

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - UCS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS - CARVI  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E  
ENGENHARIAS  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MARCELO BENEDET LUSSANI**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA  
BLUETOOTH INTEGRADO A UM ABAFADOR DE RUÍDO**

**BENTO GONÇALVES**

**2025**

**MARCELO BENEDET LUSSANI**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA  
BLUETOOTH INTEGRADO A UM ABAFADOR DE RUÍDO**

Relatório do Trabalho de Conclusão de Curso II, apresentado a Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul, no Campus Universitário da Região dos Vinhedos, como requisito parcial para a conclusão do curso em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dra. Marilda Machado Spindola

**BENTO GONÇALVES**

**2025**

**MARCELO BENEDET LUSSANI**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA  
BLUETOOTH INTEGRADO A UM ABAFADOR DE RUÍDO**

Relatório do Trabalho de Conclusão de Curso II, apresentado a Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul, no Campus Universitário da Região dos Vinhedos, como requisito parcial para a conclusão do curso em Engenharia Elétrica.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dra. Marilda Machado Spindola  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Ma. Patricia Giacomelli  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Me. Ricardo Leal Costi  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança durante toda a minha jornada acadêmica.

Aos meus pais Edirce Justina Benedet Lussani e Geraldo Lussani, pelo apoio incondicional, pela compreensão nos momentos de dificuldade e por acreditarem em mim, mesmo quando eu duvidei. Sem vocês, este caminho seria muito mais difícil.

A minha orientadora Prof. Dra. Marilda Machado Spindola, que, com sua orientação, paciência e conhecimento, contribuiu significativamente para o desenvolvimento deste projeto.

Aos professores e colaboradores do curso de Engenharia Elétrica, que, ao longo dos anos, compartilharam não apenas conhecimentos técnicos, mas também valores e experiências que levarei para toda a vida.

Aos colegas e amigos que fizeram parte desta caminhada, seja com palavras de incentivo, ajuda nos momentos de desafio ou simplesmente pela amizade e companheirismo que tornaram essa jornada mais leve e significativa.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação profissional e pessoal, meu muito obrigado.

*“Todos querem o perfume das flores, mas poucos sujam as suas mãos para cultivá-las.”*

***Augusto Cury***

## RESUMO

O avanço constante de processos industriais e atividades profissionais em ambientes com altos níveis de ruído evidencia a necessidade de soluções que possibilitem comunicação eficiente sem comprometer a proteção auditiva. Neste contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de dispositivos que aliem conforto, segurança e conectividade. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de abafador de ruído passivo com sistema de comunicação via Bluetooth, voltado para ambientes ruidosos. O projeto consiste na integração de componentes, tais como alto-falantes, um módulo Bluetooth e um microfone, permitindo ao usuário realizar chamadas e ouvir áudios enquanto mantém sua audição protegida. Para validar a eficácia do dispositivo, foram realizados ensaios de atenuação sonora utilizando fontes de ruído como aspirador de pó e esmerilhadeira, obtendo-se uma redução média de até 22,6 dB nos níveis de pressão sonora. Além disso outro teste relevante foi o de comunicação por chamada de voz, que demonstrou bom desempenho do microfone embutido e clareza na transmissão do áudio. Já no teste de autonomia da bateria demonstrou funcionamento contínuo por aproximadamente 4 horas. A solução proposta busca atender a demandas por dispositivos de proteção auditiva que ofereçam, além da redução de ruído, maior praticidade e conectividade, contribuindo assim para a segurança e o bem-estar de profissionais em diversos setores.

**Palavras-chave:** proteção auditiva, ambientes ruidosos, abafador de ruído.

## ABSTRACT

The constant advancement of industrial processes and professional activities in environments with high noise levels highlights the need for solutions that enable efficient communication without compromising hearing protection. In this context, the development of devices that combine comfort, safety, and connectivity is essential. This paper presents the development of a prototype passive noise canceller with a Bluetooth communication system, designed for noisy environments. The project consists of integrating components such as speakers, a Bluetooth module, and a microphone, allowing the user to make calls and listen to audio while maintaining hearing protection. To validate the device's effectiveness, sound attenuation tests were performed using noise sources such as a vacuum cleaner and an angle grinder, achieving an average reduction of up to 22.6 dB in sound pressure levels. Another relevant test was voice call communication, which demonstrated good performance of the built-in microphone and clear audio transmission. The battery life test demonstrated continuous operation for approximately 4 hours. The proposed solution seeks to meet the demand for hearing protection devices that offer, in addition to noise reduction, greater convenience and connectivity, thus contributing to the safety and well-being of professionals in various sectors.

**Keywords:** hearing protection, noisy environments, noise reduction earmuff.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença entre ondas sonoras musicais e ruído. . . . .	18
Figura 2 – Escala de decibels . . . . .	19
Figura 3 – Ruído contínuo, intermitente e impacto. . . . .	22
Figura 4 – Divisão anatômica da orelha. . . . .	23
Figura 5 – Protetores auriculares tipo concha e tipo inserção . . . . .	27
Figura 6 – Protetores moldados sob medida. . . . .	29
Figura 7 – Método MIRE. . . . .	32
Figura 8 – Abafador de ruído tipo concha utilizado no prototipo . . . . .	36
Figura 9 – Modulo bluetooth CRS8645 . . . . .	37
Figura 10 – Diagrama em blocos . . . . .	40
Figura 11 – Ajustes no casco do abafador . . . . .	41
Figura 12 – Diagrama elétrico . . . . .	42
Figura 13 – Montagem parcial do protótipo . . . . .	43
Figura 14 – Circuito fora do abafador . . . . .	44
Figura 15 – Ilustração do padrão usado nos testes . . . . .	45
Figura 16 – Microfone posicionado na parte interna do abafador de ruído. . . . .	46
Figura 17 – Aferição do peso do protótipo . . . . .	47
Figura 18 – Primeiro teste de comunicação sendo realizado . . . . .	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre valores obtidos pelo aplicativo de decibelímetro X decibelímetro digital (utilizando a esmerilhadeira como fonte de ruído) . . . . .	51
Tabela 2 – Comparação entre valores obtidos pelo aplicativo de decibelímetro X decibelímetro digital (utilizando o aspirador de pó como fonte de ruído) . . . . .	52
Tabela 3 – Comparação entre valores obtidos pelo aplicativo de decibelímetro X decibelímetro digital (utilizando a lixadeira como fonte de ruído) . . . . .	52
Tabela 4 – Comparação entre valores obtidos pelo aplicativo de decibelímetro X decibelímetro digital (utilizando a serra mármore como fonte de ruído) . . . . .	52
Tabela 5 – Medições de nível de pressão sonora com e sem o uso do abafador (aspirador de pó) . . . . .	53
Tabela 6 – Medições de nível de pressão sonora com e sem o uso do abafador (esmerilhadeira) . . . . .	54
Tabela 7 – Comparação entre as conchas (utilizando a esmerilhadeira como fonte de ruído) . . . . .	54
Tabela 8 – Comparação entre as conchas (utilizando o aspirador de pó como fonte de ruído) . . . . .	54
Tabela 9 – Comparação entre as conchas (utilizando a lixadeira como fonte de ruído) . . . . .	55
Tabela 10 – Comparação entre as conchas (utilizando a serra mármore como fonte de ruído) . . . . .	55
Tabela 11 – Resultados do teste de comunicação por reconhecimento de voz . . . . .	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>A2DP</b>	<i>Advanced Audio Distribution Profile</i>
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ABS</b>	Acrilonitrila Butadieno Estireno
<b>AGV</b>	<i>Automated Guided Vehicle</i>
<b>ANC</b>	<i>Active Noise Cancelling</i>
<b>APP</b>	Aplicativo
<b>AVRCP</b>	<i>Audio/Video Remote Control Profile</i>
<b>BLE</b>	<i>Bluetooth Low Energy</i>
<b>CA</b>	Certificado de Aprovação
<b>DSP</b>	<i>Digital Signal Processing</i>
<b>EPI</b>	Equipamento de Proteção Individual
<b>FFT</b>	Transformada Rápida de Fourier
<b>HFP</b>	<i>Hands-Free Profile</i>
<b>HML</b>	<i>High, Medium, Low</i>
<b>HSP</b>	<i>Headset Profile</i>
<b>ISO</b>	Organização Internacional para Padronização
<b>LIPO</b>	Polímero de Lítio
<b>LMS</b>	<i>Least Mean Square</i>
<b>MIRE</b>	<i>Microfone-In-Real-Ear</i>
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>NPS</b>	Nível de Pressão Sonora
<b>NR</b>	Norma Regulamentadora
<b>NRR</b>	<i>Noise Reduction Rating</i>
<b>OMS</b>	Organização Mundial da Saúde
<b>OSHA</b>	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
<b>PAIR</b>	Perda Auditiva Induzida por Ruído
<b>PAR</b>	<i>Personal Attenuation Rating</i>
<b>PCA</b>	Programa de Conservação Auditiva
<b>PCB</b>	<i>Printed Circuit Board</i>

<b>PVC</b>	Policloreto de Vinila
<b>REAT</b>	<i>Real-Ear At Threshold</i>
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i>
<b>SBC</b>	<i>Subband Codec</i>
<b>SNR</b>	<i>Single Number Rating</i>
<b>TCC</b>	Trabalho de Conclusão de Curso
<b>TPAC</b>	Transtorno do Processamento Auditivo Central
<b>USB</b>	<i>Universal Serial Bus</i>
<b>YLDs</b>	<i>Years Lived with Disability</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Corrente elétrica
$dB$	Decibel
$dB(A)$	Decibel ponderado A
$g$	Gramas
$Hz$	Hertz
$m$	Metros
$P$	Potência elétrica
$R$	Resistência elétrica
$t$	Tempo
$V$	Tensão elétrica
$W$	Watt

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivo geral	15
1.2	Objetivos específicos	15
1.3	Escopo do trabalho	15
1.4	Estrutura do trabalho	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1	Ruído	18
<b>2.1.1</b>	<b>Efeitos do ruído</b>	<b>19</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Características dos ruídos</b>	<b>21</b>
2.2	Sistema auditivo	23
<b>2.2.1</b>	<b>Percepção sonora</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Perda de audição</b>	<b>25</b>
2.3	Protetores auriculares	26
<b>2.3.1</b>	<b>Classificação quanto ao tipo de protetores auriculares</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Protetores do tipo plug ou inserção</b>	<b>28</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Protetores do tipo concha</b>	<b>29</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Testes de atenuação dos protetores auriculares</b>	<b>31</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Normas e regulamentações sobre protetores auditivos</b>	<b>32</b>
2.4	Trabalhos relacionados	33
<b>2.4.1</b>	<b>Verificação dos níveis de atenuação de protetores auriculares do tipo concha, utilizando microfone sonda</b>	<b>33</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Supressor ativo de ruído</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
3.1	Materiais	36
<b>3.1.1</b>	<b>Abafador de ruído tipo concha</b>	<b>36</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Módulo bluetooth CSR8645</b>	<b>37</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Alto-falantes</b>	<b>38</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Microfone</b>	<b>38</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Bateria</b>	<b>38</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Interruptor</b>	<b>39</b>
<b>3.1.7</b>	<b>Insumos</b>	<b>39</b>
3.2	Desenvolvimento do sistema	39
<b>3.2.1</b>	<b>Identificação do problema proposto.</b>	<b>39</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Adaptação do abafador de ruído.</b>	<b>40</b>

3.2.3	<b>Montagem dos circuitos.</b>	41
3.2.4	<b>Desenvolvimento da integração com o celular.</b>	42
3.2.5	<b>Montagem e testes do protótipo.</b>	43
3.2.6	<b>Validação do sistema.</b>	44
3.3	Metodologia dos ensaios	44
3.3.1	<b>Preparação dos ensaios</b>	45
3.3.2	<b>Ensaio de comparação</b>	45
3.3.3	<b>Ensaio de atenuação</b>	46
3.3.4	<b>Teste de peso</b>	47
3.3.5	<b>Teste de comunicação</b>	48
3.3.5.1	Teste de reconhecimento de voz automatizado	48
3.3.5.2	Teste de chamada de áudio	49
3.3.6	<b>Teste de bateria</b>	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>51</b>
4.1	Ensaio de comparação	51
4.2	Ensaio de atenuação	53
4.3	Teste de comunicação	56
4.4	Teste de bateria	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>60</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A poluição sonora é um problema crescente nas sociedades urbanizadas e industrializadas, sendo considerada uma das principais causas de estresse ambiental e perda auditiva não ocupacional. O ruído excessivo está associado a diversos efeitos negativos sobre a saúde humana, como distúrbios do sono, dificuldades de concentração, aumento da pressão arterial e, principalmente, Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR) (WHO, 2018). Em ambientes de trabalho, a exposição constante a altos níveis de pressão sonora representa um risco ocupacional significativo, exigindo a adoção de medidas de proteção auditiva eficazes, como os abafadores de ruído, também chamados de protetores auriculares. Esses equipamentos têm como principal objetivo reduzir o nível de pressão sonora que atinge os ouvidos, promovendo a atenuação do ruído por meios físicos, como camadas de espuma e materiais isolantes, que bloqueiam a entrada de ondas sonoras no canal auditivo (Moraes, 2010). A origem dos abafadores remonta ao final do século XIX, quando o inventor norte-americano Chester Greenwood patenteou os primeiros protetores auriculares, inicialmente voltados à proteção contra o frio. Com o tempo, o design foi adaptado para fins de proteção auditiva, especialmente durante a Segunda Guerra Mundial, quando surgiram os primeiros abafadores utilizados por operadores de máquinas e soldados expostos a ruídos extremos (Stowell, 2011).

Em ambientes industriais, obras civis, aeroportos e outros locais com altos níveis de ruído, a comunicação verbal torna-se um desafio significativo. Trabalhadores expostos a esses sons constantes enfrentam não apenas dificuldades para se comunicar, mas também riscos à saúde auditiva, como PAIR. Além disso, em muitos desses contextos, a necessidade de manter contato com colegas ou com o mundo exterior, especialmente via telefone celular, torna-se uma exigência prática, mas frequentemente comprometida pelas limitações dos equipamentos disponíveis.

Tradicionalmente, abafadores de ruído têm sido usados para proteger a audição, mas sua principal função é bloquear sons externos, o que dificulta qualquer forma de comunicação. Por outro lado, fones de ouvido com microfones integrados normalmente não oferecem a proteção auditiva necessária para ambientes ruidosos. Surge, assim, a demanda por uma solução híbrida, que una a proteção eficaz contra o ruído com a possibilidade de comunicação clara e segura.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico que integre abafamento de ruído com comunicação via celular: um abafador de ruído com alto-falante embutido e microfone direcionado, especialmente projetado para operar em ambientes de alta intensidade sonora. O objetivo principal é permitir que o usuário se comunique por meio do celular utilizando o bluetooth, sem comprometer a integridade auditiva ou a clareza da fala, oferecendo uma alternativa segura, prática e acessível.

A motivação para este projeto surgiu da observação direta das dificuldades enfrentadas por profissionais que atuam em ambientes ruidosos e da carência de soluções completas e acessíveis no mercado. Além disso, o avanço de tecnologias como microfones com cancelamento de ruído, circuitos amplificadores eficientes e conectividade Bluetooth possibilita a construção de dispositivos mais inteligentes, compactos e funcionais, capazes de atender a essa demanda de maneira eficiente. O dispositivo proposto não conta com cancelamento de ruído, pois especialistas do Reino Unido observaram que o uso excessivo de fones com cancelamento de ruído pode contribuir para o aumento de casos de Transtorno do Processamento Auditivo Central (TPAC), caracterizado pela dificuldade em interpretar sons, mesmo com audição normal (TecMundo, 2024).

Este trabalho, portanto, não apenas busca solucionar um problema técnico real enfrentado por profissionais em ambientes ruidosos, como também visa contribuir para a preservação da saúde auditiva e para a melhoria das condições de comunicação em contextos desafiadores.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Para alcançar a meta proposta neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), o objetivo geral do mesmo é desenvolver a integração de um protótipo funcional de abafador de ruído eletrônico com microfone embutido e sistema de comunicação com dispositivos móveis, capaz de proporcionar conforto acústico e comunicação eficiente em ambientes ruidosos, aplicando conceitos de processamento de sinais, eletrônica embarcada e ergonomia auditiva.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Projetar um protótipo para ser usado como protetor auricular;
- Adaptar um protetor tipo concha adequado para o projeto;
- Desenvolver a integração do sistema com dispositivos móveis, utilizando tecnologias como Bluetooth ou similares para permitir chamadas de voz;
- Testar o sistema em diferentes cenários de ruído;
- Analisar a viabilidade técnica do produto final, considerando aspectos como autonomia da bateria.

## 1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como escopo o desenvolvimento de um protótipo funcional de abafador de ruído do tipo concha, com sistema de comunicação via

Bluetooth integrado. O projeto compreende a seleção, montagem e integração de componentes eletrônicos, como módulo Bluetooth, alto-falantes, microfone, chave de acionamento e bateria recarregável, instalados em um abafador de uso profissional adaptado. A proposta visa permitir ao usuário realizar chamadas telefônicas e ouvir áudios enquanto permanece protegido contra níveis elevados de pressão sonora, como os encontrados em ambientes industriais. Faz parte do escopo a realização de testes experimentais com fontes de ruído reais, como aspirador de pó, esmerilhadeira, serra mármore e lixadeira em ambiente controlado e simulado. As medições dos níveis de pressão sonora serão feitas com o auxílio de um aplicativo de decibelímetro, permitindo a comparação dos níveis sonoros com e sem o uso do protótipo.

Embora o dispositivo seja projetado com potencial de aplicação em ambientes industriais de alto ruído, este trabalho não contempla testes em ambientes industriais reais. A validação será restrita a testes simulados em ambiente doméstico, com base em equipamentos que reproduzem padrões de ruído semelhantes aos encontrados na indústria. Não estão incluídas no escopo a implementação de sistemas de cancelamento de ruído ativo (ANC), o uso de microcontroladores ou algoritmos de processamento digital de sinais, bem como o desenvolvimento de placas de circuito impresso (PCB) ou certificações técnicas (como CA, ISO ou INMETRO). O foco deste trabalho está centrado na comprovação da viabilidade funcional e técnica de um protótipo, voltado à proteção auditiva com comunicação via bluetooth integrada.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma:

- No Capítulo 1, é apresentada a introdução do trabalho, contextualizando a importância da proteção auditiva em ambientes com elevados níveis de ruído, bem como a necessidade de soluções que permitam comunicação eficiente sem comprometer a segurança dos usuários. São abordados os objetivos do projeto e sua justificativa.
- No Capítulo 2, é apresentado o referencial teórico, que aborda os principais conceitos sobre acústica, sistema auditivo, efeitos do ruído na saúde e tecnologias envolvidas no projeto.
- O Capítulo 3 descreve os materiais usados para o desenvolvimento do projeto e os métodos adotados nos testes realizados, abrangendo a seleção dos componentes, montagem do circuito e integração dos dispositivos no abafador de ruído tipo concha.
- O Capítulo 4 reúne os resultados obtidos a partir dos ensaios práticos realizados, contemplando as análises de atenuação sonora, variação de peso após a adaptação, desempenho da comunicação por chamada de voz e autonomia da bateria.

- O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento do protótipo de abafador de ruído com comunicação Bluetooth integrado. Nele, são discutidos os principais resultados, levando em consideração os ensaios realizados, as limitações observadas e as recomendações para aprimoramentos futuros, de forma a consolidar a avaliação final do sistema proposto.

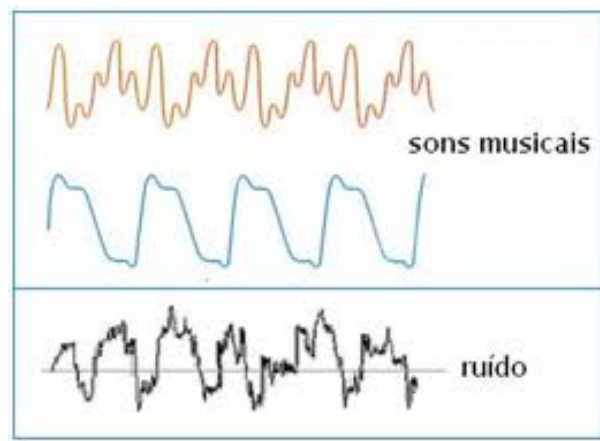
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na atualidade, o ruído tornou-se um dos agentes mais nocivos à saúde, sendo o responsável por uma série de alterações auditivas. O ruído é um dos agentes externos que causam interferência na atividade laboral, expondo situações como a qualidade do ambiente de trabalho.

### 2.1 RUÍDO

O ruído sonoro pode ser definido como qualquer som indesejado, desagradável ou perturbador ao ouvido humano. Diferente de sons organizados e harmônicos, como a música ou a fala, ilustrados na figura 1, o ruído é caracterizado por oscilações sonoras irregulares e sem padrão definido. Ele pode ocorrer em diversos ambientes e situações, sendo uma das formas mais comuns de poluição nas áreas urbanas e industriais (BISTAFF, 2011).

Figura 1 – Diferença entre ondas sonoras musicais e ruído.



Fonte: educacao.sp.gov.br, 2015

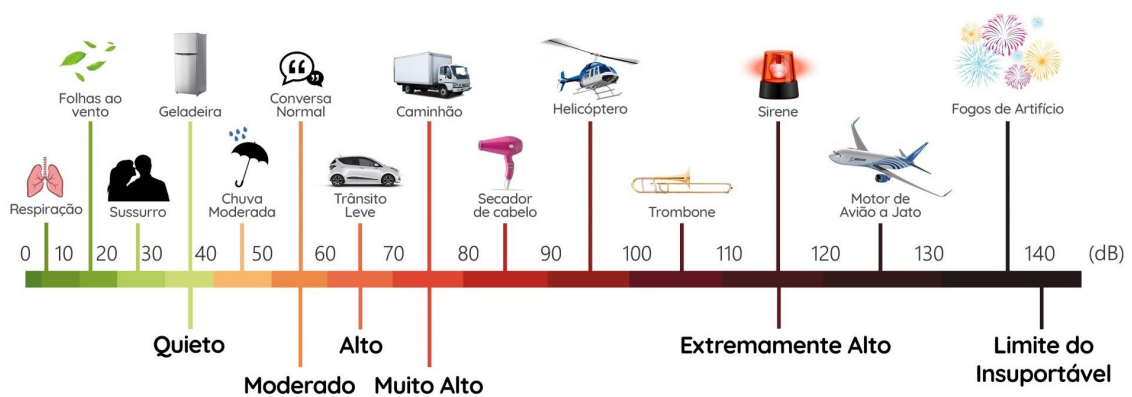
Fisicamente, o ruído é uma vibração mecânica que se propaga pelo ar em forma de ondas sonoras. Essas ondas possuem características como frequência, amplitude e duração, e quando combinadas de forma caótica, geram o que se entende como ruído. O espectro de frequências do ruído geralmente é amplo e desorganizado, o que torna sua percepção auditiva desconfortável ou mesmo nociva, dependendo da intensidade e do tempo de exposição (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2002).

O ruído sonoro é classificado de várias maneiras, podendo ser contínuo, intermitente ou impulsivo. Fontes comuns incluem motores, máquinas, tráfego, construções, eletrodomésticos e aglomerações humanas. Em ambientes de trabalho, o ruído excessivo pode comprometer a concentração, dificultar a comunicação e causar fadiga. Em níveis mais elevados, representa risco à saúde, podendo causar perda auditiva, estresse e outros efeitos fisiológicos e psicológicos (BRASIL, 2020; ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2018).

Com o crescimento das cidades e o avanço da industrialização, o controle e a mitigação do ruído tornaram-se desafios importantes. Por isso, o estudo do ruído sonoro envolve não apenas sua origem e propagação, mas também o desenvolvimento de soluções tecnológicas para sua atenuação, como barreiras acústicas, materiais isolantes e dispositivos eletrônicos, como abafadores de ruído e canceladores ativos (SILVA, 2020) .

A figura 2 apresenta uma Escala de Decibels com exemplos práticos de sons comuns, permitindo visualizar de forma clara como diferentes fontes sonoras se posicionam em relação à intensidade sonora.

Figura 2 – Escala de decibels



fonte: Trascovechis, 2019

Conforme a escala, sons suaves como a respiração (10 dB), folhas ao vento (20 dB) e um sussurro (30 dB) são classificados como níveis de som quietos, geralmente inofensivos ao sistema auditivo. Já ruídos como chuva moderada (50 dB) e conversa normal (60 dB) situam-se em um nível moderado, onde não há risco à audição, mas podem interferir em atividades que exigem concentração. Acima de 70 dB, como o som de trânsito leve ou de um caminhão, o ruído começa a ser considerado alto, podendo gerar desconforto em exposições prolongadas. Níveis entre 80 e 90 dB, como o de um secador de cabelo ou helicóptero, são classificados como "muito altos" e representam risco à audição se a exposição for contínua, especialmente sem o uso de proteção adequada. A partir de 100 dB, como o som de um trombone ou uma sirene, o ruído é considerado "extremamente alto", podendo causar danos auditivos mesmo em curtos períodos de exposição. Sons acima de 120 dB, como o motor de avião a jato, ultrapassam o limiar da dor para muitas pessoas e são potencialmente perigosos mesmo com exposição momentânea. Já os fogos de artifício, que podem atingir 140 dB, representam o limite do insuportável para o sistema auditivo humano, com alto risco de lesão imediata (BRASIL, 2020; SANTOS, 2019) .

### 2.1.1 Efeitos do ruído

O ruído excessivo em ambientes laborais configura-se como um dos principais agentes de risco à saúde ocupacional, sendo responsável por uma ampla gama de efeitos deletérios à

saúde física e mental dos trabalhadores. A exposição contínua a altos níveis de pressão sonora pode ocasionar desde desconforto e fadiga até quadros de perda auditiva irreversível. De acordo com a Norma Regulamentadora 15 (NR-15), do Ministério do Trabalho e Emprego, o limite de tolerância para a exposição ao ruído contínuo ou intermitente é de 85 decibels A [dB(A)]<sup>1</sup> durante uma jornada de trabalho de 8 horas. Acima desse nível, a exposição torna-se potencialmente nociva, exigindo medidas de controle ambiental e o uso obrigatório de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) (BRASIL, 2023).

Um dos efeitos mais graves associados à exposição prolongada ao ruído é a Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR). Esta condição caracteriza-se pela deterioração progressiva da capacidade auditiva, especialmente nas frequências mais agudas, resultante da destruição das células ciliadas localizadas na cóclea, estrutura sensorial do ouvido interno. Essas células são responsáveis pela transdução das ondas sonoras em impulsos elétricos que são interpretados pelo cérebro como som. Uma vez danificadas, essas células não se regeneram, o que torna a perda auditiva irreversível (GUYTON; HALL, 2017). A PAIR é classificada como uma doença ocupacional e está entre as enfermidades mais comuns relacionadas ao trabalho em ambientes ruidosos. Sua progressão é insidiosa, geralmente imperceptível nos estágios iniciais, o que dificulta o diagnóstico precoce. Com o tempo, a perda auditiva tende a se intensificar, comprometendo significativamente a capacidade de comunicação e, conseqüentemente, a qualidade de vida do trabalhador. Entre os primeiros sinais da PAIR, destacam-se a dificuldade em compreender a fala, especialmente em ambientes com ruído de fundo, e a percepção de sons abafados ou distorcidos (FERREIRA JUNIOR et al., 2019). Além do impacto direto na audição, a PAIR também pode ter implicações psicossociais consideráveis. Indivíduos com perda auditiva não tratada frequentemente enfrentam isolamento social, queda de autoestima, dificuldades de relacionamento interpessoal e redução da produtividade no trabalho. Há ainda evidências científicas que associam a perda auditiva crônica a um aumento no risco de desenvolvimento de distúrbios cognitivos, como demência (LIN; ALLEMAN; LUSTIG, 2020).

A comunicação no ambiente de trabalho também é seriamente comprometida pela presença de ruídos intensos, que dificultam a compreensão de comandos verbais e o reconhecimento de sinais sonoros de advertência, elevando o risco de acidentes e comprometendo a segurança coletiva. Em setores como construção civil, indústria metalúrgica, mineração, transportes e aeroportos, é comum a ocorrência de níveis sonoros que ultrapassam os 100 dB(A), tornando imprescindível a adoção de estratégias eficazes de prevenção, como o isolamento acústico de fontes geradoras de ruído, o monitoramento periódico dos níveis de pressão sonora e a conscientização dos trabalhadores quanto ao uso correto dos EPIs (FUNDACENTRO, 2018).

Os efeitos do ruído não se restringem apenas ao sistema auditivo. A exposição prolongada a ambientes ruidosos está relacionada a uma série de conseqüências extra-auditivas,

<sup>1</sup> "dB" refere-se à unidade de medida de decibels, que indica a intensidade do som. "dBA", por outro lado, é a medida de decibels ponderada A, que leva em conta a resposta do ouvido humano a diferentes frequências.

incluindo elevação da pressão arterial, aumento dos níveis de estresse, distúrbios do sono, irritabilidade, fadiga mental e, em casos mais severos, transtornos de ansiedade e depressão. A Organização Mundial da Saúde (OMS) alerta que níveis de ruído superiores a 55 dB(A) durante a noite já são suficientes para interferir no sono e prejudicar os processos fisiológicos de recuperação do organismo, refletindo diretamente no desempenho e produtividade do trabalhador ao longo do dia (WHO, 2018).

Portanto, a prevenção da PAIR e dos demais efeitos adversos do ruído ocupacional deve ser uma prioridade nas políticas de saúde e segurança do trabalho. Isso inclui não apenas a aplicação rigorosa das normas regulamentadoras, mas também a implementação de programas de conservação auditiva, que englobam ações como a realização de exames audiométricos periódicos, a educação dos trabalhadores sobre os riscos do ruído e o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem a comunicação eficiente mesmo em ambientes com altos níveis de pressão sonora (ROCHA; ROSA, 2021).

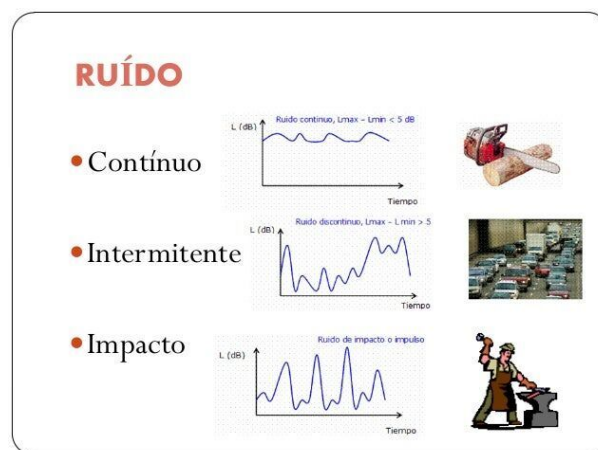
Em um estudo de caso realizado em uma indústria metalúrgica de médio porte no estado de São Paulo, constatou-se que 62% dos trabalhadores avaliados apresentavam algum grau de perda auditiva, sendo que 35% já estavam em estágio moderado a severo. A análise indicou que, embora o uso de protetores auriculares fosse obrigatório, muitos trabalhadores os utilizavam de forma inadequada ou intermitente, o que contribuiu significativamente para os resultados negativos. Após a implantação de um Programa de Conservação Auditiva (PCA), com ações educativas, audiometrias periódicas e fiscalização intensiva do uso de EPIs, observou-se uma redução de 48% nos casos de progressão da PAIR em apenas dois anos (SILVA et al., 2022).

## **2.1.2 Características dos ruídos**

O ruído sonoro pode ser analisado a partir de três características fundamentais: frequência, amplitude e duração. A frequência diz respeito ao número de oscilações da onda sonora por segundo, sendo medida em hertz. Essa propriedade está diretamente associada ao tom percebido pelo ouvido humano: sons de baixa frequência (inferiores a 500 Hz) são percebidos como graves, enquanto sons de alta frequência (acima de 2000 Hz) são percebidos como agudos. A sensibilidade da audição humana é mais acentuada na faixa de 1000 a 4000 Hz, justamente a região mais suscetível a danos em exposições ocupacionais prolongadas (GUYTON; HALL, 2017; WHO, 2018). A amplitude, por sua vez, está relacionada à intensidade ou à pressão sonora da onda acústica, sendo medida em decibels. Trata-se de uma medida logarítmica que indica o nível de energia do som, ou seja, o volume percebido. Amplitudes elevadas são mais agressivas ao sistema auditivo, especialmente quando combinadas com exposições prolongadas (FERREIRA JUNIOR et al., 2019). Já a duração representa o tempo em que o indivíduo permanece exposto a determinado estímulo sonoro. Ainda que sons de baixa intensidade possam parecer inofensivos, sua ação contínua ao longo de horas pode ter efeitos cumulativos no sistema auditivo (FUNDACENTRO, 2018).

Além dessas propriedades físicas, o ruído pode ser classificado segundo seu comportamento temporal em três tipos principais: contínuo, intermitente e impulsivo (impacto). O ruído contínuo é aquele que se mantém relativamente constante por longos períodos de tempo, como ocorre com o funcionamento de turbinas, geradores e ventiladores industriais. Esse tipo de ruído, embora aparentemente estável, pode ser extremamente prejudicial quando o trabalhador é exposto sem pausas adequadas, pois a constância impede a recuperação auditiva entre os episódios de exposição (ROCHA; ROSA, 2021). O ruído intermitente é caracterizado por variações regulares ou irregulares de intensidade sonora, alternando momentos de silêncio com ruído. É comum em ambientes industriais onde máquinas operam em ciclos, ligando e desligando em determinados intervalos. Embora menos agressivo do que o ruído contínuo em termos de sobrecarga auditiva, o ruído intermitente ainda representa risco considerável, especialmente quando os intervalos de silêncio são curtos demais para permitir a recuperação auditiva completa (BRASIL, 2023). O ruído impulsivo ou impacto, por fim, é considerado o mais perigoso para a integridade auditiva. Ele é composto por picos sonoros de curta duração e alta intensidade, ocorrendo em frações de segundo, como em explosões, disparos de armas de fogo ou batidas metálicas violentas. Esse tipo de ruído pode causar trauma acústico, lesão aguda no ouvido interno, mesmo quando a exposição é única e breve. O risco se agrava pelo fato de que ruídos impulsivos muitas vezes ultrapassam 120 dB(A), um limiar próximo ao limiar da dor auditiva, e podem exceder os limites fisiológicos de tolerância do ouvido humano (WHO, 2018; GUYTON; HALL, 2017). A figura 3 ilustra as ondas sonoras de um ruído contínuo, intermitente e impacto.

Figura 3 – Ruído contínuo, intermitente e impacto.



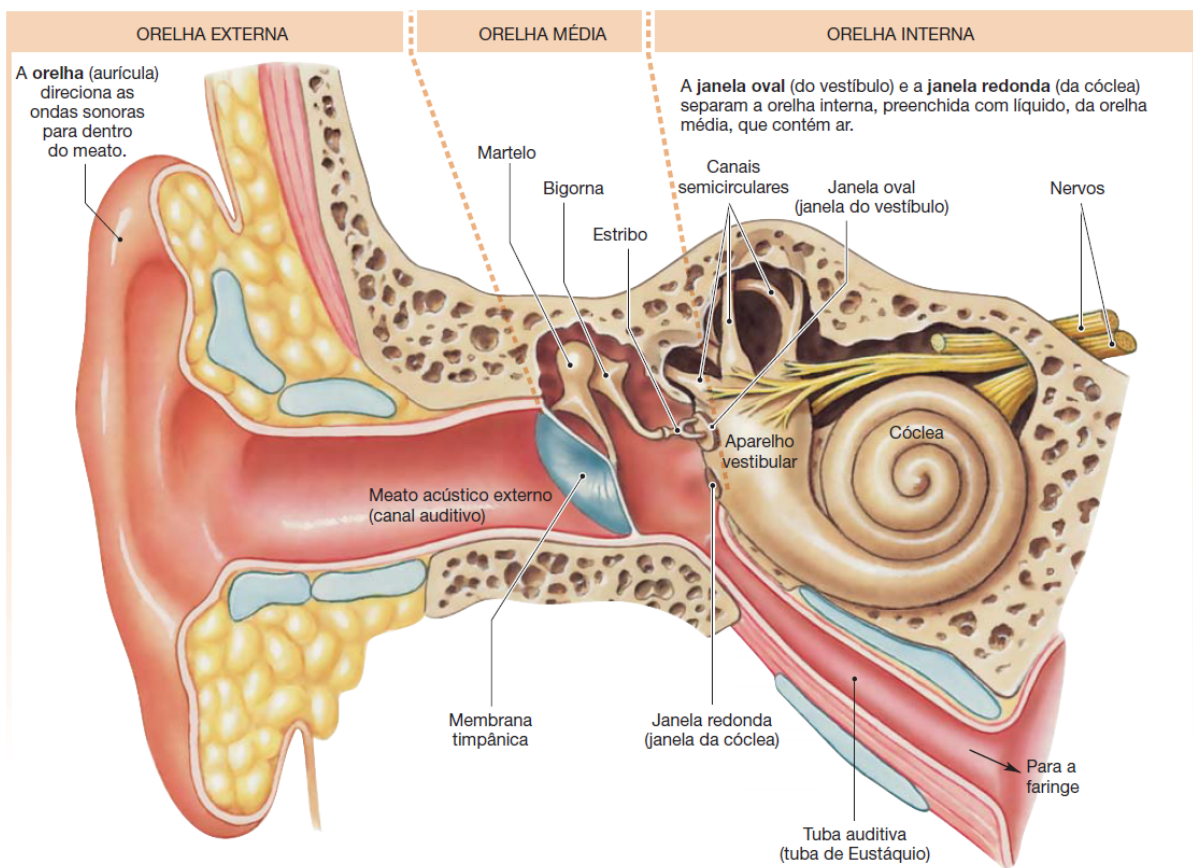
Fonte: Secretaria de Estado de Saúde do Distrito Federal 2022

A compreensão dessas características é essencial para a elaboração de estratégias eficazes de prevenção e controle da exposição ocupacional ao ruído. A análise da frequência, amplitude e duração, aliada à classificação temporal do ruído, permite um dimensionamento mais preciso dos riscos envolvidos e a aplicação de medidas técnicas e administrativas mais adequadas, como o uso de barreiras acústicas, pausas programadas, rotação de tarefas e EPIs específicos (FUNDACENTRO, 2018; SILVA et al., 2022).

## 2.2 SISTEMA AUDITIVO

O sistema auditivo humano representado na figura 4 é um conjunto de estruturas que permite a captação, condução e interpretação dos sons, sendo essencial para a comunicação, socialização, aprendizado e segurança. Ele é composto por três regiões funcionais: orelha externa, média e interna. A orelha externa inclui o pavilhão auricular, responsável por captar as ondas sonoras do ambiente e direcioná-las para o canal auditivo externo, que atua como amplificador natural, especialmente em frequências entre 2000 e 4000 Hz, faixa crítica para a compreensão da fala (GUYTON; HALL, 2017).

Figura 4 – Divisão anatômica da orelha.



Fonte: Adaptado de Silverthorn, 2017.

Ao final do canal auditivo encontra-se a membrana timpânica, que vibra em resposta às ondas sonoras e transmite essa vibração para os ossículos auditivos localizados na orelha média. Os ossículos, formados pelo martelo, bigorna e estribo, constituem a menor cadeia de ossos do corpo humano e têm como função amplificar mecanicamente o som antes de transmiti-lo à orelha interna. Essa amplificação é fundamental para que a energia sonora consiga atravessar o meio líquido da cóclea, uma estrutura espiralada com cerca de 2,5 voltas (KEITHLEY, 2020).

A cóclea contém os líquidos endolinfa e perilinfa, que se movimentam em resposta às vibrações transmitidas pela janela oval. No interior da cóclea encontra-se o órgão de Corti, res-

ponsável pela transdução mecânico-elétrica do som. Nele, células ciliadas internas transformam o movimento da membrana basilar em sinais elétricos, enquanto células ciliadas externas atuam amplificando mecanicamente as vibrações recebidas (HUDSPETH, 2014; SALVI et al., 2022). Esses sinais elétricos seguem pelo nervo coclear, que integra o nervo vestibulococlear (VIII par craniano), até o tronco encefálico, onde são processados por uma série de estruturas como o núcleo coclear, colículo inferior e corpo geniculado medial, até atingir o córtex auditivo primário no lobo temporal, onde o som é finalmente interpretado. Esse processamento neural envolve a decodificação de frequência, intensidade e localização espacial do som, sendo uma das funções sensoriais mais complexas do corpo humano (KANOLD; KARA, 2019).

Além da audição, a orelha interna abriga o sistema vestibular, composto pelos canais semicirculares, o utrículo e o sáculo, que são responsáveis pelo equilíbrio e orientação espacial. Os canais semicirculares detectam rotações da cabeça, enquanto o utrículo e o sáculo respondem à aceleração linear e à gravidade. Essa informação é combinada com os sinais visuais e proprioceptivos para manter o equilíbrio corporal e coordenar os movimentos oculares e posturais (GUYTON; HALL, 2017; PURVES et al., 2019).

Disfunções em qualquer uma dessas estruturas podem levar a diferentes tipos de perda auditiva. A perda auditiva condutiva ocorre por falhas na condução do som na orelha externa ou média, como em casos de otites, perfuração do tímpano ou otosclerose. A perda auditiva sensorioneural, por sua vez, resulta de danos nas células ciliadas da cóclea ou no nervo auditivo, e pode ser causada por exposição a ruídos intensos, medicamentos ototóxicos ou envelhecimento (presbiacusia) (WHO, 2021). Quando há comprometimento tanto da condução quanto da transdução, caracteriza-se a perda auditiva mista.

Compreender o funcionamento detalhado do sistema auditivo é essencial para o desenvolvimento de tecnologias voltadas à proteção e reabilitação da audição. Engenharia Elétrica e áreas afins têm explorado esse conhecimento para projetar aparelhos auditivos, dispositivos de proteção auditiva eletrônicos, algoritmos de cancelamento ativo de ruído e sistemas de comunicação robustos para ambientes ruidosos, como fábricas e aeroportos. Ao simular ou complementar as funções fisiológicas do ouvido humano, essas tecnologias têm impacto direto na saúde ocupacional e na qualidade de vida de milhões de pessoas (BENEDICTO; LEMOS, 2020; WANG; CHEN, 2023).

### **2.2.1 Percepção sonora**

A percepção sonora é a capacidade do ser humano de interpretar os sons provenientes do ambiente, atribuindo-lhes significado e contexto. Essa percepção envolve diversos atributos físicos do som que são traduzidos em sensações subjetivas, permitindo ao indivíduo reconhecer e reagir aos estímulos auditivos. Um dos principais aspectos perceptíveis é a intensidade, que está relacionada ao volume do som. Sons com maior pressão sonora são percebidos como mais altos, embora essa percepção varie conforme a frequência e a sensibilidade auditiva individual.

Sons de baixa frequência são percebidos como graves, enquanto sons de alta frequência são percebidos como agudos. O ouvido humano é capaz de perceber frequências que, em geral, variam entre 20 Hz e 20.000 Hz, com maior sensibilidade entre 1.000 e 4.000 Hz, faixa crucial para a compreensão da fala. Além disso, o timbre é um atributo que permite distinguir entre diferentes fontes sonoras, mesmo quando elas emitem sons da mesma frequência e intensidade. Essa característica é determinada pela estrutura harmônica do som e pela forma de onda, sendo essencial para reconhecer vozes, instrumentos e ambientes (BRASIL, 2020).

A percepção sonora também permite a localização espacial do som, possibilitando ao indivíduo identificar a direção e a distância da fonte sonora (GLASBERG, 2005). Essa capacidade se baseia em diferenças de tempo e intensidade entre os sons que chegam aos dois ouvidos, sendo fundamental em ambientes ruidosos e para a orientação espacial. A duração e a modulação do som são igualmente percebidas, permitindo diferenciar entre sons curtos e longos, ritmos e variações no volume ou na frequência. Além das propriedades físicas, o ser humano também interpreta o conteúdo simbólico e emocional dos sons. A partir da experiência e do contexto cultural, é possível identificar a intenção comunicativa por trás de uma fala, reconhecer emoções na entonação da voz, associar determinados sons a situações de perigo ou conforto e até evocar memórias. Assim, a percepção sonora desempenha papel central na comunicação, na cognição e na interação com o meio, sendo essencial para a qualidade de vida e segurança auditiva do indivíduo (SCHAFER, 1994).

### **2.2.2 Perda de audição**

A perda de audição é uma condição que afeta milhões de pessoas em todo o mundo e pode ter impactos significativos na qualidade de vida, comunicação, aprendizado e inserção social. Ela ocorre quando há algum comprometimento na capacidade do sistema auditivo em captar, transmitir ou processar sons. Essa deficiência pode se manifestar de forma leve, moderada, severa ou profunda, e pode afetar um ou ambos os ouvidos (WHO, 2021).

O processo auditivo normal envolve a captação de ondas sonoras pelo ouvido externo, que são conduzidas pelo canal auditivo até o tímpano. As vibrações sonoras então passam pelos ossículos (martelo, bigorna e estribo) no ouvido médio até alcançar a cóclea, no ouvido interno, onde são convertidas em sinais elétricos e transmitidas ao cérebro pelo nervo auditivo. A perda auditiva pode ocorrer quando há falha em qualquer parte desse processo (GUYTON; HALL, 2017).

As causas mais comuns de perda auditiva incluem a exposição a ruídos intensos, como os presentes em ambientes industriais ou shows musicais; o envelhecimento natural do sistema auditivo, conhecido como presbiacusia; infecções crônicas no ouvido; o uso de medicamentos ototóxicos; traumas cranianos; e doenças de origem genética ou congênita. Os tipos mais comuns de perda auditiva incluem a perda auditiva condutiva, a perda auditiva neurossensorial e a perda auditiva mista. A perda auditiva condutiva é causada por problemas no ouvido externo

ou médio que impedem a condução do som até o ouvido interno. Suas causas mais comuns incluem obstruções, como acúmulo de cera ou corpos estranhos, infecções como a otite média e perfurações do tímpano. Em geral, esse tipo de perda auditiva é tratável com medicamentos ou cirurgia.

A perda auditiva neurossensorial ocorre quando há danos na cóclea ou no nervo auditivo. É o tipo mais frequente, especialmente entre pessoas idosas, e costuma ser permanente. A principal causa é a presbiacusia (perda auditiva relacionada à idade), embora também possa ser provocada por exposição prolongada a ruídos intensos e infecções virais. Por fim, a perda auditiva mista combina características da perda condutiva e da neurossensorial, afetando tanto o ouvido médio quanto o interno. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), cerca de 1,5 bilhão de pessoas no mundo vivem com algum grau de perda auditiva. Dessas, aproximadamente 430 milhões necessitam de serviços de reabilitação auditiva (OMS, 2021). Estima-se que até 2050, quase 2,5 bilhões de pessoas terão algum grau de perda auditiva, sendo que mais de 700 milhões precisarão de reabilitação. A presbiacusia, por sua vez, afeta cerca de uma em cada três pessoas com mais de 65 anos (Gates; Mills, 2005). Segundo o Estudo da Carga Global de Doenças (Global Burden of Disease Study, 2019), a perda auditiva é a terceira principal causa de Anos Vividos com Deficiência (YLDs) em todo o mundo (GBD, 2019).

### 2.3 PROTETORES AURICULARES

Os protetores auriculares são dispositivos essenciais para a preservação da saúde auditiva em ambientes com altos níveis de ruído. Seu principal objetivo é reduzir a intensidade sonora que chega ao ouvido interno, prevenindo danos auditivos temporários ou permanentes causados pela exposição excessiva ao som.

Os protetores auriculares modernos são classificados em duas categorias principais: os de inserção (intra-auriculares) e os do tipo concha (circum-auriculares) mostrados na figura 5. Os protetores de inserção incluem modelos de silicone(1), espuma(2) ou moldados sob medida, inseridos diretamente no canal auditivo. Já os do tipo concha(3) são compostos por fones que envolvem toda a orelha externa, oferecendo maior isolamento em ambientes de ruído intenso, como fábricas, aeroportos e áreas industriais (SANTOS; NASCIMENTO, 2021).

Além da indústria, o uso de protetores auriculares também se expandiu para outros contextos, como atividades de lazer, esportes (especialmente o tiro esportivo), música e até no sono, para pessoas sensíveis ao ruído ambiente. A popularização dos fones com Cancelamento de Ruído Ativo (ANC – *Active Noise Cancelling*) também contribuiu para o desenvolvimento de tecnologias híbridas que aliam proteção auditiva e comunicação, fundamentais em ambientes onde o ruído é elevado, mas a comunicação precisa ser mantida.

Figura 5 – Protetores auriculares tipo concha e tipo inserção



Fonte: Conecta FG (2023).

A eficácia dos protetores auriculares depende da correta escolha e uso do dispositivo. Estudos mostram que a proteção pode ser significativamente reduzida se o dispositivo não for inserido corretamente ou se houver incompatibilidade entre o protetor e o usuário. Por isso, programas de conservação auditiva em ambientes ocupacionais incluem treinamentos específicos sobre o uso, higienização e manutenção dos protetores (NIOSH, 1998).

Com o avanço das regulamentações de saúde e segurança, como a NR-15 no Brasil, o uso de protetores auriculares tornou-se obrigatório em ambientes onde os níveis de ruído ultrapassam os limites de tolerância estabelecidos. O fornecimento de EPIs, incluindo protetores auriculares, é responsabilidade do empregador, conforme prevê a legislação trabalhista (BRASIL, 2019).

Em suma, os protetores auriculares representam uma das ferramentas mais importantes para a prevenção de perdas auditivas induzidas por ruído. Sua aplicação adequada garante a proteção da saúde auditiva dos trabalhadores e usuários expostos a ambientes ruidosos, evidenciando a importância da conscientização, do treinamento contínuo e do avanço tecnológico na área de segurança ocupacional.

### 2.3.1 Classificação quanto ao tipo de protetores auriculares

A classificação dos protetores auriculares pode ser feita com base em diversos critérios, como o modo de uso, a forma de aplicação, o tipo de tecnologia empregada e o nível de proteção oferecido. Cada tipo apresenta características específicas que o tornam mais adequado para determinadas condições de trabalho, ambientes ou preferências do usuário (ABNT NBR 16076, 2016; NIOSH, 1998).

A seguir, apresenta-se a classificação mais comum dos protetores auditivos:

a) Protetores de Inserção (intra-auriculares): são dispositivos que se encaixam dentro do canal auditivo, formando uma vedação parcial ou total. São amplamente utilizados devido à sua praticidade, portabilidade e custo relativamente baixo. Podem ser moldáveis (espuma) ou pré-moldados (silicone ou polímeros) (ABNT NBR 16076, 2016; LEE et al., 2005).

b) Protetores Tipo Concha (circum-auriculares): esses protetores envolvem toda a orelha externa, formando uma barreira física contra a entrada de som. São eficazes contra ruídos de alta intensidade e geralmente mais confortáveis para uso prolongado. Também são conhecidos como abafadores tipo concha (OSHA, 2019; NIOSH, 1998).

c) Protetores Eletrônicos: incluem tecnologias de cancelamento ativo de ruído (ANC – *Active Noise Cancelling*) ou sistemas de amplificação seletiva, permitindo a atenuação de ruídos prejudiciais sem comprometer a comunicação. São indicados para ambientes com ruído intermitente ou onde há necessidade de comunicação verbal e percepção sonora ambiente (YOUNG, 2006; BENTO et al., 2014).

d) Protetores Personalizados: são moldados sob medida para o canal auditivo de cada indivíduo. Oferecem melhor vedação, conforto e eficiência, sendo ideais para uso contínuo e em ambientes que exigem alta performance de proteção (TWA et al., 2004).

Essa ampla variedade permite que empregadores e profissionais da saúde ocupacional escolham os modelos mais eficazes de acordo com o tipo de ruído, tempo de exposição, perfil do trabalhador e requisitos ergonômicos (ABNT NBR 16076, 2016; OSHA, 2019).

### **2.3.2 Protetores do tipo plug ou inserção**

Os protetores auditivos do tipo plug, também conhecidos como protetores de inserção, são dispositivos inseridos diretamente no canal auditivo com o objetivo de atenuar a entrada de ruídos prejudiciais. Eles são utilizados em ambientes industriais, em atividades recreativas com alto nível de ruído e até mesmo para fins pessoais, como o sono ou a concentração. Existem diferentes tipos de protetores tipo plug, classificados principalmente quanto ao material, formato e modo de adaptação ao ouvido. Entre os mais comuns estão os protetores de espuma moldável, os de silicone reutilizáveis e os modelos personalizados, feitos sob medida para o canal auditivo do usuário. Cada tipo apresenta características específicas de conforto, durabilidade e nível de atenuação sonora, sendo indicados conforme a intensidade do ruído e as necessidades individuais.

Protetores de Espuma Expansível são fabricados com espuma de poliuretano ou PVC. Antes da inserção, devem ser comprimidos com os dedos e, uma vez colocados no canal auditivo, expandem-se para se adaptar ao formato interno da orelha, proporcionando uma boa vedação. Esses protetores são descartáveis e amplamente utilizados devido ao seu baixo custo, boa capacidade de atenuação sonora e fácil disponibilidade. No entanto, apresentam como desvantagens o fato de serem de uso único, exigirem uma técnica correta de inserção para que se-

jam eficazes e serem sensíveis à umidade (ABNT NBR 16076, 2016; NIOSH, 1998; COUTO, 2007).

Protetores Pré-moldados, por sua vez, são feitos de silicone ou borracha termoplástica e vêm prontos para uso. São reutilizáveis e geralmente contam com alças ou hastes que facilitam a colocação e a remoção. Entre suas principais vantagens estão a possibilidade de reutilização, a resistência à umidade e a facilidade de higienização. Contudo, esses protetores podem não se ajustar perfeitamente a todos os canais auditivos e, em alguns casos, oferecem uma vedação inferior à dos protetores moldados sob medida (BENTO et al., 2014; OSHA, 2019).

Já os Protetores Moldados Sob Medida, mostrados na figura 6, são confeccionados individualmente a partir de moldes do canal auditivo do usuário, sendo produzidos em clínicas especializadas ou laboratórios de fonoaudiologia. Esses dispositivos oferecem proteção ideal em situações de uso prolongado e exposição constante a níveis elevados de ruído. Suas principais vantagens incluem máxima vedação, alto conforto, excelente desempenho acústico e longa durabilidade. Em contrapartida, apresentam um custo mais elevado, demandam tempo para a confecção e requerem acompanhamento profissional para ajustes e manutenção adequados (TWA et al., 2004; LEE et al., 2005).

Figura 6 – Protetores moldados sob medida.



Fonte: Audinove

### **2.3.3 Protetores do tipo concha**

Os protetores auriculares do tipo concha, também conhecidos como abafadores auriculares, são dispositivos de proteção auditiva projetados para cobrir completamente as orelhas externas. Seu principal objetivo é reduzir a exposição a ruídos intensos, criando uma barreira física que bloqueia e absorve as ondas sonoras antes que atinjam o tímpano. Esses protetores são amplamente utilizados em ambientes com altos níveis de ruído contínuo ou intermitente, como indústrias, aeroportos, canteiros de obras e áreas de mineração (ABNT, 2016; OSHA, 2019).

Em termos de composição, os protetores tipo concha possuem uma estrutura robusta formada por diversos elementos. As conchas externas rígidas, geralmente feitas de polímeros resistentes como o plástico ABS, bloqueiam fisicamente a entrada do som. No interior, cama-

das de espuma absorvem parte da energia sonora, reduzindo sua propagação. As espumas de vedação, localizadas nas bordas das conchas, oferecem conforto ao usuário e garantem vedação acústica. Um arco de sustentação, feito de metal ou plástico flexível, conecta as duas conchas e permite o ajuste adequado à cabeça. Em alguns modelos, há também uma câmara acústica, desenhada para dispersar as ondas sonoras antes que elas cheguem ao ouvido.

O funcionamento desses dispositivos baseia-se na atenuação passiva do som. Ao cobrirem totalmente as orelhas, os abafadores impedem que as ondas sonoras entrem diretamente no canal auditivo. A combinação entre as barreiras físicas das conchas e os materiais internos absorventes reduz significativamente a intensidade do som percebido pelo usuário (COUTO, 2007; NIOSH, 1998). Além disso, alguns modelos mais modernos incorporam sistemas de atenuação ativa de ruído, como o ANC, que utiliza microfones para captar o som ambiente e gerar uma onda sonora inversa, anulando o ruído original. Essa tecnologia é especialmente eficaz em sons contínuos e de baixa frequência (LEE et al., 2005).

Por fim, há os abafadores acopláveis a capacetes, desenvolvidos especialmente para uso conjunto com equipamentos de proteção individual em áreas como construção pesada e mineração. Esses dispositivos são recomendados para ambientes onde o nível de ruído excede 85 dB, especialmente em situações em que o trabalhador precisa de proteção auditiva por períodos prolongados, necessita remover e recolocar o protetor com frequência, ou ainda utiliza outros EPIs que inviabilizam o uso de protetores intra-auriculares (BENTO et al., 2014).

Entre as principais vantagens dos abafadores tipo concha estão a excelente atenuação de ruídos, especialmente os de alta frequência; o fato de não exigirem inserção no canal auditivo; a facilidade de colocação e retirada; a existência de modelos com comunicação ou eletrônica integrada; e a compatibilidade com capacetes em versões específicas. No entanto, também apresentam algumas desvantagens, como o desconforto em ambientes quentes, menor eficácia na atenuação de ruídos de baixa frequência, peso e volume relativamente maiores, interferência no uso de outros EPIs e, no caso de modelos mais sofisticados, custo mais elevado. Quando bem conservado, um abafador tipo concha pode ter uma vida útil de dois a cinco anos, dependendo da frequência de uso e das condições do ambiente (OSHA, 2019).

Do ponto de vista normativo, os protetores tipo concha devem atender a exigências técnicas que assegurem sua eficácia e segurança. No Brasil, a Norma Regulamentadora NR-6 estabelece a obrigatoriedade de que esses dispositivos possuam Certificado de Aprovação (CA). No âmbito internacional, destacam-se normas como a ANSI S3.19 (EUA), que trata dos métodos de teste de atenuação sonora; a EN 352 (Europa), que especifica requisitos gerais de desempenho e segurança; e a CSA Z94.2 (Canadá), voltada à seleção, uso e manutenção de protetores auditivos.

### 2.3.4 Testes de atenuação dos protetores auriculares

A eficácia dos protetores auriculares está diretamente relacionada à sua capacidade de atenuar o som que chega ao ouvido interno. Para garantir que esses dispositivos oferecem proteção adequada, são realizados testes de atenuação acústica, que medem a redução do nível de pressão sonora proporcionada pelo protetor. Esses testes seguem normas técnicas nacionais e internacionais, como a ANSI S3.19 (EUA), a ISO 4869 (Europa) e a NBR 16076 (Brasil).

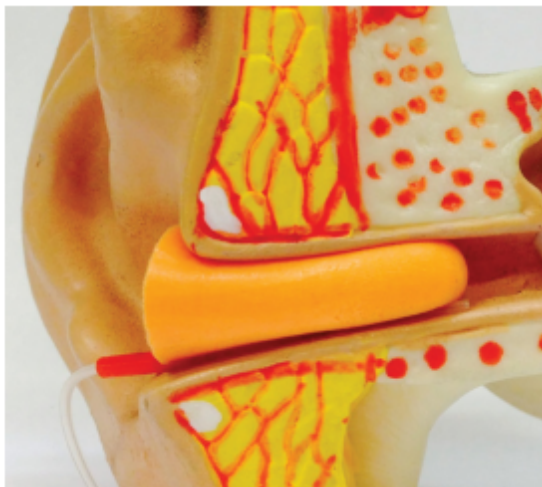
A principal medida utilizada para quantificar a atenuação é o NRR (Noise Reduction Rating), ou nível de redução de ruído. O NRR é expresso em dB e indica a média de atenuação que um protetor proporciona em condições laboratoriais. Por exemplo, um protetor com NRR de 25 dB pode reduzir um ruído de 100 dB para aproximadamente 75 dB, considerando o uso correto do equipamento (OSHA, 2008).

Existem dois principais métodos utilizados para medir a atenuação dos protetores auriculares. O primeiro é o método Real-Ear at Threshold (REAT), esse método consiste na medição do limiar auditivo de voluntários, tanto com quanto sem o uso do protetor auricular, em uma câmara anecoica, um ambiente projetado para eliminar reflexões sonoras. A diferença entre os dois limiares obtidos representa o nível de atenuação fornecido pelo protetor em diferentes faixas de frequência, que normalmente variam de 125 Hz a 8000 Hz. O REAT é reconhecido pela sua elevada precisão, conforme estabelecido na norma ISO 4869-1 (2018).

O segundo método (figura 7) é conhecido como Microfone-In-Real-Ear (MIRE). Diferente do REAT, esse método faz uso de pequenos microfones posicionados simultaneamente dentro e fora do canal auditivo, permitindo medir diretamente o som ambiente e o som que efetivamente chega ao ouvido do usuário enquanto ele utiliza o protetor. O MIRE oferece resultados mais rápidos e objetivos, sendo particularmente útil para avaliações em campo e testes de vedação individual. Contudo, esse método apresenta menor sensibilidade na detecção de sons de baixa intensidade e, por isso, é frequentemente utilizado como uma ferramenta complementar nas avaliações, conforme destacado por Fink (2019).

Além dos testes laboratoriais padronizados, existem os Fit-Testing ou testes de ajuste individual. Esses testes avaliam se um determinado usuário está utilizando corretamente o protetor, considerando variações anatômicas, posicionamento e tipo de dispositivo. Um exemplo é o sistema 3M E-A-Rfit, que mede a PAR (Personal Attenuation Rating), um valor individual de atenuação, permitindo verificar se o EPI está sendo eficaz para aquele trabalhador específico. Esse tipo de teste é extremamente importante, pois estudos mostram que muitos usuários, mesmo com protetores de alta qualidade, não recebem a proteção esperada devido ao uso inadequado ou ao posicionamento incorreto do EPI (SANTOS; NASCIMENTO, 2021).

Figura 7 – Método MIRE.



Fonte: Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH)

### 2.3.5 Normas e regulamentações sobre protetores auditivos

Em relação à regulamentação de protetores auditivos, incluindo os do tipo concha, é importante destacar que não existe legislação que imponha limites máximos de peso para os abafadores de ruído. O peso é tratado como um fator ergonômico, sendo responsabilidade do fabricante garantir conforto e usabilidade em jornadas prolongadas (EN 458, 2016).

No Brasil, a legislação trabalhista, por meio da Norma Regulamentadora NR-15 e do Programa de Conservação Auditiva (PCA) previsto na NR-6, determina que os trabalhadores expostos a níveis de pressão sonora acima dos limites de tolerância devem utilizar protetores auditivos devidamente certificados. Esses dispositivos devem possuir Certificado de Aprovação (CA) emitido pelo Ministério do Trabalho e Emprego, o que garante que passaram por ensaios padronizados de desempenho (BRASIL, NR-15, 2023; BRASIL, NR-6, 2023).

Internacionalmente, normas como a ISO 4869-1 e ISO 4869-2 definem métodos laboratoriais e de campo para a medição da atenuação sonora de protetores auditivos, estabelecendo parâmetros como HML (High, Medium, Low) e SNR (Single Number Rating), que indicam a atenuação em diferentes faixas de frequência. De forma geral, espera-se que os abafadores de ruído sejam capazes de reduzir o nível de exposição sonora a valores inferiores a 85 dB(A), conforme limite amplamente aceito por organismos internacionais como a OSHA (Occupational Safety and Health Administration) nos Estados Unidos e a União Europeia por meio da diretiva 2003/10/CE (ISO 4869-1, 2018; OSHA, 1910.95; UNIÃO EUROPEIA, 2003).

Assim, ainda que não exista uma lei que determine valores fixos de atenuação que todo abafador deva cumprir, os dispositivos precisam ser certificados segundo normas técnicas que asseguram sua eficácia. Os resultados dos testes realizados em laboratório são divulgados pelos fabricantes na forma de tabelas de atenuação, que informam ao usuário final a proteção real

esperada em diferentes frequências de ruído (ISO 4869-2, 2018).

## 2.4 TRABALHOS RELACIONADOS

Para embasar o desenvolvimento deste projeto, foram analisados alguns trabalhos presentes na literatura que abordam tecnologias similares, especialmente na área de redução de ruído.

### 2.4.1 Verificação dos níveis de atenuação de protetores auriculares do tipo concha, utilizando microfone sonda

No trabalho intitulado como Verificação dos Níveis de Atenuação de Protetores Auriculares do tipo Concha, utilizando Microfone Sonda, do autor Nelson Augusto Neto teve como objetivo verificar o nível real de atenuação sonora de três modelos de protetores auriculares do tipo concha, comparando os valores informados nos respectivos Certificados de Aprovação (CA) com os valores obtidos experimentalmente. Para isso, foi utilizado um microfone sonda posicionado no canal auditivo dos participantes durante os testes. Os modelos analisados foram: 3M 1445, AGENA ARS e MSA SORDIN CC. A motivação para a realização desta análise parte da constatação de que o ruído é um dos agentes físicos mais comuns em ambientes industriais e urbanos, sendo responsável por danos auditivos permanentes quando a exposição ocorre de forma prolongada e sem proteção adequada. Embora os protetores auditivos sejam amplamente recomendados e utilizados, sua eficácia pode ser comprometida por diversos fatores, como desgaste do material, falhas na vedação e uso incorreto por parte dos usuários. Diversos estudos indicam que os valores de atenuação sonora fornecidos pelos fabricantes são obtidos em condições laboratoriais controladas, as quais nem sempre refletem as situações reais encontradas no ambiente de trabalho. Dessa forma, surge a necessidade de realizar verificações práticas e objetivas quanto à real eficiência desses equipamentos em campo.

A pesquisa foi conduzida com base em uma abordagem experimental. Os testes foram realizados em uma cabina de medição acústica, com a utilização de um microfone sonda inserido no canal auditivo dos sujeitos de teste. As medições de níveis de pressão sonora foram feitas tanto com quanto sem o uso dos protetores auriculares, permitindo a avaliação direta da atenuação proporcionada por cada modelo. As frequências analisadas foram: 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8 kHz. Posteriormente, os valores obtidos foram comparados aos Níveis de Redução de Ruído (NRR) declarados nos Certificados de Aprovação dos respectivos produtos. Para garantir a confiabilidade dos dados, foram realizadas 20 baterias de testes com diferentes sujeitos e repetições.

Os resultados obtidos demonstraram que nenhum dos três modelos de protetores auditivos apresentou, na prática, os mesmos níveis de atenuação informados nos seus Certificados de Aprovação. As discrepâncias mais significativas foram observadas nas frequências mais altas,

especialmente em 4 kHz e 8 kHz. Em muitos casos, a atenuação real ficou entre 5 e 10 decibéis abaixo dos valores declarados pelos fabricantes. Entre os fatores que influenciaram negativamente o desempenho dos protetores destacam-se falhas na vedação, desgaste das almofadas de vedação e a forma como os dispositivos foram ajustados pelos usuários.

A pesquisa concluiu que a eficácia dos protetores auriculares tipo concha pode ser superestimada em ambientes controlados e subestimada em campo, especialmente quando há falhas na utilização. Torna-se, portanto, essencial a realização de testes práticos de atenuação, como os fit-tests, para garantir que o equipamento esteja realmente oferecendo a proteção esperada. Também se evidencia a necessidade de maior conscientização dos usuários quanto à importância da correta colocação e conservação dos protetores. A adoção de programas de treinamento e educação no uso de Equipamentos de Proteção Individual auditivos deve ser incentivada nas empresas. Por fim, a metodologia baseada no uso do microfone sonda mostrou-se eficaz e confiável na verificação do desempenho real dos protetores em condições práticas, sendo uma ferramenta recomendada para avaliações futuras.

## **2.4.2 Supressor ativo de ruído**

O trabalho dos autores Fernanda Ribas Pineda, Henrique Yuiti Onoue e Júlio Tanomaru, intitulado como Supressor Ativo de Ruído, teve como objetivo estudar e propor a implementação de um sistema de cancelamento ativo de ruído (ANC - Active Noise Control) voltado para ambientes de trabalho onde há operação de máquinas ruidosas, como cortadores de grama, britadeiras e motosserras. A proposta diferencia-se dos abafadores passivos convencionais, que atenuam todos os sons indiscriminadamente, ao buscar desenvolver um dispositivo que seja capaz de cancelar seletivamente apenas os ruídos específicos das máquinas, permitindo que sons importantes, como a fala humana e sinais sonoros de segurança, permaneçam audíveis ao usuário.

A justificativa para o desenvolvimento do projeto baseia-se na constatação de que, embora os protetores auditivos passivos sejam amplamente recomendados pelas normas de segurança do trabalho, eles apresentam limitações significativas. Entre essas limitações, destaca-se o isolamento total de todos os sons, o que pode comprometer a comunicação entre trabalhadores e reduzir a percepção de sinais de alerta em ambientes de risco. Dessa forma, tornou-se evidente a necessidade de uma solução tecnológica que, ao contrário dos métodos convencionais, seja capaz de identificar, isolar e neutralizar seletivamente apenas os sons indesejados, promovendo maior conforto auditivo e aumentando a segurança dos trabalhadores expostos a ruído constante.

A metodologia adotada foi de natureza exploratória e experimental, com foco no Processamento Digital de Sinais (DSP). O estudo foi conduzido em etapas, que incluíram o levantamento das técnicas existentes de cancelamento de ruído, o estudo de filtros digitais com ênfase em filtros adaptativos, e a implementação do algoritmo LMS (Least Mean Square), amplamente

utilizado em sistemas de controle adaptativo. Para melhor compreensão do conteúdo espectral do ruído, foi utilizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT), a qual permitiu analisar as componentes frequenciais dos sinais coletados. Em uma das etapas experimentais, foram aplicados os algoritmos em sinais reais, como o ruído produzido por um liquidificador, a fim de avaliar a eficácia do sistema em condições práticas. Em paralelo, foi desenvolvido um protótipo com microcontroladores, microfones e alto-falantes, capaz de captar o som ambiente, processá-lo e gerar o sinal antirruído correspondente. Os testes e ajustes subsequentes foram fundamentais para validar a eficiência do sistema, bem como identificar pontos de melhoria.

Durante os testes realizados, o algoritmo LMS mostrou-se eficaz na identificação das características do ruído e na adaptação contínua dos coeficientes do filtro para gerar o sinal antirruído. Em experimentos com o ruído de um liquidificador, foi possível observar uma redução perceptível da intensidade sonora, evidenciada pela comparação entre os sinais originais e os sinais cancelados. A técnica utilizada permitiu, inclusive, a preservação do som ambiente, ao manter apenas as frequências dominantes do ruído durante o processo de cancelamento. A análise da diferença entre os sinais com e sem o sistema ANC demonstrou que o cancelamento foi eficaz, ainda que tenha sido observado algum ruído residual de fundo, o que aponta para a necessidade de melhorias no ajuste fino do algoritmo e na calibração do sistema.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que é tecnicamente viável desenvolver um sistema ativo de cancelamento de ruído aplicável a ambientes laborais ruidosos. O uso do algoritmo LMS mostrou-se promissor na adaptação dinâmica ao ambiente sonoro, com capacidade de gerar um sinal antirruído eficaz e seletivo. Além de promover uma redução significativa do desconforto acústico, a solução proposta mantém a audibilidade de sons externos essenciais, contribuindo para uma comunicação mais eficiente e maior segurança dos trabalhadores. O estudo ainda reforça a importância da integração entre engenharia, ergonomia e saúde ocupacional para a criação de tecnologias inovadoras voltadas à proteção auditiva e à qualidade de vida no trabalho.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consiste na concepção, desenvolvimento e validação de um protótipo funcional de abafador de ruído com conectividade Bluetooth. O objetivo principal é criar um dispositivo que combine proteção auditiva eficaz com capacidade de comunicação por áudio, voltado especialmente para usuários que atuam em ambientes ruidosos. O desenvolvimento metodológico apresenta os materiais e os métodos aplicados na construção do protótipo.

### 3.1 MATERIAIS

Para a construção do protótipo, foram utilizados os seguintes materiais, cada um selecionado por suas características técnicas e adequação às necessidades do projeto.

#### 3.1.1 Abafador de ruído tipo concha

O abafador tipo concha da marca 3M (figura 8), com atenuação sonora de 20 dB, é utilizado como estrutura física do dispositivo. Este equipamento garante o isolamento acústico passivo, reduzindo o ruído externo e proporcionando uma base adequada para a instalação dos componentes eletrônicos, sem comprometer o conforto do usuário.

Figura 8 – Abafador de ruído tipo concha utilizado no prototipo



Fonte: DZ Suprimentos

O modelo utilizado apresenta duas conchas rígidas de plástico ABS, acopladas a almofadas auriculares com revestimento em material sintético macio e preenchimento de espuma. O arco de sustentação é ajustável e fabricado em aço inoxidável com cobertura de polímero, permitindo o ajuste da pressão lateral sobre a cabeça. Esse tipo de abafador é classificado como Equipamento de Proteção Individual (EPI) de Classe B, essa classe indica que o dispositivo é indicado para situações em que os níveis de pressão sonora são elevados.

### 3.1.2 Módulo bluetooth CSR8645

O módulo Bluetooth utilizado no projeto é baseado no chipset Qualcomm CSR8645 (figura 9), que opera com a versão 4.0 da tecnologia Bluetooth, oferecendo suporte ao modo de baixo consumo conhecido como BLE (Bluetooth Low Energy). Esse módulo é amplamente utilizado em dispositivos de áudio devido à sua capacidade de transmitir som estéreo com alta qualidade, suportando os principais perfis de comunicação, como A2DP (Advanced Audio Distribution Profile), utilizado para transmissão de áudio estéreo; AVRCP (Audio/Video Remote Control Profile), que permite controle remoto de mídia; HFP (Hands-Free Profile), voltado para chamadas viva-voz; e HSP (Headset Profile), que viabiliza o uso de microfones e áudio em chamadas telefônicas. Em relação à qualidade do som, o módulo é compatível com diversos codecs de áudio, incluindo o SBC (Subband Codec) e o aptx (que proporciona áudio de alta qualidade com baixa latência). A impedância de saída recomendada para os alto-falantes conectados ao módulo varia entre 16 e 64 ohms, o que o torna compatível com a maioria dos fones e drivers utilizados em protótipos de comunicação. A alimentação do módulo deve ser feita com tensões entre 3,3 V e 4,2 V, sendo ideal o uso de baterias com tensão nominal de 3,7 V. Durante a transmissão de áudio, a corrente de operação típica é de aproximadamente 20 mA, enquanto em modo de espera o consumo pode ser inferior a 2 mA, contribuindo para maior autonomia do sistema.

Figura 9 – Modulo bluetooth CRS8645



Fonte: Robu.in

O módulo oferece saída estéreo analógica (canais esquerdo e direito), podendo ser conectado diretamente a alto-falantes ou a amplificadores de pequeno porte. Além disso, conta com uma interface de entrada para microfone mono, compatível com microfones eletretos, fornecendo tensão de polarização por meio do terminal mic-bias, o que dispensa fontes externas para o microfone. Para controle de funcionalidades, o módulo possui pinos de entrada e saída programáveis, que podem ser utilizados para tarefas como ligar e desligar o dispositivo, iniciar o emparelhamento Bluetooth, atender chamadas ou ajustar o volume. A distância típica de transmissão de sinal é de até 10 metros em ambientes abertos, o que atende aos requisitos de mobilidade em aplicações de proteção auditiva com comunicação sem fio. As dimensões do mó-

dulo variam conforme o fabricante, sendo normalmente da ordem de 15 mm por 30 mm, o que permite sua integração em dispositivos compactos como abafadores tipo concha. Para garantir a integridade do sinal analógico de áudio, o módulo incorpora internamente um filtro digital do tipo passa-baixa, responsável por eliminar componentes de alta frequência indesejáveis acima da faixa audível, tipicamente superiores a 20 kHz. Esse filtro é implementado no processador de sinal digital do chip CSR8645 e atua logo após a decodificação do sinal Bluetooth e antes da conversão digital-analógica, garantindo uma saída de áudio mais limpa e livre de distorções causadas por aliasing ou ruídos de comutação digital.

### 3.1.3 Alto-falantes

Os alto-falantes utilizados são dois drives de 50 mm com impedância de 32 ohms, próprios para fones de ouvido tipo headset. Esses alto-falantes foram escolhidos por proporcionarem boa qualidade sonora, com resposta adequada em baixas e médias frequências, fundamentais para a inteligibilidade da voz e para o conforto auditivo durante chamadas telefônicas ou reprodução de áudio. A impedância de 32 ohms permite que eles sejam conectados diretamente à saída do módulo CSR8645, eliminando a necessidade de circuitos amplificadores adicionais. Alimentando a fórmula 1 com os valores conhecidos de tensão de saída típica do CSR8645 = 3 volts e a impedância dos alto-falantes = 32 ohms, a potência do alto-falante é de aproximadamente 0,281 W.

Potência do alto-falante:

$$P = \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

### 3.1.4 Microfone

Para a captação da voz, foi utilizado um microfone do tipo eletreto. Esse tipo de microfone foi selecionado devido à sua qualidade, baixo custo, pequeno tamanho e baixo consumo de energia. Ele apresenta boa sensibilidade para a faixa de frequência da voz humana, sendo adequado para a finalidade do projeto.

### 3.1.5 Bateria

A alimentação do circuito é feita por uma bateria de lítio de 3,7 volts e 200 miliamperes-hora (mAh). Esta bateria foi escolhida por suas dimensões reduzidas (6 mm x 14 mm x 31 mm), que são compatíveis com o espaço interno do abafador. Além disso, sua capacidade oferece uma autonomia estimada de aproximadamente 4 horas de uso contínuo, baseada na fórmula 2.

Cálculo da autonomia da bateria:

$$Autonomia = \frac{Capacidade\ da\ bateria}{Corrente\ Total} \quad (2)$$

O carregamento da bateria é realizado através de um módulo adaptador micro USB fêmea. Este módulo foi selecionado por oferecer boa resistência, fácil instalação e baixo custo. Além disso, a utilização de uma porta micro USB facilita o processo de recarga, tornando-o compatível com carregadores comuns de celulares.

### **3.1.6 Interruptor**

Para o controle de alimentação do dispositivo, foi utilizada uma chave liga/desliga deslizante simples, de corrente máxima de 1 ampere. Este componente permite ao usuário desligar completamente o circuito quando não estiver em uso, evitando o consumo desnecessário de energia da bateria.

### **3.1.7 Insumos**

Por fim, foram utilizados fios, solda, terminais, fita isolante, fita dupla face, cola quente e suportes para a montagem, fixação e isolamento dos componentes eletrônicos no interior do abafador. Estes itens são fundamentais para garantir a segurança elétrica, a organização dos fios e o acabamento do protótipo.

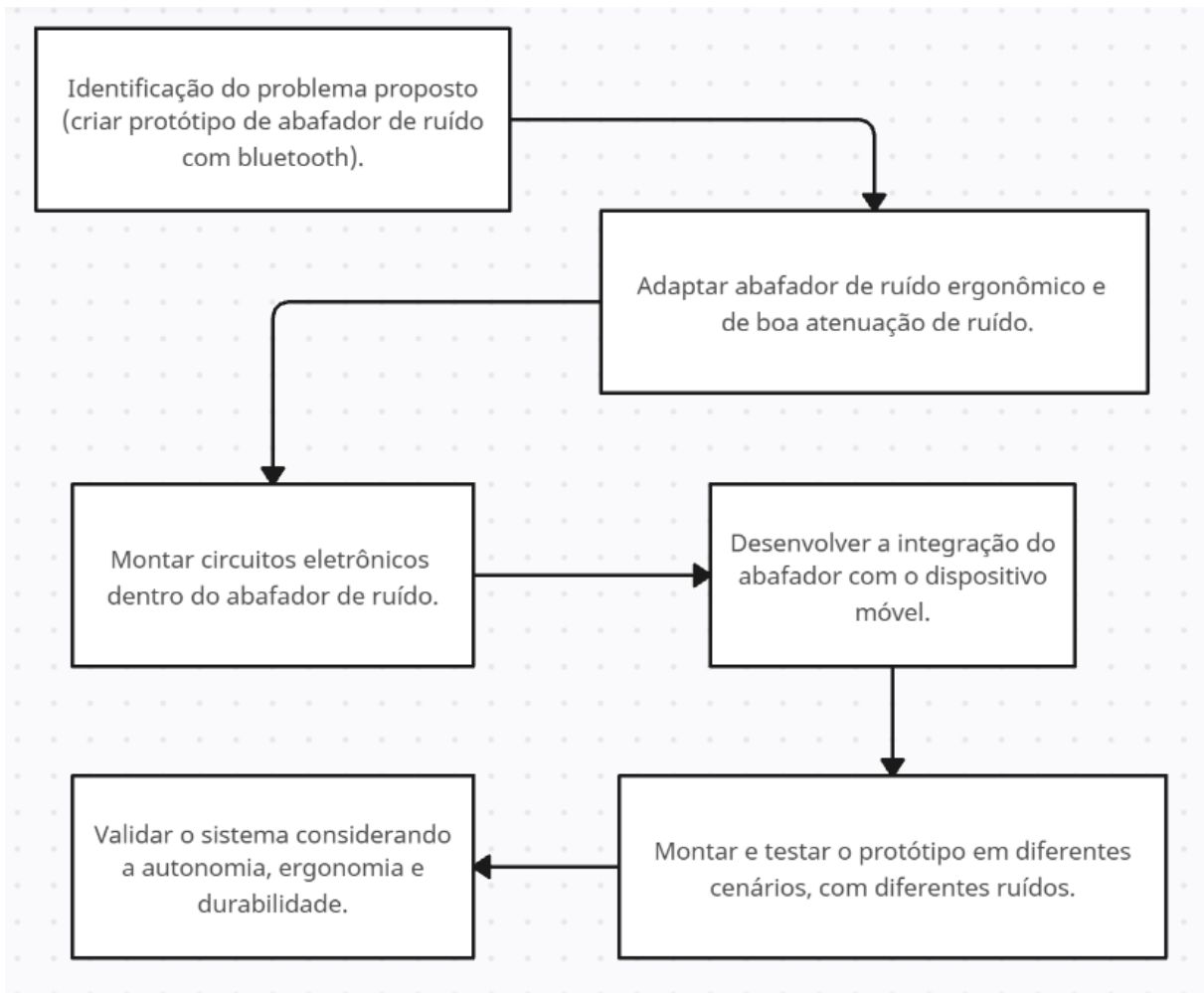
## **3.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA**

A execução deste projeto seguiu uma sequência lógica de etapas, descritas a seguir na figura 10.

### **3.2.1 Identificação do problema proposto.**

O ponto de partida da pesquisa foi a análise de um problema recorrente em ambientes industriais, oficinas e locais com alto nível de ruído: a dificuldade de comunicação por meio de dispositivos móveis convencionais. Em locais onde o ruído ambiente ultrapassa 85 dB, a comunicação verbal se torna ineficiente, mesmo com o uso de protetores auriculares. Além disso, remover constantemente o equipamento de proteção para atender chamadas ou ouvir instruções pode representar um risco à saúde auditiva. Essa realidade evidencia a necessidade de um dispositivo que permita a comunicação sem a retirada do abafador, mantendo a integridade da proteção e promovendo a interação com smartphones via Bluetooth. A proposta deste trabalho surgiu, portanto, da necessidade de integrar tecnologias já existentes, como módulos de áudio, baterias recarregáveis e comunicação sem fio, em uma solução prática, compacta, segura e de baixo custo.

Figura 10 – Diagrama em blocos



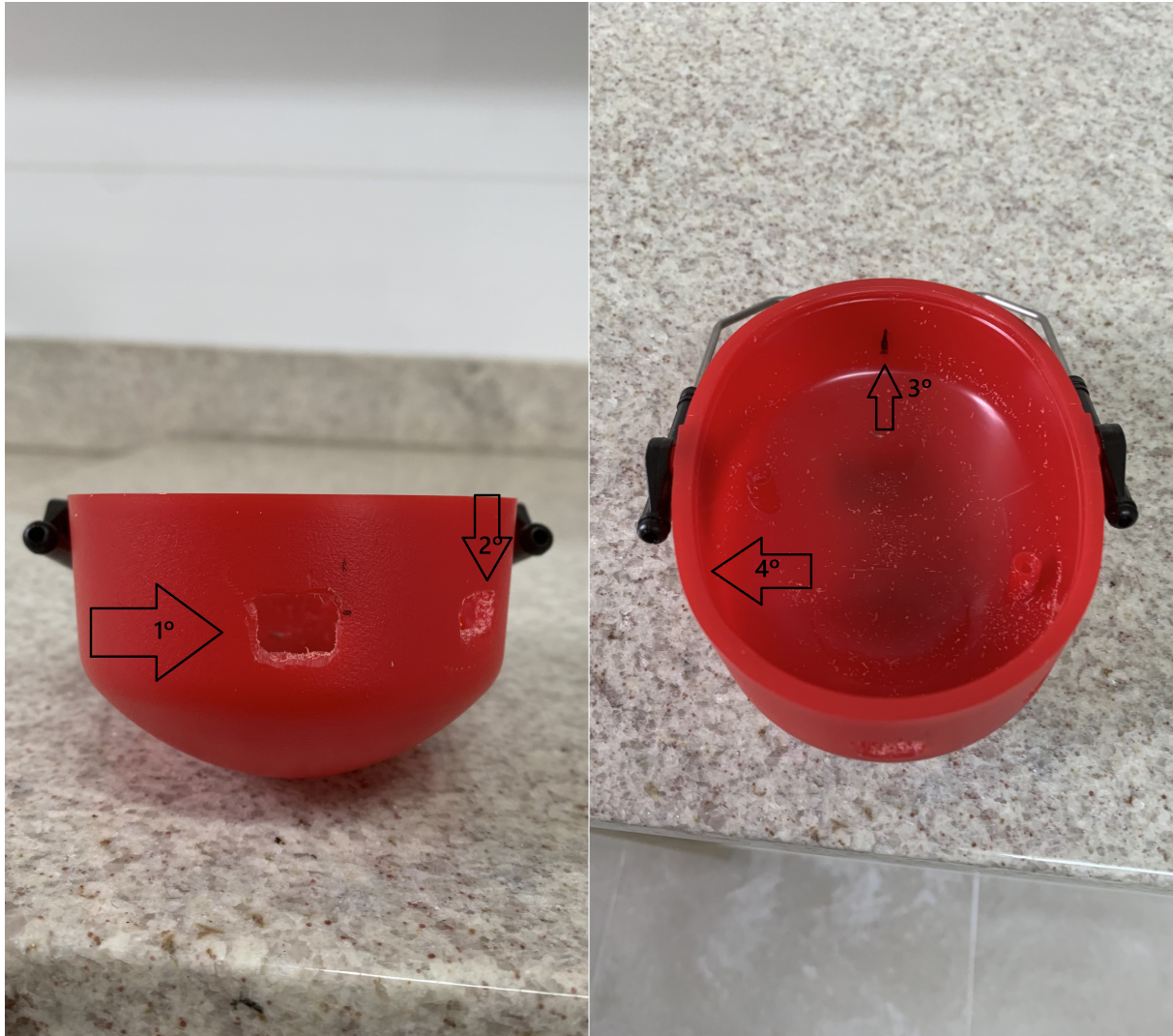
Fonte: O Autor

### 3.2.2 Adaptação do abafador de ruído.

A etapa seguinte envolveu a escolha e modificação de um abafador de ruído tipo concha da marca 3M, devido à sua confiabilidade e desempenho em atenuação passiva de som. A estrutura do abafador foi cuidadosamente estudada com o objetivo de abrigar os componentes eletrônicos sem prejudicar a ergonomia e o isolamento acústico do equipamento. Para isso, foi necessário desmontar parcialmente as conchas e realizar cortes e ajustes com ferramentas rotativas, mini retíficas e limas de precisão. A distribuição dos componentes no interior do abafador foi planejada para garantir a simetria do conjunto, evitando desconforto ao usuário durante longos períodos de uso. A vedação acústica foi mantida com a reutilização das espumas originais e aplicação de materiais adicionais de vedação sonora ao redor dos componentes. Além disso, priorizou-se o uso de materiais leves, para que o acréscimo de peso não comprometesse a usabilidade. A figura 11 apresenta os cortes realizados para a acomodação dos componentes do protótipo. O corte nº 1 foi feito para o encaixe da placa micro USB, utilizada no carregamento do dispositivo. O corte nº 2 corresponde à abertura destinada ao interruptor liga/desliga. O corte

nº 3 foi realizado para a passagem do cabo proveniente da placa controladora até o outro alto-falante, e o corte nº 4 é destinado à saída do microfone.

Figura 11 – Ajustes no casco do abafador



Fonte: O Autor

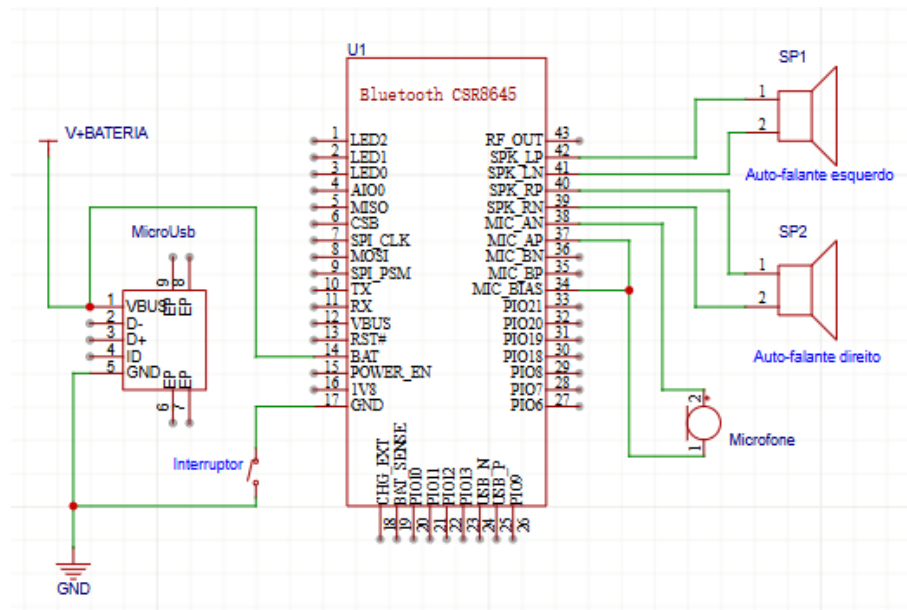
### 3.2.3 Montagem dos circuitos.

Antes da montagem física do protótipo, foi realizada a etapa de estudo e simulação do circuito eletrônico utilizando o software EasyEDA <sup>1</sup>, que permitiu planejar as conexões entre os componentes, testar a disposição dos terminais e validar o funcionamento teórico do sistema. Na figura 12, observa-se o esquema elétrico completo do sistema.

As saídas de áudio do módulo, identificadas como SPK\_LP/SPK\_LN e SPK\_RP/SPK\_RN, foram conectadas diretamente aos alto-falantes esquerdo e direito, responsáveis pela reprodução do som estéreo. Já o microfone eletreto foi conectado aos pinos MIC\_BIAS, MIC\_AN e MIC\_AP, correspondentes à alimentação e entrada de sinal do canal de captação de voz.

<sup>1</sup> EasyEDA é um software de design de PCB(Printed Circuit Board ou Placa de Circuito Impresso)

Figura 12 – Diagrama elétrico



Fonte: Autor (site [www.easyeda.com](http://www.easyeda.com))

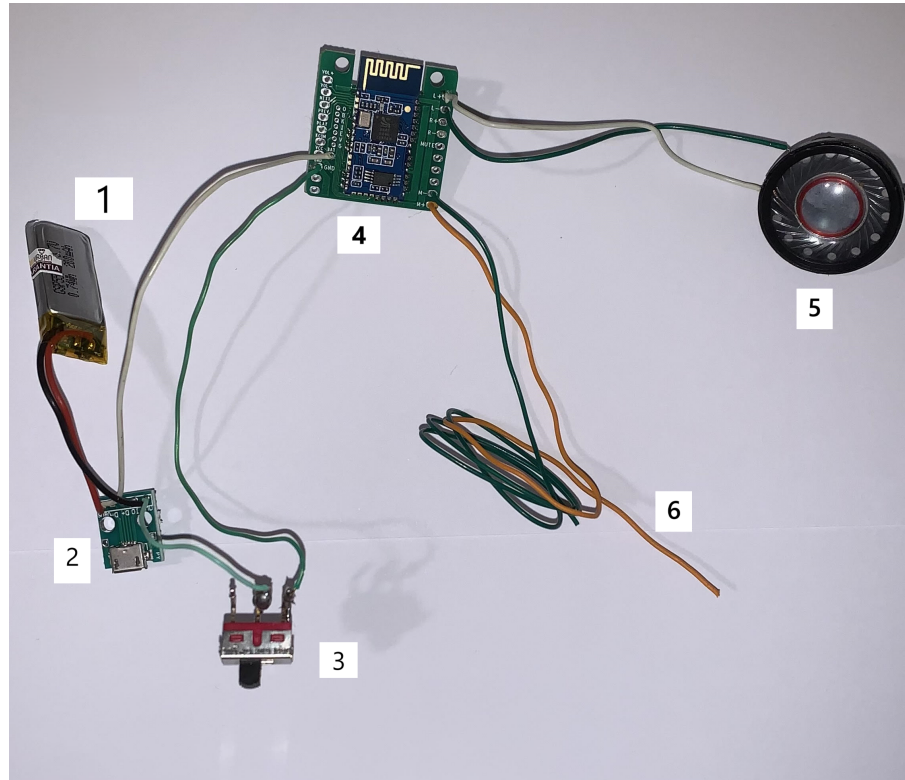
A montagem inicial do protótipo foi realizada em bancada, com o objetivo de validar o funcionamento do sistema de áudio e comunicação via Bluetooth (figura 13). Para a alimentação, foi utilizada uma bateria de Polímero de Lítio (Li-Po) com tensão nominal de 3,7 V e capacidade de 200 mAh, a qual foi conectada a um módulo carregador com entrada micro USB (2), permitindo o carregamento da bateria por fonte externa. A saída do módulo de carregamento foi conectada a uma chave deslizante (interruptor liga/desliga) (3), possibilitando o controle manual da alimentação do circuito. A partir do interruptor, a alimentação foi direcionada ao módulo principal Bluetooth (4), responsável por realizar a comunicação com dispositivos móveis e por amplificar o sinal de áudio. Esse módulo, baseado no chip CSR8645, conta com saídas de áudio estéreo e entradas específicas para microfone. No protótipo, foi conectado um alto-falante (5) de 32 ohms à saída de áudio do canal esquerdo (L), utilizando fios condutores diretamente soldados aos terminais correspondentes da placa. Alguns fios adicionais foram deixados conectados nos pinos auxiliares do módulo Bluetooth (6), prevendo a futura ligação do microfone. Durante a etapa de montagem, priorizou-se a verificação do funcionamento básico da alimentação, chaveamento e reprodução de áudio via Bluetooth.

### 3.2.4 Desenvolvimento da integração com o celular.

A integração entre o protótipo e o smartphone é realizada através do módulo Bluetooth CSR8645, o qual opera na faixa de 2,4 GHz e é compatível com os perfis A2DP e HFP. Foi realizada a configuração dos pinos do módulo, incluindo entradas de microfone e saídas de áudio para os alto-falantes. Foram realizados testes de pareamento com diferentes modelos de celulares Android e iOS para verificar a compatibilidade, estabilidade da conexão e tempo de

resposta. O módulo estabeleceu conexões rápidas (em torno de 2 segundos) e confiáveis com alcance de até 10 metros, proporcionando uma experiência prática e intuitiva ao usuário.

Figura 13 – Montagem parcial do protótipo

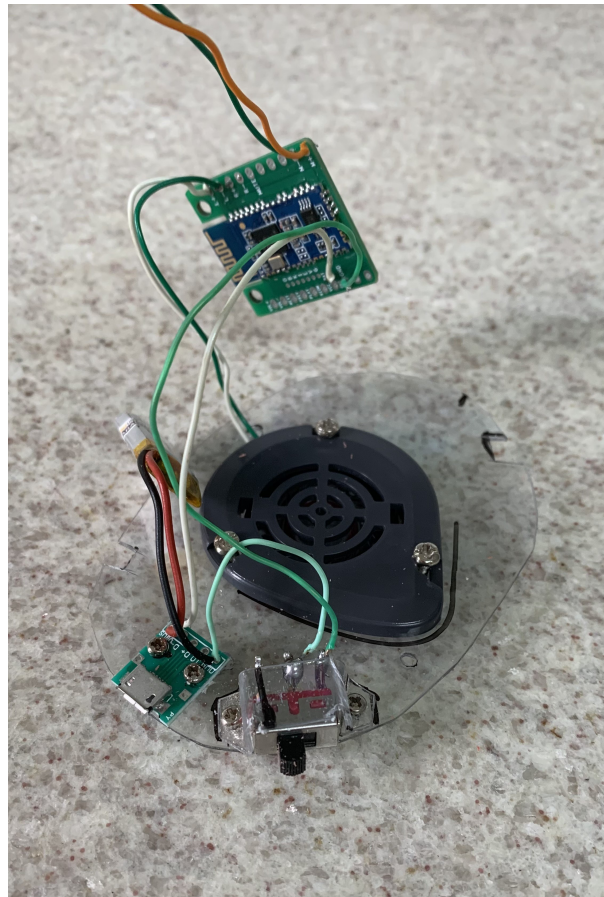


Fonte: O Autor

### 3.2.5 Montagem e testes do protótipo.

Após a montagem do circuito e adaptação física do abafador, foi feita a instalação definitiva dos componentes no interior das conchas (a figura 14 mostra o circuito pronto para ser colocado dentro da concha do abafador). Foram posicionados dois alto-falantes de pequeno porte voltados para os ouvidos do usuário e um microfone tipo eletreto na parte inferior da concha, direcionado à boca. A montagem foi finalizada com a organização dos fios internos e fechamento das conchas. Em seguida, o protótipo passou por uma série de testes práticos em diferentes cenários ruidosos. Foram avaliados o desempenho do isolamento acústico, a qualidade sonora dos alto-falantes, a captação do microfone, a estabilidade da comunicação Bluetooth e também a autonomia da bateria.

Figura 14 – Circuito fora do abafador



Fonte: O Autor

### 3.2.6 Validação do sistema.

Na etapa final, foi realizada a validação do sistema quanto ao desempenho funcional e facilidade de uso. A análise incluiu critérios como tempo de funcionamento contínuo, clareza na comunicação em chamadas, teste de peso, integridade estrutural após manuseio, entre outros. Os resultados obtidos permitiram verificar a viabilidade técnica e prática da solução desenvolvida, além de identificar possíveis pontos de melhoria para futuras versões do projeto.

## 3.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Os ensaios foram realizados utilizando quatro equipamentos emissores de ruído, com características distintas, um aspirador de pó com nível de pressão sonora de 73 dB, com uma faixa de frequência medida de 1,9 kHz, uma esmerilhadeira da marca Makita com nível de pressão sonora de 88 dB com frequência medida na faixa de 6,6 kHz, uma lixadeira com nível de pressão sonora de 71 dB com frequência medida na faixa de 2,5 kHz e uma serra mármore com nível de pressão sonora de 79 dB com frequência medida na faixa de 4 kHz, todos escolhidos por serem fontes comuns de ruído em ambientes domésticos e industriais. As frequências sono-

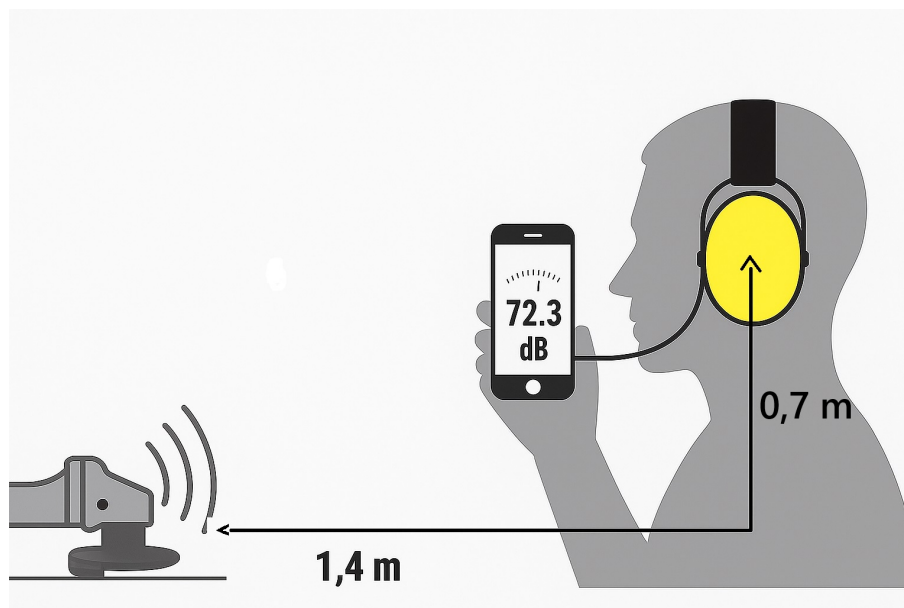
ras de cada equipamento foram medidas usando o microfone interno do celular, vinculado ao aplicativo Decibel X.

Todos os ensaios foram conduzidos em uma sala de 15m<sup>2</sup>, com paredes de alvenaria e sem nenhuma janela ou porta abertas de forma a garantir a repetibilidade das medições. O ambiente apresentava níveis de ruído de fundo relativamente baixos, variando em torno de 30 dB, o que minimizou a influência de interferências externas nas medições. Essa padronização de condições foi essencial para assegurar que as diferenças observadas estivessem relacionadas unicamente às fontes de ruído ensaiadas e ao desempenho do protótipo.

### 3.3.1 Preparação dos ensaios

Cada máquina geradora de ruído foi posicionada sobre uma mesa estável, a fim de padronizar as condições de emissão sonora. O ponto de medição foi definido como a posição da orelha do usuário, mantendo uma distância horizontal fixa de 1,4 metros entre a fonte de ruído e o ponto de captação. Além disso, considerou-se a diferença de altura entre a superfície da mesa e o ouvido do usuário, equivalente a 0,7 metros, conforme figura 15. Essa geometria foi mantida constante em todos os ensaios, de modo a preservar a uniformidade dos dados.

Figura 15 – Ilustração do padrão usado nos testes



Fonte: O Autor

### 3.3.2 Ensaio de comparação

O objetivo principal desse ensaio foi verificar se os valores obtidos pelo aplicativo em conjunto com o microfone externo apresentavam concordância com os dados fornecidos pelo equipamento de medição dedicado, estabelecendo a viabilidade do uso do método alternativo utilizado nos ensaios. Os testes foram realizados seguindo as condições padronizadas de medi-

ção, respeitando a distância horizontal de 1,4 m da fonte sonora e a diferença de altura de 0,7 m em relação à superfície da mesa onde os equipamentos estavam apoiados.

Foram utilizadas quatro máquinas distintas como fontes de ruído: aspirador de pó, esmerilhadeira, lixadeira e serra mármore. Para cada equipamento, foram realizadas cinco medições independentes com o aplicativo Decibel X e outras cinco com o decibelímetro digital, de modo a permitir o cálculo de valores médios e a comparação direta entre os dois métodos.

### 3.3.3 Ensaio de atenuação

O teste de atenuação teve por objetivo comparar a atenuação de ruídos com o abafador em configuração original. Para a realização das medições, foi utilizado um fone de ouvido com microfone embutido, como mostra a figura 16, de forma a simular com maior fidelidade a percepção real do usuário. Foi utilizado um aplicativo de decibelímetro instalado em um smartphone, com o objetivo de medir o nível em dB com o uso do protótipo. O aplicativo selecionado foi o "Decibel x", disponível para sistemas Android e IOS, o qual apresenta uma precisão média de  $\pm 2$  dB na faixa entre 30 e 100 dB.

Figura 16 – Microfone posicionado na parte interna do abafador de ruído.



Fonte: O Autor

O procedimento realizado para o ensaio de atenuação consistiu na execução de cinco medições em (dB) para cada condição, ou seja, tanto sem o uso do abafador quanto com o abafador devidamente posicionado. Inicialmente, foram realizadas cinco medições com o microfone posicionado perto da orelha, porém sem a utilização do abafador, ficando diretamente exposto ao ruído gerado pelos equipamentos. Na sequência, o abafador foi corretamente colocado e, mantendo o mesmo posicionamento do microfone, foram realizadas mais cinco medições, agora com o abafador sobre o microfone. Com isso, foi possível calcular a média dos valores obtidos em cada situação.

### 3.3.4 Teste de peso

Outro aspecto avaliado neste trabalho foi o peso do abafador de ruído após as modificações realizadas para a integração dos componentes eletrônicos. O fabricante do modelo original especifica um peso nominal de aproximadamente 250 g, valor que serve como referência básica para comparação. No entanto, ao consultar diferentes fornecedores e lojas online, foram identificadas variações nos valores divulgados, com alguns anúncios indicando pesos de 270 g, 289 g e até 300 g para o mesmo modelo de abafador. Essa discrepância pode estar associada a diferenças de lotes de fabricação, variações nos materiais empregados na produção, arredondamentos ou até mesmo erros de divulgação nas especificações comerciais.

Após a adaptação do dispositivo com a instalação do módulo Bluetooth, microfone, chave de acionamento, fiação interna e bateria recarregável, o peso final aferido foi de 318 g, conforme a figura 17. Esse aumento em relação ao valor de referência do fabricante representa a soma dos componentes adicionais necessários ao funcionamento do sistema de comunicação. Embora o peso final seja superior ao informado originalmente, a diferença observada em comparação às variações encontradas no mercado não é excessiva.

Figura 17 – Aferição do peso do protótipo



Fonte: O Autor

É importante destacar que, em equipamentos de proteção individual, o conforto ergonômico é muito importante, uma vez que o peso excessivo pode gerar fadiga e desconforto em longas jornadas de trabalho. Nesse sentido, a variação de aproximadamente 18 g a 68 g em relação às especificações comerciais mais elevadas não compromete significativamente a usabilidade do protótipo.

### 3.3.5 Teste de comunicação

Um dos aspectos fundamentais para a validação do protótipo desenvolvido é a verificação de sua capacidade de comunicação em condições ruidosas, assegurando que a integração entre o sistema de atenuação sonora e o módulo de transmissão de áudio Bluetooth proporcione uma experiência satisfatória ao usuário. Para isso, foram realizados ensaios específicos de comunicação, descritos a seguir. Foram conduzidos dois testes principais, com o objetivo de avaliar tanto a captação do microfone quanto a clareza da fala transmitida.

#### 3.3.5.1 Teste de reconhecimento de voz automatizado

No teste de reconhecimento de voz automatizado, primeiro ensaio, utilizou-se um cilindro de plástico fechado em ambas as extremidades por borrachas, cada qual contendo um furo central. Por esses furos foram colocadas as conchas do abafador de ruído, de modo a criar uma barreira física ao redor de um smartphone posicionado no interior do cilindro (figura 18). Esse celular tinha a função de atuar como receptor da fala, utilizando o recurso de reconhecimento de voz do Google, e com uma esmerilhadeira ligada a 1,4 m de distância emitindo ruído, o que permitiu verificar se o áudio captado pelos alto-falantes do abafador era compreendido como palavras reconhecíveis.

Figura 18 – Primeiro teste de comunicação sendo realizado



Fonte: O Autor

Um segundo smartphone, contendo áudios gravados das frases propostas com voz fe-

minina e masculina humana, foi pareado via conexão Bluetooth com o módulo de áudio do protótipo e utilizado como transmissor de mensagens de voz. Assim, o áudio emitido pelos alto-falantes do abafador foi captado pelo microfone do celular posicionado dentro do cilindro e convertido em texto pelo sistema de reconhecimento de voz.

As frases escolhidas para os testes foram diversificadas em tamanho e estrutura, a fim de avaliar tanto situações de comunicação direta quanto frases com maior complexidade. As mensagens transmitidas foram:

"Olá, tudo bem"

"Qual seu nome"

"Bom dia, meu nome é teste"

"Me chamo Paulo e estou escutando"

"Teste de dificuldade de compreensão"

Foram realizados seis testes distintos, sendo três com voz masculina e três com voz feminina, a fim de verificar se haveria influência do timbre de voz na precisão do reconhecimento.

### 3.3.5.2 Teste de chamada de áudio

Além do ensaio com reconhecimento de voz automatizado, foi realizado um segundo teste de comunicação, desta vez simulando uma situação prática de chamada telefônica. O objetivo foi avaliar a clareza da fala e a eficiência do sistema em condições reais de uso, com ruído ambiente presente.

Participaram desse teste dois voluntários, um homem e uma mulher. O ambiente de ensaio foi dividido em dois locais, um ambiente ruidoso onde um participante utilizou o protótipo do abafador ao lado de uma esmerilhadeira em funcionamento a 1,4 metros de distância, representando a condição crítica do teste, e um ambiente silencioso, em outra sala, onde o outro participante utilizava apenas o smartphone para a chamada. A comunicação ocorreu por meio de uma chamada de áudio, estabelecida entre os dois smartphones.

Inicialmente a voluntária do sexo feminino utilizou o abafador no ambiente ruidoso, enquanto o voluntário do sexo masculino permaneceu na sala silenciosa. Foram trocadas frases de verificação, como "Qual é o seu nome?" e "Em que data você nasceu?", com o objetivo de confirmar a inteligibilidade da fala. Em seguida, os participantes inverteram suas funções, o homem passou a utilizar o protótipo no ambiente ruidoso, enquanto a mulher permaneceu no ambiente silencioso. Assim, o abafador esteve sempre no mesmo local de ruído elevado, mudando apenas o usuário responsável pela transmissão de voz.

### 3.3.6 Teste de bateria

Para avaliar a autonomia da bateria, foi realizado um ensaio simples de descarga completa da bateria utilizada no protótipo. Inicialmente, a bateria de 3,7 V e 200 mAh foi totalmente carregada por meio do módulo de recarga micro-USB. Em seguida, o protótipo foi mantido em funcionamento contínuo, com reprodução de sons em volume médio por meio do Bluetooth, até que a bateria se esgotasse e o sistema desligasse por falta de energia.

Esse procedimento teve como finalidade estimar o tempo máximo de operação contínua possível com a carga total da bateria. No entanto, é importante destacar que, na prática, o dispositivo não opera de forma contínua, pois o uso real envolve intervalos de comunicação e períodos de inatividade, o que torna o consumo de energia variável.

Por esse motivo, é difícil estabelecer uma métrica exata de autonomia, já que ela depende de diversos fatores, como o tipo de áudio reproduzido, a intensidade do volume, o tempo de conexão Bluetooth e até mesmo as condições de temperatura e estado da bateria. Assim, o teste realizado fornece apenas uma estimativa teórica de duração, servindo como referência inicial para futuras otimizações do projeto.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da implementação do protótipo desenvolvido, conforme os procedimentos descritos no capítulo 3 (Materiais e métodos). Os ensaios realizados compreenderam testes de comparação entre as conchas do abafador, teste de atenuação, teste de comunicação e teste de bateria. Tendo como objetivo de avaliar o desempenho geral do dispositivo após sua montagem e integração dos componentes. Os resultados apresentados permitem verificar a eficiência do protótipo em termos de isolamento acústico, clareza na transmissão de áudio e funcionamento, contribuindo para a validação da proposta do projeto e para a análise de sua viabilidade prática.

### 4.1 ENSAIO DE COMPARAÇÃO

Com o intuito de validar a precisão e a confiabilidade dos métodos de medição, empregados neste trabalho, foi realizado um ensaio preliminar comparativo, tendo como objetivo verificar a coerência entre diferentes instrumentos de avaliação sonora.

Nesse contexto foi conduzido um teste comparativo entre o aplicativo Decibel X, instalado em um smartphone com fone de ouvido P2 e microfone integrado, e um decibelímetro digital da marca Metrins. Esse ensaio teve como finalidade avaliar se o aplicativo seria capaz de fornecer leituras de nível de pressão sonora próximas às de um equipamento profissional. As tabelas apresentadas a seguir reúnem os resultados obtidos nas cinco medições realizadas para cada método, com cálculo de média aritmética e desvios padrão para interpretação comparativa.

Os resultados das medições são apresentados nas Tabelas 1 a 4.

Tabela 1 – Comparação entre valores obtidos pelo aplicativo de decibelímetro X decibelímetro digital (utilizando a esmerilhadeira como fonte de ruído)

n° de medições	(APP – fone P2) [dB]		(Decibelímetro) [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	75,6	0,7	78,1	-0,3
2	75,5	0,8	78,3	-0,5
3	77,7	-1,4	76,8	1
4	76,0	0,3	78,1	-0,3
5	76,7	-0,4	77,7	0,1
<b>Média</b>	76,3	0,7	77,8	0,4

Tabela 2 – Comparação entre valores obtidos pelo aplicativo de decibelímetro X decibelímetro digital (utilizando o aspirador de pó como fonte de ruído)

n° de medições	(APP – fone P2) [dB]		(Decibelímetro) [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	66,5	-0,4	68,5	0,1
2	65,3	0,8	68,0	0,6
3	65,9	0,2	69,5	-0,9
4	66,7	-0,6	69,1	-0,5
5	66,5	-0,4	68,3	0,3
<b>Média</b>	66,1	0,5	68,6	0,5

Tabela 3 – Comparação entre valores obtidos pelo aplicativo de decibelímetro X decibelímetro digital (utilizando a lixadeira como fonte de ruído)

n° de medições	(APP – fone P2) [dB]		(Decibelímetro) [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	58,5	-2,4	60,3	-0,4
2	55,5	0,6	58,3	1,6
3	56,3	-0,2	61,1	-1,2
4	55,2	0,9	60,0	-0,1
5	55,3	0,8	60,1	-0,2
<b>Média</b>	56,1	1	59,9	0,7

Tabela 4 – Comparação entre valores obtidos pelo aplicativo de decibelímetro X decibelímetro digital (utilizando a serra mármore como fonte de ruído)

n° de medições	(APP – fone P2) [dB]		(Decibelímetro) [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	66,5	0,7	70,5	1,4
2	65,3	1,9	72,3	-0,4
3	66,8	0,4	73,1	-1,2
4	69,5	-2,3	72,3	-0,4
5	68,3	-1,1	71,7	0,2
<b>Média</b>	67,2	1,3	71,9	0,7

De maneira geral, observa-se que o aplicativo Decibel X, mesmo utilizando um microfone convencional de fone P2, apresentou resultados coerentes e próximos aos obtidos com o decibelímetro profissional. As diferenças médias entre os dois métodos ficaram entre 1,5 dB (tabela 1) e 4,7 dB (tabela 4). A maior discrepância foi observada na serra mármore, em que a diferença média atingiu aproximadamente 4,7 dB, possivelmente devido à maior intensidade e variabilidade do ruído emitido por esse equipamento.

O desvio padrão das medições também foi determinado, servindo como indicador estatístico do grau de variação dos valores em relação à média. Nos resultados obtidos, observou-se que os desvios padrão permaneceram próximos em praticamente todas as medições. Em um

dos casos, correspondente à tabela 4, o valor ultrapassou 1 dB, o que pode estar associado à maior flutuação do ruído gerado pela serra mármore, caracterizada por variações mais intensas de frequência e amplitude.

Esses resultados demonstram que, embora o aplicativo não substitua um decibelímetro calibrado, ele pode ser utilizado para ensaios comparativos e experimentais, como os realizados neste projeto, especialmente quando o objetivo é avaliar variações relativas de ruído e não valores absolutos de alta precisão.

## 4.2 ENSAIO DE ATENUAÇÃO

O ensaio de atenuação foi o procedimento que mediu a quantidade de ruído que um protetor auditivo realmente reduz enquanto é usado por um indivíduo específico, servindo para verificar se a proteção auditiva é adequada para o ambiente de trabalho e para o trabalhador individual.

Na primeira avaliação, ainda com o abafador de ruído original, utilizando o aspirador de pó como fonte de ruído, o nível de pressão sonora registrado médio sem o uso do abafador foi de 66,5 decibéis. Após a colocação do abafador, o nível médio de ruído medido foi de 45,2 dB, representando uma redução de 21,3 dB, como mostrada na tabela 5. O desvio padrão teve como média 0,6 dB sem o abafador e 0,4 dB com o abafador.

Tabela 5 – Medições de nível de pressão sonora com e sem o uso do abafador (aspirador de pó)

n° de medições	Sem Abafador [dB]		Com Abafador [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	67,7	-1,2	44,9	0,3
2	66,4	0,1	45,6	-0,4
3	66,3	0,2	45,1	0,1
4	66,8	-0,3	44,7	0,5
5	65,5	1	45,7	-0,5
<b>Média</b>	66,5	0,6	45,2	0,4

O segundo teste foi realizado utilizando uma esmerilhadeira, que gera ruídos mais intensos e em faixas de frequência mais elevadas. Sem o uso do abafador, a média registrada foi de 75,8 dB, com desvio padrão de 0,4. Após a colocação do abafador, foram realizadas cinco medições, cujos resultados foram consolidados em uma média de 51,9 dB, com desvio padrão de 0,2 entre as medições. Isso corresponde a uma redução de 23,9 dB, conforme a tabela 6, utilizando o abafador em seu modelo original.

Tabela 6 – Medições de nível de pressão sonora com e sem o uso do abafador (esmerilhadeira)

nº de medições	Sem Abafador [dB]		Com Abafador [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	75,8	0	52,3	-0,4
2	74,9	0,9	51,5	0,4
3	75,9	-0,1	51,9	0
4	76,1	-0,3	51,5	0,4
5	76,4	-0,6	51,9	0
<b>Média</b>	75,8	0,4	51,9	0,2

Os próximos testes (tabela 7 a 10) já contemplam o abafador em sua alteração. Nos testes de comparação entre as conchas foram realizados cinco medições independentes para cada máquina, assegurando maior confiabilidade estatística dos resultados. O procedimento foi repetido em ambos os lados do protetor auricular, de modo a verificar possíveis variações de desempenho relacionadas à alteração devolvida no abafador e à vedação da concha.

Tabela 7 – Comparação entre as conchas (utilizando a esmerilhadeira como fonte de ruído)

nº de medições	(Direito) [dB]		(Esquerdo) [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	53,3	-1,1	52,6	-0,9
2	50,5	1,7	51,6	0,1
3	51,8	0,4	52,0	-0,3
4	52,8	-0,6	51,1	0,6
5	52,9	-0,7	51,5	0,2
<b>Média</b>	52,2	0,9	51,7	0,4

Tabela 8 – Comparação entre as conchas (utilizando o aspirador de pó como fonte de ruído)

nº de medições	(Direito) [dB]		(Esquerdo) [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	44,1	0,3	43,2	1,4
2	43,3	1,1	44,4	0,2
3	44,5	-0,1	44,4	0,2
4	45,0	-0,6	45,1	-0,5
5	45,5	-1,1	46,3	-1,7
<b>Média</b>	44,4	0,6	44,6	0,8

Tabela 9 – Comparação entre as conchas (utilizando a lixadeira como fonte de ruído)

n° de medições	(Direito) [dB]		(Esquerdo) [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	39,3	-1,3	38,8	-1
2	38,4	-0,4	37,8	0
3	37,1	0,9	38,1	-0,3
4	37,4	0,6	36,2	1,6
5	38,1	-0,1	38,2	-0,4
<b>Média</b>	38,0	0,7	37,8	0,7

Tabela 10 – Comparação entre as conchas (utilizando a serra mármore como fonte de ruído)

n° de medições	(Direito) [dB]		(Esquerdo) [dB]	
	Valores	Desvio padrão	Valores	Desvio padrão
1	51,3	-0,5	50,2	0,1
2	51,6	-0,8	51,6	-1,3
3	52,3	-1,5	48,6	1,7
4	48,1	2,7	50,8	-0,5
5	50,7	0,1	50,6	-0,3
<b>Média</b>	50,8	1,1	50,3	0,8

Os resultados demonstraram consistência entre os dois lados do abafador, com diferenças médias inferiores a 1 dB e desvio padrão menor que 0,5 dB em todas as situações testadas, o que indica um equilíbrio acústico e confirma que a inserção dos componentes eletrônicos (placa Bluetooth CSR8645, alto-falantes, microfone e cabeamento interno) não comprometeu o desempenho de isolamento do equipamento.

No caso da esmerilhadeira (tabela 7), observou-se média de 52,2 dB na concha direita e 51,7 dB na esquerda, diferença de 0,95%, demonstrando uniformidade mesmo diante de uma fonte de ruído intensa e com ampla faixa de frequência. Para o aspirador de pó (tabela 8), as médias ficaram em 44,4 dB (direito) e 44,6 dB (esquerdo), confirmando a estabilidade do protótipo em níveis moderados de ruído. Na lixadeira (tabela 9), as médias foram de 38,0 dB e 37,8 dB, respectivamente, também evidenciando comportamento simétrico e eficiente no bloqueio de frequências médias e contínuas. Já no ensaio com a serra mármore (tabela 10), as médias registradas foram de 50,8 dB no lado direito e 50,3 dB no esquerdo, comprovando que o protótipo manteve sua vedação mesmo diante de ruídos de alta frequência e maior intensidade.

O protótipo apresentou um equilíbrio acústico entre os lados e sem prejuízos causados pelas modificações internas. As diferenças observadas são compatíveis com as variações esperadas em ensaios experimentais e confirmam a eficácia do projeto em preservar a função principal de proteção auditiva, mesmo após a integração do sistema de comunicação Bluetooth.

### 4.3 TESTE DE COMUNICAÇÃO

O teste de comunicação teve como objetivo avaliar a eficiência do sistema de transmissão e recepção de áudio integrado ao protótipo, verificando sua capacidade de permitir uma conversação compreensível mesmo em ambientes com altos níveis de ruído. Essa etapa serviu para validar o desempenho do microfone, do módulo Bluetooth e dos alto-falantes embutidos no abafador, assegurando que a presença de ruído externo não comprometesse a clareza da fala.

Durante o primeiro ensaio, o protótipo foi posicionado em um ambiente controlado e submetido à reprodução de mensagens de voz por meio da conexão Bluetooth. Um segundo dispositivo, localizado entre as conchas do abafador, utilizou o sistema de reconhecimento de voz do Google para registrar as frases transmitidas. Foram realizadas seis tentativas de comunicação, sendo três com voz masculina e três com voz feminina, abrangendo diferentes timbres e intensidades vocais. As frases testadas incluíram: “Olá, tudo bem?”, “Qual seu nome?”, “Bom dia, meu nome é teste”, “Me chamo Paulo e estou escutando” e “Teste de dificuldade de compreensão”.

Durante o processo, ocorreram duas falhas de reconhecimento. Em uma das tentativas, a frase “Bom dia, meu nome é teste” foi registrada incorretamente como “Bom dia, meu nome é tente”, e em outra, “Teste de dificuldade de compreensão” foi transcrita como “Teste de dificuldade de atenção”. As duas falhas foram registradas no primeiro teste com a voz masculina como mostrado na tabela 11, já na voz feminina não houve registro de falhas de reconhecimento.

Tabela 11 – Resultados do teste de comunicação por reconhecimento de voz

Frases	Voz Masculina			Voz Feminina		
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Olá, tudo bem	C	C	C	C	C	C
Qual seu nome	C	C	C	C	C	C
Bom dia, meu nome é teste	I	C	C	C	C	C
Me chamo Paulo e estou escutando	C	C	C	C	C	C
Teste de dificuldade de compreensão	I	C	C	C	C	C

C	Correto
I	Incorreto

Já no teste de comunicação entre dois participantes foi relatado pelos mesmos que a comunicação ocorreu de forma clara, sem necessidade de repetições. O alto-falante do protótipo apresentou bom desempenho na reprodução da voz recebida, e o microfone, em conjunto com a placa CSR8645, foi eficaz em filtrar o ruído ambiente, entregando uma fala clara para o interlocutor.

#### 4.4 TESTE DE BATERIA

O teste de autonomia da bateria teve como objetivo avaliar o tempo de funcionamento contínuo do protótipo, bem como verificar o comportamento do sistema durante o processo de descarga e o limite de operação do módulo Bluetooth CSR8645. A bateria tem tensão nominal de 3,7 V e capacidade de 200 mAh, recarregável por meio de um módulo micro-USB conectado ao circuito de alimentação.

Durante os ensaios de descarga, o conjunto permaneceu em funcionamento contínuo por aproximadamente 4 horas, até que o módulo Bluetooth apresentou pequenas interrupções no áudio, seguidas pelo desligamento automático do sistema. Esse comportamento indica que a tensão da bateria atingiu o limite mínimo de operação do circuito, cerca de 3,2 V ponto em que o módulo CSR8645 interrompe o funcionamento para evitar descarga profunda.

O processo de recarga foi realizado com um carregador de 0,5 A (500 mA), conectado à entrada micro-USB do módulo de gerenciamento de energia. Considerando a capacidade nominal da bateria e a corrente de carga aplicada, o tempo estimado para recarga completa foi de aproximadamente 30 a 40 minutos, compatível com as especificações do fabricante, podendo variar de acordo com a potência do carregador utilizado.

Com base nos resultados obtidos, a bateria de 3,7 V e 200 mAh é adequada para o protótipo, fornecendo energia suficiente para cerca de 4 horas de uso contínuo e podendo alcançar autonomies maiores em condições de uso moderado, com pausas entre as comunicações.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de comunicação Bluetooth integrado à um abafador de ruído, destinado a permitir a comunicação em ambientes ruidosos sem comprometer a proteção auditiva do usuário. A partir do planejamento e execução das etapas de projeto, montagem e ensaios experimentais, foi possível alcançar resultados satisfatórios que confirmam a viabilidade técnica do sistema proposto.

Os objetivos específicos definidos no início do projeto foram progressivamente atendidos. Primeiramente, foi realizado o estudo teórico sobre o sistema auditivo humano e os efeitos da exposição ao ruído servindo de base para compreender a importância da proteção auditiva e orientar o dimensionamento do protótipo. Em seguida, foi conduzida a seleção e integração dos componentes eletrônicos, incluindo a placa Bluetooth CSR8645, o microfone eletreto, os alto-falantes, a bateria recarregável de 3,7 V e o módulo de recarga micro-USB. Essa etapa envolveu o estudo das ligações e do funcionamento do circuito no software EasyEDA, garantindo coerência entre o esquema teórico e a montagem física.

Os testes realizados permitiram validar as principais funcionalidades do dispositivo. No teste de comparação, entre o aplicativo de decibelímetro versus decibelímetro digital, observou-se que as medições apresentaram valores próximos, com diferenças médias inferiores a 5 dB, comprovando a confiabilidade das leituras obtidas com o sistema proposto. O teste de atenuação sonora demonstrou que o protótipo foi capaz de reduzir o nível de pressão sonora percebido pelo usuário, mantendo a inteligibilidade da fala e a capacidade de comunicação, o que representa um avanço em relação aos abafadores convencionais.

Nos ensaios de comunicação, tanto o teste de reconhecimento automático de voz quanto o teste de chamada de voz entre dois voluntários comprovaram que o sistema apresentou clareza na transmissão e recepção de áudio, mesmo com a presença de ruído intenso, como o gerado por uma esmerilhadeira a curta distância. O desempenho do microfone, aliado ao chip-set CSR8645, mostrou-se eficiente na filtragem de ruídos, permitindo que as mensagens fossem compreendidas corretamente, com poucos erros de detecção.

O teste de autonomia da bateria indicou que, mesmo com capacidade limitada (200 mAh), o sistema foi capaz de operar continuamente por um período de 4 horas, considerando o consumo do módulo Bluetooth e dos alto-falantes. Observou-se, contudo, que a autonomia real pode variar conforme o modo de uso, intensidade do volume e frequência de transmissão de áudio, o que torna a estimativa de duração um valor aproximado.

O protótipo atendeu aos objetivos propostos, demonstrando que é possível integrar um sistema de comunicação sem fio a um abafador de ruído tipo concha de forma funcional, ergonômica e segura. O dispositivo apresentou bom desempenho tanto na redução de ruído quanto na

transmissão de voz.

Mais do que um projeto acadêmico, o resultado obtido mostra um produto que poderá ser certificado e potencialmente fabricável e comercializável, com reais condições de ser aplicado em ambientes industriais, oficinas, canteiros de obra e outros locais com altos níveis de ruído. Sua adoção em larga escala pode representar um avanço importante na prevenção da Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR), protegendo trabalhadores e promovendo qualidade de vida no ambiente de trabalho.

Esse projeto evidencia que soluções simples e bem planejadas podem gerar grandes impactos, unindo tecnologia, acessibilidade e responsabilidade social. O protótipo desenvolvido é um passo concreto na direção de tornar os ambientes ruidosos mais seguros e humanos, abrindo caminho para futuras melhorias e novas aplicações em comunicação e segurança ocupacional.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de sinais sonoros quando à aproximação de AGVs, empilhadeiras, pontes rolantes e outros objetos móveis e ambulantes que possam de alguma forma colidir com pessoas.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6023: Informação e documentação: referências: elaboração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- AUDINOVE. **Guia Completo sobre Protetores Auditivos**. Disponível em: <<http://www.audinove.com.br>>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- BENEDICTO, E. P.; LEMOS, R. G. **Tecnologias de proteção auditiva: Revisão e Perspectivas**. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, v. 36, n. 1, p. 1-10, 2020.
- BINAURAL. **Sistema Auditivo: Entenda como funciona!**. Disponível em: <<https://www.binaural.com.br/blog/perda-auditiva/sistema-auditivo-entenda-como-funciona>>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- BISTAFF, V. **O ruído e seus efeitos na saúde humana**. São Paulo: Editora Acadêmica, 2011.
- BRASIL. Ministério da Economia. Secretaria Especial de Previdência e Trabalho. **Norma Regulamentadora NR-15: Atividades e Operações Insalubres**. Brasília, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego>>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Perda auditiva induzida por ruído (PAIR)**. Brasília: MS, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude...>>.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-15 – Atividades e operações insalubres**. Brasília: MTE, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br>>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- CONNECTA FG. **Inovação e Segurança do Trabalho**. Disponível em: <<http://www.conectafg.com.br>>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- COUTO, H. A. **Gerenciamento de Ruído Ocupacional**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora Health Safety, 2017.
- CURY, A. **O vendedor de sonhos**. São Paulo: Editora Planeta, 2008.
- EDUCACAO.SP.GOV.BR. **Diferença entre ondas sonoras musicais e ruído**. Publicado em 2015. Disponível em: <<https://www.educacao.sp.gov.br>>. Acesso em: 13 maio 2025.
- FERREIRA JUNIOR, F. R. **Ruído Ocupacional: Medidas de Controle e Prevenção de Perdas Auditivas**. São Paulo: Editora Atlas, 2019.
- FUNDACENTRO. **Programa de Conservação Auditiva (PCA)**. 3. ed. São Paulo: Fundacentro, 2018.

- GIFFONI, R. C. et al. **Ruído ocupacional e surdez**. Revista Brasileira de Otorrinolaringologia, São Paulo, v. 80, n. 1, p. 1-6, jan./fev. 2014.
- GLASBERG, B. R. **The influence of auditory perception on noise-induced hearing loss**. Journal of the Acoustical Society of America, v. 117, n. 3, p. 1475-1483, 2005.
- GUYTON, A. C.; HALL, J. E. **Tratado de Fisiologia Médica**. 13. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- HUDSPETH, A. J. **Eletromotilidade das células ciliadas: a base molecular para a amplificação coclear**. Em: Handbook of electrophysiology. New York: Springer, 2014.
- KANOLD, P. O.; KARA, A. F. **O córtex auditivo em foco**. Nature Reviews Neuroscience, v. 20, n. 3, p. 154-167, 2019.
- KEITHLEY, E. M. **Cochlear damage from noise exposure**. Current Opinion in Otolaryngology Head and Neck Surgery, v. 28, n. 5, p. 396-401, 2020.
- LIMA, R. C. **Avaliação de desempenho de protetores auriculares do tipo concha em indústria metalúrgica**. Cadernos de Saúde do Trabalhador, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 30-41, 2022.
- LIN, F. R.; ALLEMAN, A. M.; LUSTIG, L. R. **Hearing Loss as a Risk Factor for Dementia**. American Journal of Epidemiology, v. 190, n. 10, p. 1957-1965, 2020.
- MORAES, M. C. **Protetores auditivos: o uso correto na prevenção da PAIR**. Revista Brasileira de Medicina do Trabalho, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 30-36, 2010.
- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH). **Criteria for a Recommended Standard: Occupational Noise Exposure**. U.S. Department of Health and Human Services, 1998.
- OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). **Hearing Protection Devices (HPDs)**. OSHA Fact Sheet. U.S. Department of Labor, 2008.
- PURVES, D. et al. **Neurociências**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2019.
- ROBU.IN. **DIY Bluetooth Earmuffs Project**. Disponível em: <<https://www.robust.in>>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- ROCHA, A.; ROSA, P. H. **O uso de abafadores de ruído em ambientes industriais: eficácia e desafios**. Revista de Segurança do Trabalho, v. 15, n. 2, p. 40-50, 2021.
- ROSSING, T. D.; MOORE, F. R.; WHEELER, P. A. **The science of sound**. 3. ed. San Francisco: Addison Wesley, 2002.

- SALVI, R. et al. **Cochlear implants and central auditory plasticity**. Handbook of Clinical Neurophysiology, v. 18, p. 231-250, 2022.
- SANTOS, M. S. **Medidas de atenuação de ruído em equipamentos de proteção individual**. São Paulo: Editora SENAC, 2019.
- SILVA, J. A. **Poluição sonora: causas, efeitos e soluções tecnológicas**. São Paulo: Editora Técnica Ambiental, 2020.
- SILVA, T. C.; PEREIRA, A. L. **Dispositivos de proteção auditiva: tipos, aplicações e cuidados**. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 45, n. 2, 2020.
- SILVERTHORN, D. U. **Fisiologia Humana: Uma Abordagem Integrada**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- STOWELL, R. **The Earmuff Story: A History of Hearing Protection**. New York: Earmuff Press, 2011.
- TECMUNDO. **Cancelamento de ruído pode causar dificuldade na interpretação de sons**. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/saude/284160-cancelamento-ruído-causar-dificuldade-interpretacao-sons.htm>>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- TORTORA, G. J.; DERRICKSON, B. H. **Princípios de Anatomia e Fisiologia**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- TRASCOVESCHI, S. A. **Análise Acústica e Vibração em Ambientes Industriais**. São Paulo: Érica, 2019.
- VOS, T. et al. **Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019**. The Lancet, v. 396, n. 10258, p. 1204–1222, 2020. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30925-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30925-9)>.
- WANG, L.; CHEN, S. **Advancements in smart hearing protection devices**. Journal of Acoustics and Vibration, v. 40, n. 4, p. 250-265, 2023.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Environmental noise guidelines for the European Region**. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **World Report on Hearing**. Geneva: WHO, 2021.