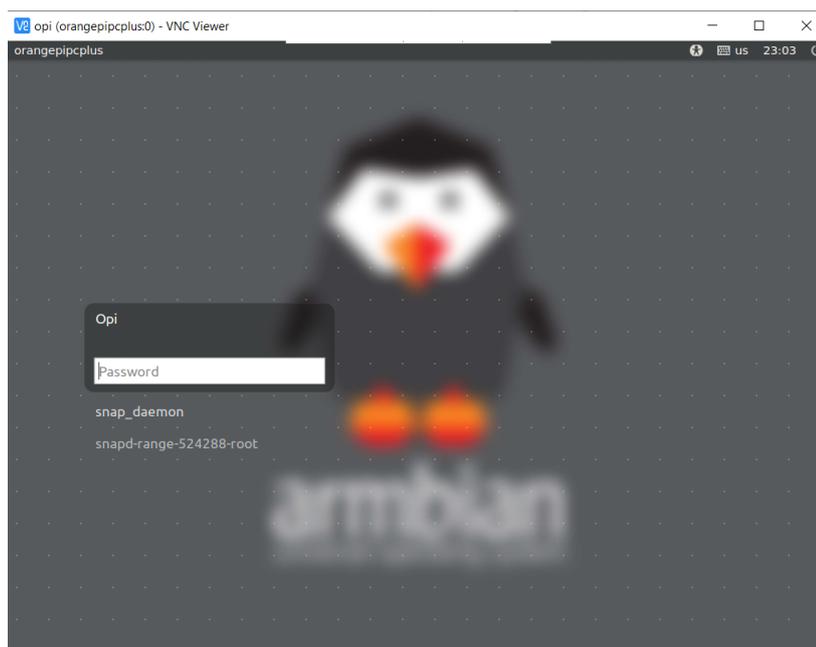


Figura B.18: Conexão tela remota.

B.3

Configuração do sistema para processamento de áudio

Para propósitos de gerenciamento do sistema, em particular para controlar o acesso a recursos lógicos e de hardware, cada usuário no Linux é único, e os usuários estão organizados em grupos. É importante verificar que o usuário

do sistema criado no item B.1 seja membro do grupo *audio*. Cada grupo é identificado por uma única linha no arquivo */etc/group*. Isso pode ser verificado com o seguinte comando:

```
$ cat /etc/group
```

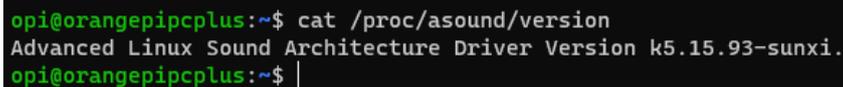
Caso o usuário ainda não seja membro do grupo *audio* deve-se adicionar com o comando:

```
$ sudo adduser opi audio
```

B.3.1 Instalação e configuração ALSA

O módulo de ALSA já vem carregado no Kernel de Linux desde a versão 2.6 em diante. Para mostrar a versão do driver no sistema:

```
$ cat /proc/asound/version
```

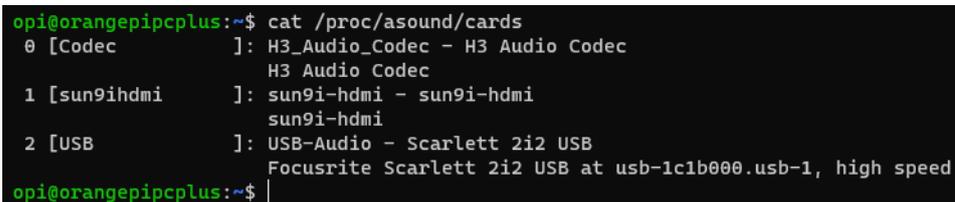


```
opi@orangeipcplus:~$ cat /proc/asound/version
Advanced Linux Sound Architecture Driver Version k5.15.93-sunxi.
opi@orangeipcplus:~$ |
```

Figura B.19: Versão do driver de ALSA no sistema.

O módulo de ALSA é o responsável por traduzir os recursos de hardware de áudio de um dispositivo em uma API que o sistema pode chamar para gerenciar o áudio do sistema. Para verificar as placas de som disponíveis na Orange Pi PC Plus utiliza-se o comando:

```
$ cat /proc/asound/cards
```



```
opi@orangeipcplus:~$ cat /proc/asound/cards
0 [Codec          ]: H3_Audio_Codec - H3 Audio Codec
                        H3 Audio Codec
1 [sun9ihdmi     ]: sun9i-hdmi - sun9i-hdmi
                        sun9i-hdmi
2 [USB           ]: USB-Audio - Scarlett 2i2 USB
                        Focusrite Scarlett 2i2 USB at usb-1c1b000.usb-1, high speed
opi@orangeipcplus:~$ |
```

Figura B.20: Dispositivos de áudio disponíveis no sistema.

É preciso levar em consideração que a ordem exata na qual um sistema Linux descobre qualquer placa de som pode variar cada vez que a máquina é reiniciada. Alternativamente, pode-se usar o nome do dispositivo que não depende da ordem em que o Linux descobre as placas de som. Assim para testar captura e reprodução de áudio no sistema utiliza-se:

```
$ arecord -d 10 -c 2 -f S32_LE -r 44100 -D hw:USB -t
wav test.wav

$ aplay -D hw:USB test.wav
```

B.3.2

Instalação e configuração servidor de áudio Jack

Para usar o servidor *Jack* é preciso instalar o *jackd*, que em termos do sistema operacional, atua como um "demônio do sistema", isto é, um aplicativo que roda em background (sem terminal ou interface gráfica), como um processo. E, também instalar (para facilitar os testes no desenvolvimento) o *qjackctl* [72], que é um aplicativo que usa as bibliotecas de Qt [73] para controlar o *jackd* através de uma interface gráfica intuitiva e amigável. Se instala também o módulo de medição *JAAA* (*JACK and ALSA Audio Analyser*) e o módulo analisador perceptual *JAPA* (*JACK and ALSA Perceptual Analyser*):

```
$ sudo apt-get install jackd1 qjackctl jaaa japa
```

No processo de instalação aceita-se a execução do *jackd* em tempo real. Esta funcionalidade permite prever e/ou determinar o tempo de resposta dos eventos a tratar na implementação do protótipo de sonômetro:

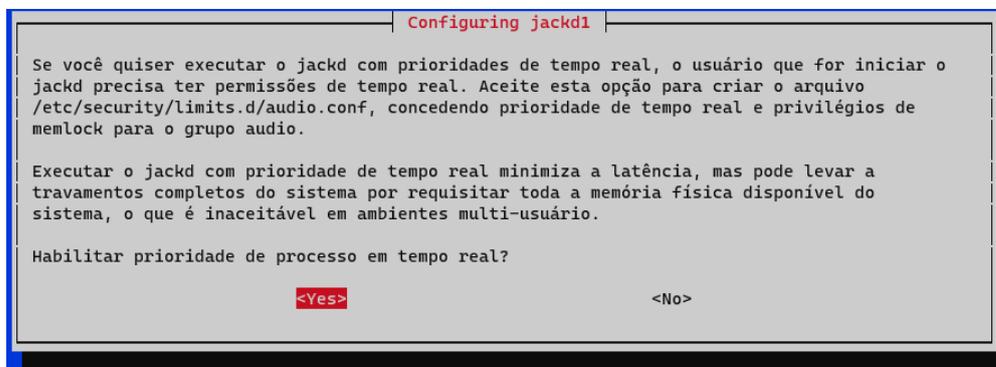


Figura B.21: Configuração para usar prioridade de tempo real com o *jackd*.

Após a instalação verifica-se a versão instalada do Jack com:

```
$ jackd --version
jackd version 0.125.0rc1 tmpdir /dev/shm protocol 25
```

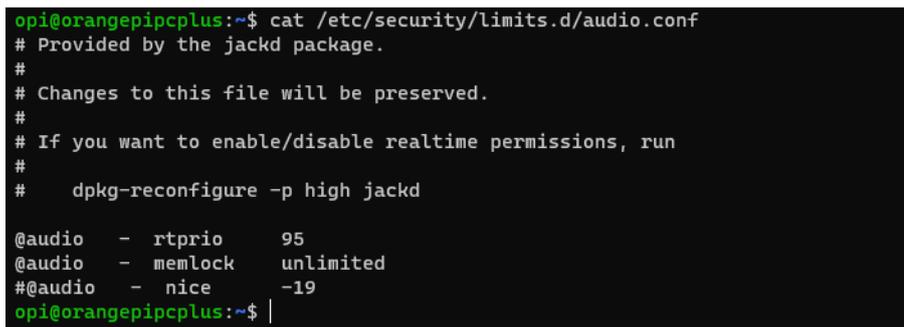
No momento desta pesquisa, *JACK1* se aproxima da versão 1.0, em quanto *JACK2* se aproxima da versão 2.0.

Para poder usar corretamente o servidor *Jack* é recomendável que o sistema cumpra os seguintes requerimentos:

- Usar um kernel de baixa latência
- Ter adicionado o usuário ao grupo *audio*
- Ter o recurso de tempo real habilitado nas configurações do *jackd*: o recurso de tempo real permite que um aplicativo seja determinista e de baixa latência e, embora quase todas as distribuições do Linux o considerem uma fonte potencial de abuso do sistema e esteja, portanto limitado seu acesso em vários graus, ele é habilitado na instalação do *jackd* no passo anterior, o que pode ser conferido no arquivo */etc/security/limits.d/audio.conf*, mais especificamente se as seguintes linhas de programação foram consideradas, tal qual mostrado na Figura B.22:

```
$ cat /etc/security/limits.d/audio.conf

@audio - rtprio 95
@audio - memlock unlimited
```



```
opi@orangepicplus:~$ cat /etc/security/limits.d/audio.conf
# Provided by the jackd package.
#
# Changes to this file will be preserved.
#
# If you want to enable/disable realtime permissions, run
#
# dpkg-reconfigure -p high jackd
@audio - rtprio 95
@audio - memlock unlimited
#@audio - nice -19
opi@orangepicplus:~$ |
```

Figura B.22: Script de configuração para usar o recurso de tempo real com *jackd*.

- Ter instalada a aplicação *qjackctl* e configurar de acordo com os recursos do sistema e a interface de áudio Focusrite 2i2, os parâmetros de *Taxa de amostragem*, *Período* e *Buffer*. O seguinte comando, conforme apresenta a Figura B.23, fornece a informação necessária:

```
$ aplay --dump-hw-params -D hw:2,0 /dev/urandom
```

```
opi@orangeipicplus:~$ aplay --dump-hw-params -D hw:2,0 /dev/urandom
Playing raw data '/dev/urandom' : Unsigned 8 bit, Rate 8000 Hz, Mono
HW Params of device "hw:2,0":
-----
ACCESS:  MMAP_INTERLEAVED RW_INTERLEAVED
FORMAT:  S32_LE
SUBFORMAT:  STD
SAMPLE_BITS: 32
FRAME_BITS: 64
CHANNELS: 2
RATE: [44100 96000]
PERIOD_TIME: [125 1000000]
PERIOD_SIZE: [8 96000]
PERIOD_BYTES: [64 768000]
PERIODS: [2 1024]
BUFFER_TIME: (166 2000000)
BUFFER_SIZE: [16 192000]
BUFFER_BYTES: [128 1536000]
TICK_TIME: ALL
-----
aplay: set_params:1352: Sample format non available
Available formats:
- S32_LE
opi@orangeipicplus:~$ |
```

Figura B.23: Parâmetros configuráveis para interface focusrite 2i2.

A Figura B.24 apresenta a configuração na aplicação *qjackctl*:

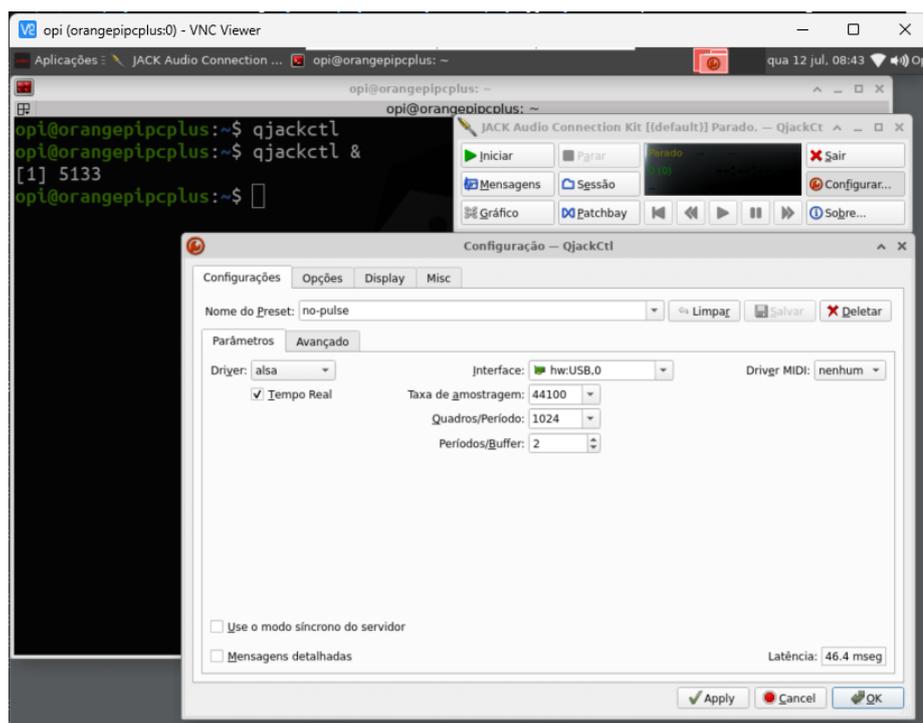


Figura B.24: Configuração de parâmetros na interface do *qjackctl*.

- Ter instalado o pacote *pulseaudio-module-jack* para tratar a interação e possíveis conflitos entre o *Jack* e o *PulseAudio* [74] [75] [76]

```
$ sudo apt-get install pulseaudio-module-jack
```

- Inicializar o servidor de *Jack*, e executar os módulos de medição, *JAPA* e *JAAA* [77] [78] [79] conforme mostram as imagens B.25 e B.26 e realizar as respectivas configurações de entradas e saídas no sistema para capturar o sinal do microfone conectado na interface Focusrite 2i2 [80] conforme apresenta a Figura B.27:

```
$ jaaa -J
```

```
$ japa -J
```

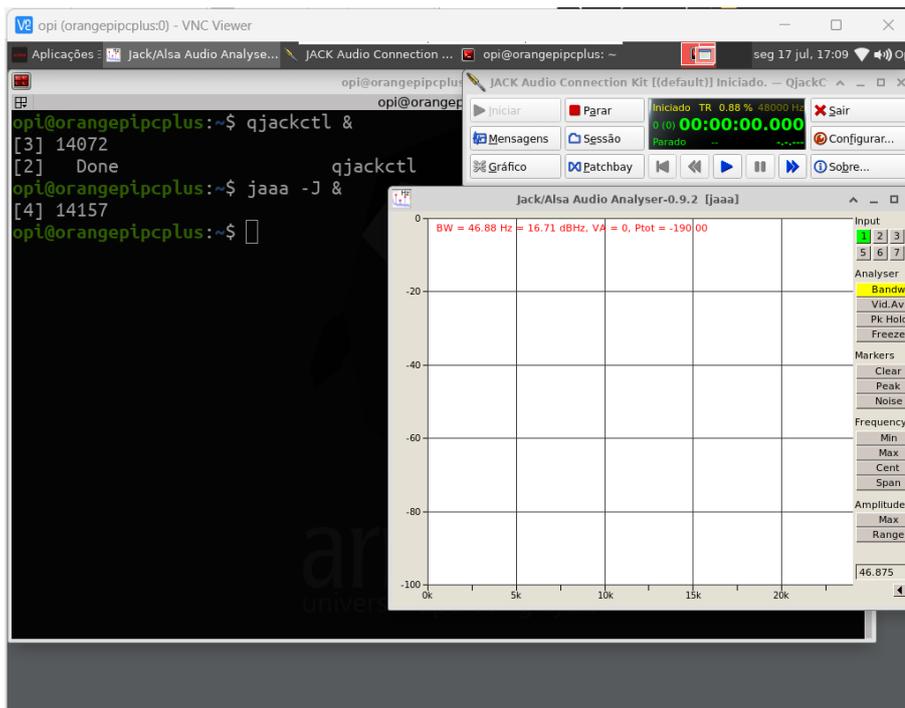


Figura B.25: Execução do módulo de medição *JAAA*.

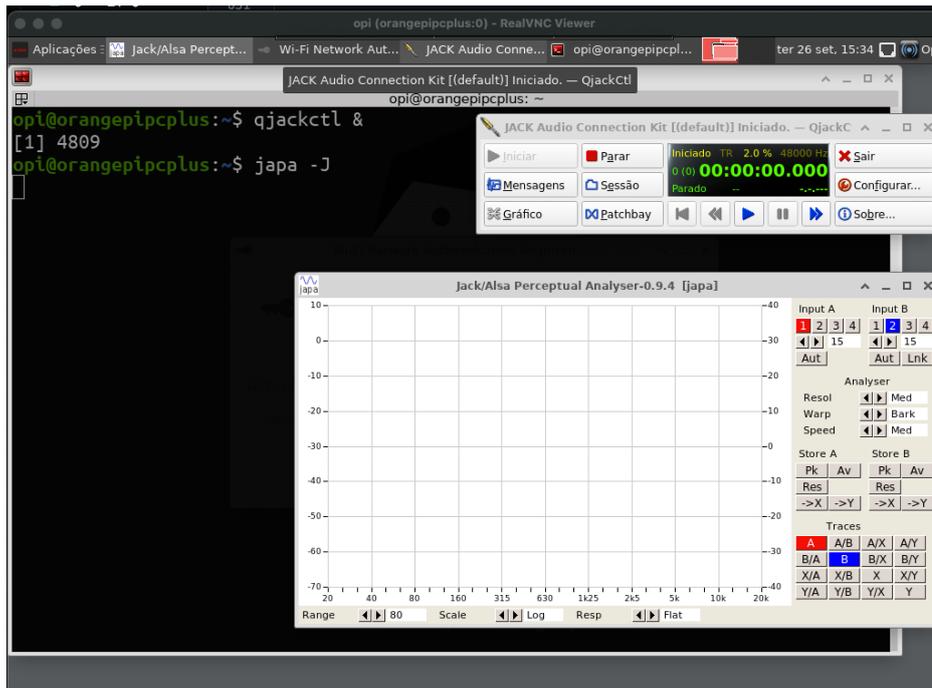


Figura B.26: Execução do módulo de medição *JAPA*.

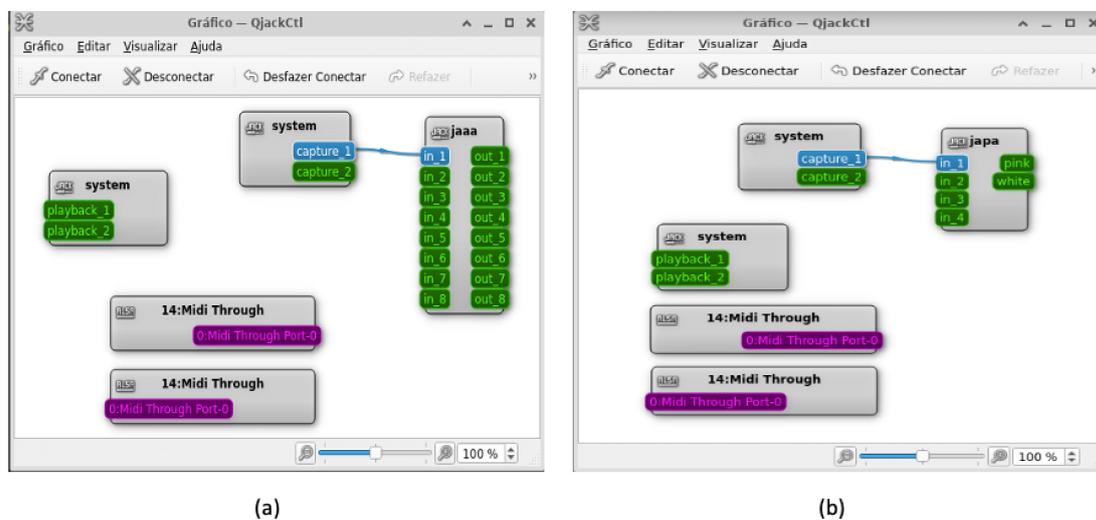


Figura B.27: Configuração das entradas de áudio desde o canal 1 de microfone da interface Focusrite 2i2 (a) ao módulo de medição *JAAA* e (b) ao módulo de medição *JAPA*.

- Testar o fluxo completo do sinal de áudio [80] conforme mostra as Figuras B.28 e B.29:

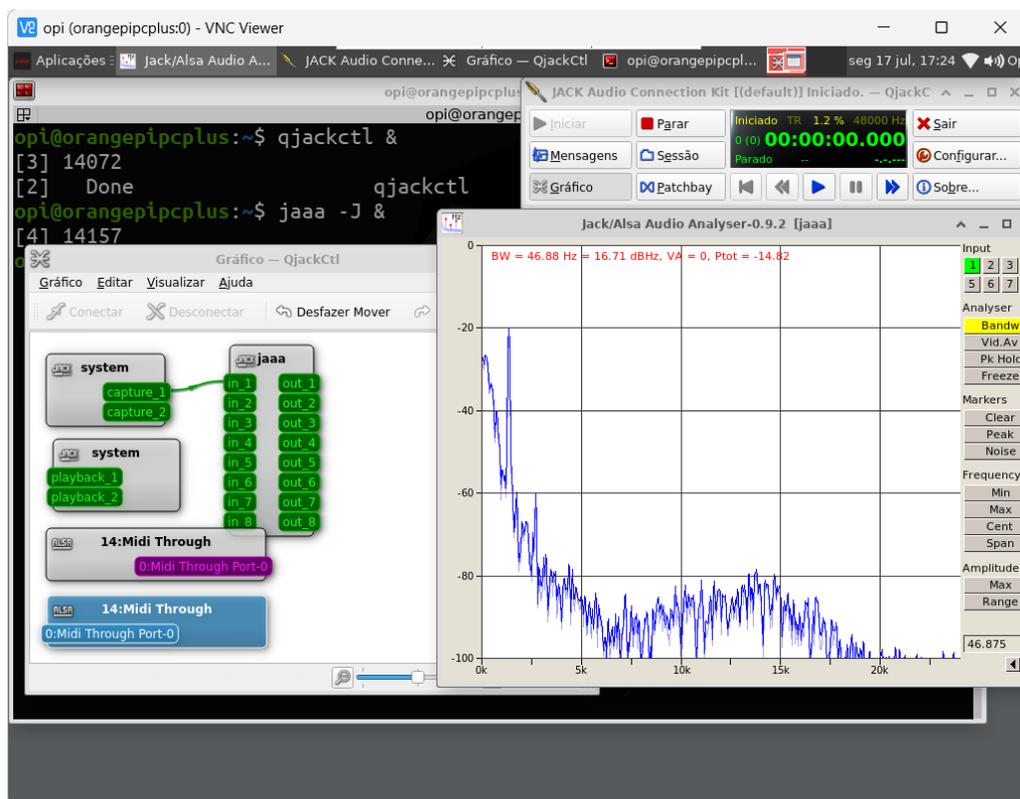


Figura B.28: Fluxo de medição com módulo *JAAA*.

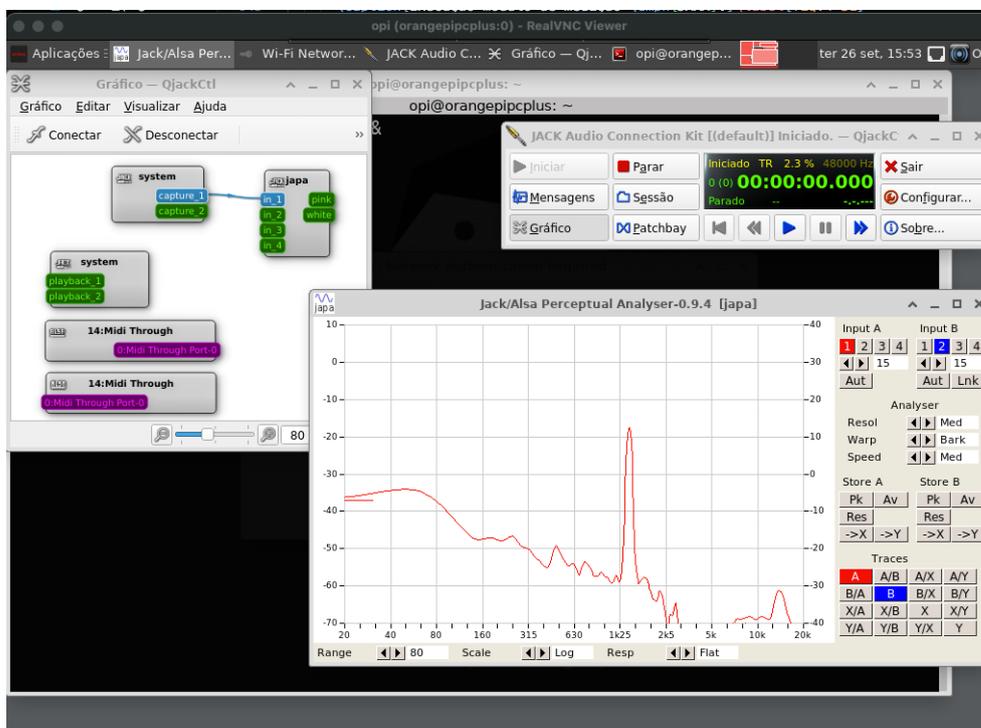


Figura B.29: Fluxo de medição com módulo *JAPA*.

C

Tecnologias de desenvolvimento utilizadas

O projeto foi desenvolvido integrando tecnologias web de software com tecnologias embarcadas de hardware.

C.1

Node.js

O Node.js [81] é um ambiente de desenvolvimento open-source e multi-plataforma criado pelo Ryan Dahl [82] que permite a execução da linguagem Javascript do lado do servidor. É composto pelo (i) interpretador de Javascript v8 [83], que é o núcleo do navegador Google Chrome; (ii) pela biblioteca *libuv* [84] e (iii) por um conjunto de módulos e frameworks, que facilitam e potencializam o desenvolvimento. O Node.js, baseado na arquitetura *Event Loop*, implementa os modelos *Single-Thread* e *Non-blocking I/O*, conforme mostra a Figura C.1, com capacidade de executar operações de E/S de forma assíncrona mediante o gerenciamento de recursos através de funções callback.

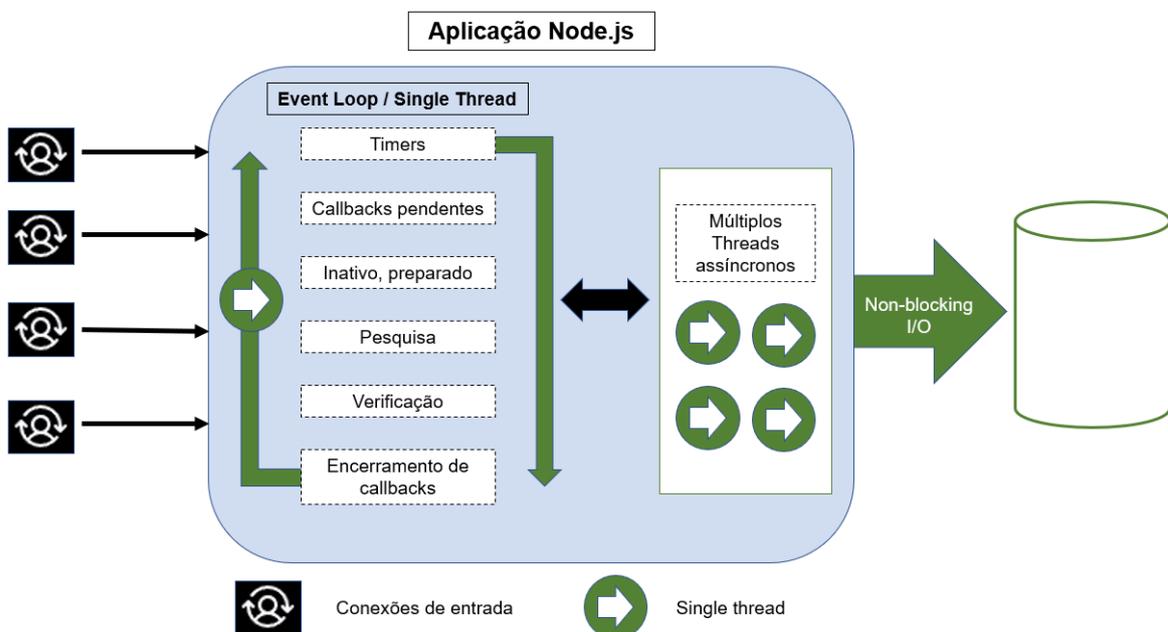


Figura C.1: Processo de uma aplicação Node.js [85].

C.1.1 NVM (Node Version Manager)

O NVM (Node Version Manager) é uma ferramenta computacional que permite instalar e gerenciar diferentes versões do node no sistema e de alternar entre essas versões por meio de uma linha de comandos [86].

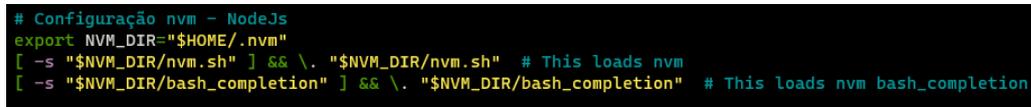
C.1.1.1 Instalação e configuração do NVM

A instalação do nvm e da versão do Node.js a ser utilizada é feita através do repositório oficial pela linha de comandos, seguindo os seguintes passos:

- Clonar e rodar o script de instalação do nvm (após rodar o comando deve-se reiniciar o shell):

```
$ curl -o- https://raw.githubusercontent.com/nvm-  
sh/nvm/v0.39.3/install.sh | bash
```

- Verificar a configuração do *PATH* do nvm no arquivo *.bashrc* (as instruções de exportação das variáveis de ambiente do nvm devem ficar no final do arquivo *.bashrc*).



```
# Configuração nvm - NodeJs  
export NVM_DIR="$HOME/.nvm"  
[ -s "$NVM_DIR/nvm.sh" ] && \. "$NVM_DIR/nvm.sh" # This loads nvm  
[ -s "$NVM_DIR/bash_completion" ] && \. "$NVM_DIR/bash_completion" # This loads nvm bash_completion
```

Figura C.2: Configuração do NVM no arquivo *.bashrc*

- Instalar a versão lts do Node.js (em sua versão 18.16.0 durante o desenvolvimento da pesquisa de mestrado, conforme mostra a imagem C.3):

```
$ nvm install --lts
```



```
opi@orangeipicplus:~$ nvm install --lts  
Installing latest LTS version.  
Downloading and installing node v18.16.0..  
Downloading https://nodejs.org/dist/v18.16.0/node-v18.16.0-linux-armv7l.tar.xz...  
##### 100,0%  
Computing checksum with sha256sum  
Checksums matched!  
Now using node v18.16.0 (npm v9.5.1)  
Creating default alias: default -> lts/* (-> v18.16.0)
```

Figura C.3: Instalação do Node.js, versão lts pela linha de comandos.

- Instalar o gerenciador de pacotes yarn:

```
$ corepack enable
```

C.1.2

Gerenciadores de pacotes do Node.js

Os gerenciadores de pacotes do Node.js são ferramentas computacionais utilizadas para o gerenciamento das diferentes etapas do desenvolvimento do projeto de pesquisa, desde a sua inicialização até as fases de instalação e disponibilização de bibliotecas, testes da aplicação e configurações de execução, incluindo a etapa de customizações do deploy.

Dentre os principais gerenciadores de pacotes do Node.js destacam-se: o *npm* [87], que é o gerenciador de pacotes padrão do node, entretanto com a limitação de não permitir a instalação de pacotes offline, o que, comumente, pode causar lentidão dependendo da conexão com a internet. Já o *yarn* [88] é um gerenciador desenvolvido pela Facebook, com a colaboração da Google, cujo objetivo é ser mais rápido e seguro que o *npm*, agregando a vantagem de permitir a instalação de pacotes de forma offline.

C.2

Electron

O Electron é um framework que implementa a stack de desenvolvimento web (HTML, CSS e Javascript) em conjunto com o ambiente de desenvolvimento do *Node.js* [81] e a versão open-source do navegador Google Chrome, o *Chromium*, para a criação de aplicações desktop multiplataforma [89]. O Electron foi desenvolvido em 2013 por Cheng Zhao [90], inicialmente para ser o shell do projeto *atom* [91], um editor de código que se converteu em um dos líderes do mercado de desenvolvimento até 2015, quando a Microsoft lançou o Visual Studio Code [92]. Já o editor de código tornou-se, mais recentemente, líder do mercado de desenvolvimento, que, a exemplo de muitas outras ferramentas de software utilizadas atualmente pela sua eficiência e performance, foi desenvolvido em Electron [93].

A arquitetura de uma aplicação Electron é similar a arquitetura cliente-servidor do protocolo HTTP, mas aplicada a uma aplicação desktop. Isto é, existe um processo cliente, que é o encarregado de toda a parte visual da aplicação e que tem acesso a todas as APIs, funcionalidades e permissões de um browser. Este processo é acessível diretamente pelo usuário e é chamado de **Renderer** ou **Renderizador**. Um processo servidor, é encarregado de gerenciar todas as chamadas do sistema assim como as informações sensíveis da aplicação, tais como chamadas ao banco de dados, autenticação, ciclo de vida da

aplicação, etc., processo esse denominado de **Processo Principal** ou **Main Process**. E existe também um processo intermediário que fornece uma api para permitir a comunicação e transmissão bidirecional de informações entre o lado cliente e o lado servidor, chamado **IPC** (Inter Process Communication) [94]. A Figura C.4 mostra o fluxo de comunicação entre o processo principal e o processo de renderização e também entre o processo principal e múltiplos processos de renderização.

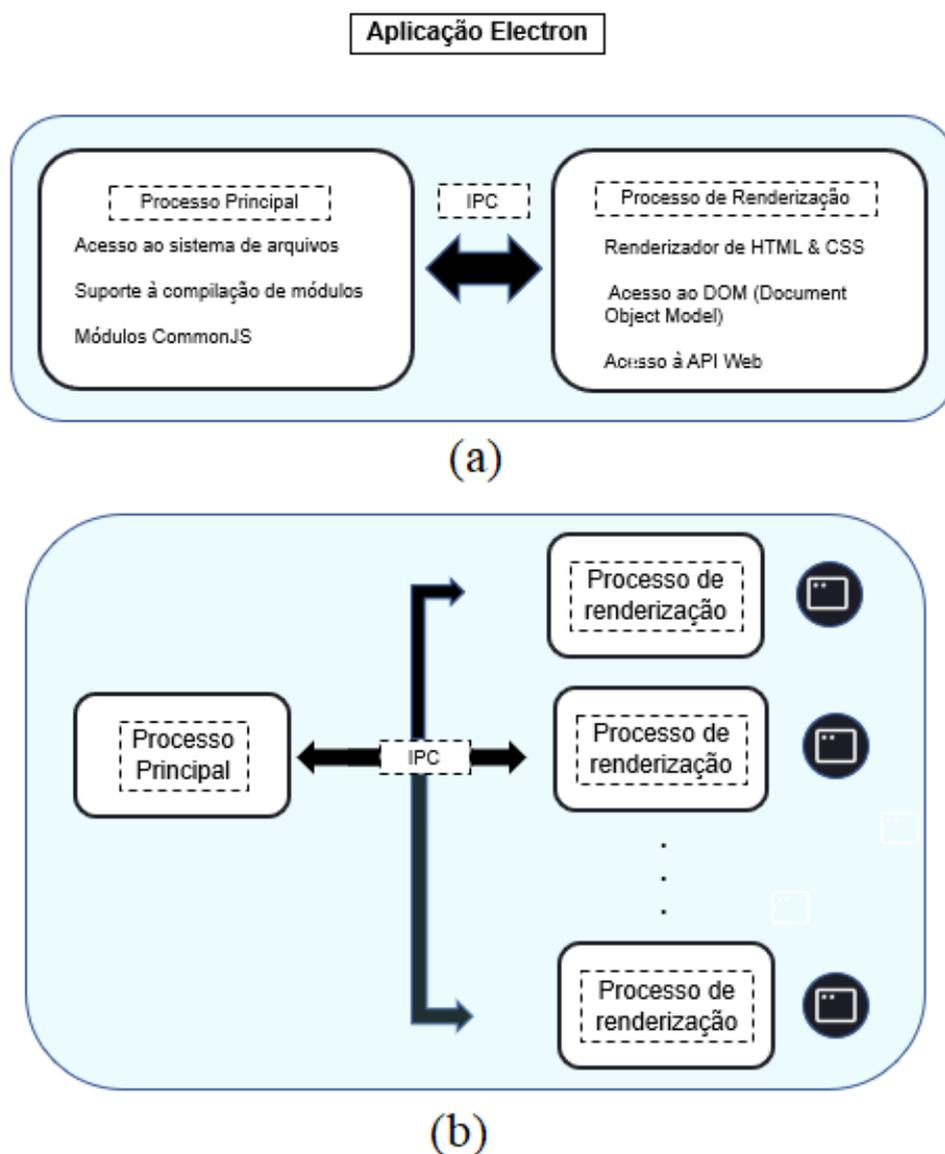


Figura C.4: Arquitetura de uma aplicação Electron (a) Comunicação entre o processo principal e o processo de renderização (b) Comunicação entre o processo principal e múltiplos processo de renderização.

C.3 React

O React [95] é uma biblioteca de *Javascript* para construção de interfaces gráficas de usuário interativas em ambientes desktop, web, móvel, smart tv, realidade virtual, etc. O React implementa uma arquitetura modular baseada em componentes e propriedades, assim como o padrão de renderização *SPA* (*Single Page Application*) [96], que consiste em separar o *FrontEnd*, encarregado de toda a parte visual e de interação com o usuário da aplicação, do *BackEnd*, responsável pelo tratamento da regra de negócio e dos dados sensíveis da aplicação. Assim procedendo-se, consegue-se comunicação entre eles através de *API* e em formato *JSON* para troca de informações, o que de fato melhora consideravelmente a experiência tanto do usuário quanto do desenvolvedor, pois quando o usuário navegar pelas diferentes janelas de uma aplicação, são atualizados apenas os conteúdos que mudam em cada janela e não a aplicação completa. Ou seja, o desenvolvedor é capaz de gerenciar múltiplos *FrontEnds* (web, mobile, etc) com todos acessando à mesma base de dados.

Diferentes plataformas do mercado como são Twitter, Netflix, Facebook, Instagram, Notion, Figma, etc, utilizam atualmente esta biblioteca.

A figura C.5 mostra uma comparação entre o padrão de renderização tradicional, o *SSR* e o padrão usado pelo React, o *SPA*.

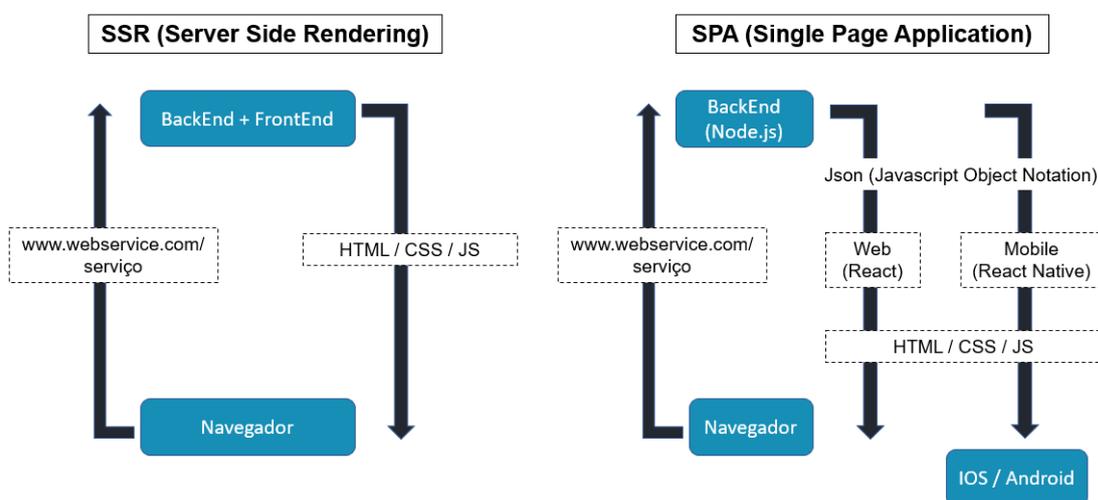


Figura C.5: Comparação entre padrões de renderização *SSR* e *SPA*.

C.4

Python

O Python [97] [98] [99] é uma linguagem de programação interpretada utilizada em diferentes áreas da indústria e da academia. Atualmente encontra-se entre as mais populares linguagens para o desenvolvimento nas áreas da ciência de dados e Inteligência artificial, e devido a fatos como ter uma sintaxe simples, variedade de bibliotecas e uma curva rápida de aprendizado, já está sendo usado como ferramenta educativa em graus prévios à educação profissional.

C.4.1

pyenv

O pyenv é uma ferramenta para o gerenciamento das versões do python. A instalação do pyenv, em um sistema macOS Ventura, assim como a instalação da versão do Python a ser utilizada é feita através do repositório oficial pela linha de comandos, seguindo os seguintes passos:

- Instalar pyenv a través do gerenciador de pacotes Homebrew:

```
$ brew install pyenv
```

- Executar no terminal os comandos para incluir no final do arquivo */.profile* a configuração do *PATH* do *pyenv*:

```
export PYENV_ROOT="$HOME/.pyenv"  
command -v pyenv >/dev/null || export PATH="  
    $PYENV_ROOT/bin:$PATH"  
eval "$(pyenv init -)"
```

- Reiniciar shell

```
$ sudo reboot
```

- Instalar a versão do Python (Nesta pesquisa de mestrado foi utilizada a versão 3.10.11 do Python):

```
$ pyenv install 3.10.11
```

- Definir versão do Python para ser usada de forma global no sistema:

```
$ pyenv global 3.10.11
```

C.4.2

Gerenciador de pacotes `pip`

O `pip` [100] [101] [102] [103] é o gerenciador de pacotes padrão do Python usado para instalar e gerenciar pacotes e bibliotecas desde o repositório oficial, o Python package Index, assim como de outros repositórios. Ele é um projeto de código aberto e fornece uma interface por linha de comando amigável e fácil de utilizar.

Para ter a versão mais recente do `pip` é recomendável rodar o comando:

```
$ pip install --upgrade pip
```

