

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Aline Rodrigues Moraes

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA DE
ALERTA PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA**

Betim
2025

ALINE RODRIGUES MORAIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA DE
ALERTA PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida

Betim
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

M828d Morais, Aline Rodrigues

Desenvolvimento de um protótipo de sistema de alerta para pessoas com deficiência auditiva / Aline Rodrigues Morais. – 2025.

50 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida

1. Tecnologia assistiva. 2. Deficiência auditiva. 3. Computação vestível. 4. Transformada de Fourier. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Morais, Aline Rodrigues. II. Título.

CDU: 621.391

Aline Rodrigues Morais

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA DE
ALERTA PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 07 / 08 / 2025 pela banca examinadora:

Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida (Orientador) - IFMG

Prof. Me. Mauricio Monteiro da Silva - IFMG

Prof. Dr. Leandro Freitas de Abreu - UFMG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter sido minha força e meu amparo durante toda a caminhada da graduação. Foi nos momentos mais difíceis que senti Sua Presença me sustentando. Em especial, me apoiei nas seguintes palavras da bíblia sagrada de 1 João 2:14:

“Escrevo a vocês, jovens, porque são fortes. A mensagem de Deus vive em vocês.”

Sou imensamente grata à minha família, pelo amor, paciência e apoio em todos os momentos dessa jornada. Obrigada por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava.

Aos amigos que a graduação me presenteou, meu carinho e minha gratidão. Em especial, agradeço a Luiza Campos e Evellyn Fernanda, amigas que estiveram ao meu lado desde o início e com quem dividi risos, angústias e vitórias.

Ao meu companheiro, amigo e namorado, Gabriel Gollo: obrigada por estar ao meu lado, pelos conselhos, pela presença e pelo carinho. Se não fosse a faculdade, talvez nossos caminhos nunca tivessem se cruzado. E hoje, não consigo imaginar essa jornada sem você.

Além disso, gostaria de agradecer a mim mesma. Fazer faculdade não foi uma tarefa fácil. A Aline que começou esse curso enfrentou momentos de dor, dúvida e cansaço, mas também viveu alegrias que ficarão para sempre em sua memória: o lanche no intervalo entre amigos, a comemoração por passar naquela matéria temida por todos, os choros solitários, as vitórias silenciosas.

Durante o percurso, uma frase me acompanhou, e que representa a Aline que enfrentou e venceu os desafios:

"Eu não tenho ideia porque a gente fica adiando as coisas, mas se eu tivesse que chutar, diria que tem muito a ver com o medo. Medo do fracasso. Medo da dor. Medo da rejeição. Às vezes, o medo é de apenas tomar uma decisão, porque e se você estiver errado? E se você fizer um erro que não dá pra desfazer? Seja lá do que a gente tenha medo, uma coisa é sempre verdade: com o tempo, a dor de não ter tomado uma atitude fica pior do que o medo de agir..."— Grey's Anatomy"

Por fim, agradeço a todos os professores que cruzaram meu caminho. Obrigada por compartilharem conhecimento, paciência e experiências que levarão frutos muito além das salas de aula.

A todos que estiveram comigo de alguma forma: obrigada por acreditarem em mim.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo simular um sistema de alerta para pessoas com deficiência auditiva, com foco na criação de uma prova de conceito capaz de identificar sons específicos e convertê-los em alertas. Nesse sistema, um programa no computador verifica se o sinal sonoro possui frequência dominante dentro de uma faixa de interesse e, quando essa condição é atendida, publica uma mensagem em um tópico de alerta de um servidor MQTT. Essa mensagem é então consumida por um microcontrolador ESP32-C3, conectado à rede Wi-Fi como assinante desse tópico. Ao receber a mensagem, o microcontrolador aciona um motor de vibração, notificando o usuário por meio de um alerta tátil. Além disso o processamento dos sinais foi realizado por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), utilizada para auxiliar na identificação da frequência dominante de cada sinal sonoro.

A proposta insere-se no campo da Tecnologia Assistiva e explora também os princípios da Computação Vestível, com o intuito de demonstrar como dispositivos tecnológicos podem ser aplicados à promoção da acessibilidade e autonomia, utilizando recursos de baixo custo.

Os testes demonstraram que o sistema foi capaz de identificar corretamente sinais sonoros cuja frequência dominante estava dentro da faixa definida. O sistema também respondeu de forma eficaz tanto a áudios sintéticos quanto a sons representativos de ambientes reais.

Os resultados obtidos confirmam a eficácia da solução como prova de conceito. A qual a estrutura desenvolvida pode servir de base para implementações futuras, como a construção de uma pulseira vibratória capaz de emitir alertas de forma tátil, dentro da perspectiva da Computação Vestível.

Palavras-chave: Tecnologia Assistiva. Deficiência Auditiva. Computação Vestível. Transformada de Fourier. ESP32-C3.

ABSTRACT

This paper aims to simulate an alert system for people with hearing impairments, focusing on the creation of a proof of concept capable of identifying specific sounds and converting them into alerts. In this system, a computer program checks whether the sound signal has a dominant frequency within a defined range of interest and, when this condition is met, publishes a message to an alert topic on an MQTT server. This message is then consumed by an ESP32-C3 microcontroller, connected to a Wi-Fi network as a subscriber to that topic. Upon receiving the message, the microcontroller activates a vibration motor, notifying the user through a tactile alert. In addition, signal processing was carried out using the Fast Fourier Transform (FFT), employed to assist in identifying the dominant frequency of each sound signal.

The proposal falls within the field of Assistive Technology and also explores principles of Wearable Computing, aiming to demonstrate how technological devices can be applied to promote accessibility and autonomy using low-cost resources.

The tests showed that the system was able to correctly identify sound signals whose dominant frequency was within the defined range. The system also responded effectively to both synthetic audio and sounds representative of real-world environments.

The results confirm the effectiveness of the solution as a proof of concept, with the developed structure potentially serving as the basis for future implementations, such as the construction of a wearable vibrating bracelet capable of delivering tactile alerts, in line with the perspective of Wearable Computing.

Keywords: Assistive Technology. Hearing Impairment. Wearable Computing. Fast Fourier Transform. ESP32-C3.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Banana da Fala.	9
Figura 2 – Modelo 3D impresso da pulseira de alerta vibratório.	13
Figura 3 – Sistema pulseira de alerta vibratório.	14
Figura 4 – ESP32-C3.	15
Figura 5 – Motor de Vibração.	16
Figura 6 – Pinagem do microcontrolador ESP32-C3.	17
Figura 7 – Montagem física do circuito do microcontrolador ESP32-C3.	18
Figura 8 – Fluxograma.	20
Figura 9 – Modelo de Couro da pulseira de alerta vibratório.	20
Figura 10 – Configuração para gerar o áudio de 500 Hz.	22
Figura 11 – Espectrograma do áudio de 500 Hz.	23
Figura 12 – Configuração para gerar o áudio de 3000 Hz.	23
Figura 13 – Espectrograma do áudio de 3000 Hz.	24
Figura 14 – Espectrograma áudio cachorro latindo.	24
Figura 15 – Espectrograma áudio campainha tocando.	24
Figura 16 – Espectrograma áudio bebê chorando.	25
Figura 17 – Espectrograma aspirador de pó.	25
Figura 18 – Espectro de frequência do áudio de 500 Hz.	29
Figura 19 – Espectro de frequência do áudio de 3000 Hz.	30
Figura 20 – Espectro de frequência do áudio cachorro latindo.	31
Figura 21 – Espectro de frequência do áudio campainha tocando.	32
Figura 22 – Espectro de frequência do áudio bebê chorando.	33
Figura 23 – Espectro de frequência do áudio aspirador de pó.	34
Figura 24 – Configuração do projeto na plataforma Platformio.	36
Figura 25 – Exibição mensagens no terminal.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
TA	Tecnologia Assistiva
OMS	Organização Mundial da Saúde
Libras	Língua Brasileira de Sinais
FFT	Transformada Rápida de Fourier
DFT	Transformada Discreta de Fourier

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Objetivos	7
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>7</i>
1.2	Justificativa	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	Deficiência Auditiva e suas limitações	8
2.2	Tecnologia Assistiva (TA)	10
2.3	Computação vestível - Wearable Computing	10
2.4	Processamento digital de um sinal de áudio utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT)	11
2.5	Trabalho relacionado: Pulseira de alerta vibratória para notificação de pessoas com Deficiência Visual e Auditiva	13
3	METODOLOGIA	15
3.1	Microcontrolador ESP32-C3 e Motor de Vibração	15
<i>3.1.1</i>	<i>Montagem do microcontrolador com o motor de vibração</i>	<i>16</i>
3.2	Software Audacity	18
3.3	Áudios representativos de um ambiente real	18
3.4	Arquitetura do Protótipo	19
4	RESULTADOS	22
4.1	Áudios Sintéticos	22
<i>4.1.1</i>	<i>Áudio gerado com a Frequência Dominante de 500 Hz</i>	<i>22</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Áudio gerado com a Frequência Dominante de 3000 Hz</i>	<i>23</i>
<i>4.1.3</i>	<i>Áudios representativos de um ambiente real</i>	<i>24</i>
4.2	Desenvolvimento do Software de Processamento de Áudio	25
<i>4.2.1</i>	<i>Leitura do arquivo de áudio e Pré-processamento do sinal de áudio</i>	<i>26</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Aplicação da Transformada Rápida de Fourier</i>	<i>27</i>
<i>4.2.3</i>	<i>Verificação da frequência dominante</i>	<i>27</i>
<i>4.2.4</i>	<i>Visualização gráfica da verificação da frequência dominante</i>	<i>28</i>

4.2.4.1	Visualização gráfica - Áudio gerado com a Frequência Dominante de 500 Hz	28
4.2.4.2	Visualização gráfica - Áudio gerado com a Frequência Dominante de 3000 Hz	29
4.2.4.3	Visualização gráfica - Áudios representativos de um ambiente real . . .	30
4.2.5	<i>Análise do consumo de memória e tempo de execução do Software de Processamento de Áudio</i>	34
4.3	Implementação da integração entre o ESP32-C3 e o Motor de Vibração	35
4.3.1	<i>Configuração do projeto na plataforma PlatformIO</i>	35
4.3.2	<i>Desenvolvimento do Código de Controle do ESP32-C3</i>	36
4.4	Comunicação entre o Software de Processamento de Áudio e o ESP32-C3	37
4.5	Considerações sobre os Resultados	38
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	40
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, o homem sempre desenvolveu ferramentas tecnológicas para atender suas necessidades, a qual resultaram em melhorias nos padrões de vida das pessoas. No entanto, os recursos tecnológicos muitas vezes são direcionados para a maioria da população que não possui deficiência.

Este trabalho aborda um tema atual: trazer tecnologia para pessoas com deficiência, especificamente para pessoas com deficiência auditiva. Atualmente, utiliza-se o termo Tecnologia Assistiva (TA) para definir qualquer recurso que contribui para a inclusão e independência de pessoas com deficiência (BERSCH, 2008). Dessa forma, a TA pode ajudar as pessoas com deficiência a se envolverem com a tecnologia atual.

Segundo o relatório mundial sobre audição, divulgado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e emitido em 2021, informou que até 2050, 1 em cada 4 pessoas poderá ter problemas de perda auditiva, uma estimativa de cerca de 900 milhões de pessoas (OMS, 2021). Atualmente estima-se que mais de 5% da população mundial, cerca de 430 milhões de pessoas, sofrem com algum tipo de perda auditiva (OMS, 2024).

Os deficientes auditivos enfrentam dificuldades na orientação e identificação de sons importantes do dia a dia. No contexto urbano, a incapacidade de detectar alertas sonoros, como buzinas de carros, alarmes de incêndio ou sirenes de emergência, pode colocá-los em situações de risco quanto a sua segurança. Já no contexto doméstico, a ausência de dispositivos para detectar sinais sonoros, como o toque de uma campainha, cachorro latindo, despertadores ou até casos de pais com deficiência auditiva que possuem bebês e não possuem uma forma de identificar quando seus filhos estão chorando, podem afetar na capacidade de se orientarem ou identificarem determinada ocorrência.

Dessa forma surge a questão: Seria possível utilizar placas microcontroladas e de baixo custo para a simulação de um sistema de alerta para pessoas com deficiência auditiva? A ideia é que os sinais sonoros sejam captados por um computador e, posteriormente, transmitidos como alertas para um motor de vibração, simulando o funcionamento de uma pulseira vibratória. Com base nesse questionamento, este trabalho propõe a simulação de um sistema de alerta vibratório para pessoas com deficiência auditiva, avaliando seu funcionamento e viabilidade.

Embora este trabalho se concentre na simulação do alerta vibratório, a implementação física de um dispositivo poderia ser explorada em trabalhos futuros. Nesse contexto, o desenvolvimento de uma pulseira vibratória baseada nesse sistema se enquadraria no conceito de computação vestível, que envolve o uso de dispositivos tecnológicos projetados para serem usados como acessórios que ficam diretamente em contato com o corpo do usuário, integrando-se ao vestuário. Dessa forma, esses dispositivos permitem o acesso a informações enquanto o usuário realiza outras atividades do dia a dia. (CORSO, 2013).

A utilização desses recursos tecnológicos pode exercer uma melhoria significativa na

qualidade de vida e auxiliar em atividades cotidianas das pessoas com deficiência auditiva. Um protótipo acessível, como um sistema de alerta surge como uma solução para proporcionar condições de segurança, conforto e independência.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e simular um sistema de alerta acessível para pessoas com deficiência auditiva, demonstrando, por meio de uma prova de conceito, como a identificação de sons com frequência específica pode ser utilizada para gerar alertas táteis, promovendo a acessibilidade em situações do cotidiano.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Realizar um breve estudo sobre a deficiência auditiva e suas limitações, conceito de Computação vestível - *Wearable Computing* e da Tecnologia Assistiva (TA) , para fundamentar o desenvolvimento do sistema.
- Gerar sinais sonoros de forma sintética dentro de uma faixa específica de frequência que seja de interesse para os deficientes auditivos.
- Estabelecer a comunicação entre o computador e o microcontrolador responsável por acionar os alertas.
- Implementar um motor de vibração no microcontrolador, a fim de simular o alerta de forma tátil ao usuário.

1.2 Justificativa

O desenvolvimento deste protótipo se justifica diante das dificuldades enfrentadas pelos deficientes auditivos em detectar sinais sonoros importantes para sua segurança e autonomia. Visando promover a acessibilidade e demonstrar por meio da simulação, que pode ser possível a construção de um sistema de alerta voltado a esse público por meio de tecnologias disponíveis e de baixo custo. Além disso, este trabalho possibilitou o aprimoramento de habilidades em linguagem de programação, especificamente na implementação de algoritmos de processamento de sinais em Python e no desenvolvimento de código em C++ para microcontroladores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Deficiência Auditiva e suas limitações

Segundo Afonso (2008 apud CARVALHO *et al.*, 2015)¹ a surdez pode ser definida por três pontos de vista: ponto de vista médico, cultural e educacional. O termo surdo é mais utilizado para descrever um marco sócio cultural da surdez, destacando a diferença em vez da deficiência. Por outro lado, a expressão deficiente auditivo é utilizada em linguagem médica ou em contextos clínicos. (CARVALHO *et al.*, 2015).

Segundo Silva e Carvalho (2021) a definição de pessoas surdas seria:

Os sujeitos que se consideram surdos, consideram o ponto de vista histórico-cultural. Eles não se consideram deficientes, e como se identificam com a comunidade surda, usam o termo ‘surdo’, pois entendem que esta denominação engloba uma diferença cultural e tem sua língua materna, nata e legalmente reconhecida, a Língua Brasileira de Sinais – Libras.

Segundo Silva e Carvalho (2021) a definição de pessoas com deficiência auditiva seria:

Os sujeitos que se intitulam deficientes auditivos, consideram o ponto de vista clínico-terapêutico no qual o termo ‘deficiente’, classifica os sujeitos em graus de surdez e da perda sensorial de audição[...]. Geralmente são aqueles que perdem a audição após terem contato com a linguagem da sociedade ouvinte, usam aparelhos auditivos, implantes cocleares ou não usam nenhum dos dois.

Neste trabalho, será utilizado a expressão deficiência auditiva visando uma abordagem clínica.

As pessoas com deficiência auditiva em todo o mundo enfrentam diversos desafios ao longo do dia a dia. A principal barreira enfrentada por eles está relacionada à comunicação. Visto que 94,4% das pessoas com alguma dificuldade para ouvir, 87,1% das que alegam ter grande dificuldade, e 38,7% das que não conseguem ouvir nenhum som não sabem falar Libras. (IBGE, 2021).

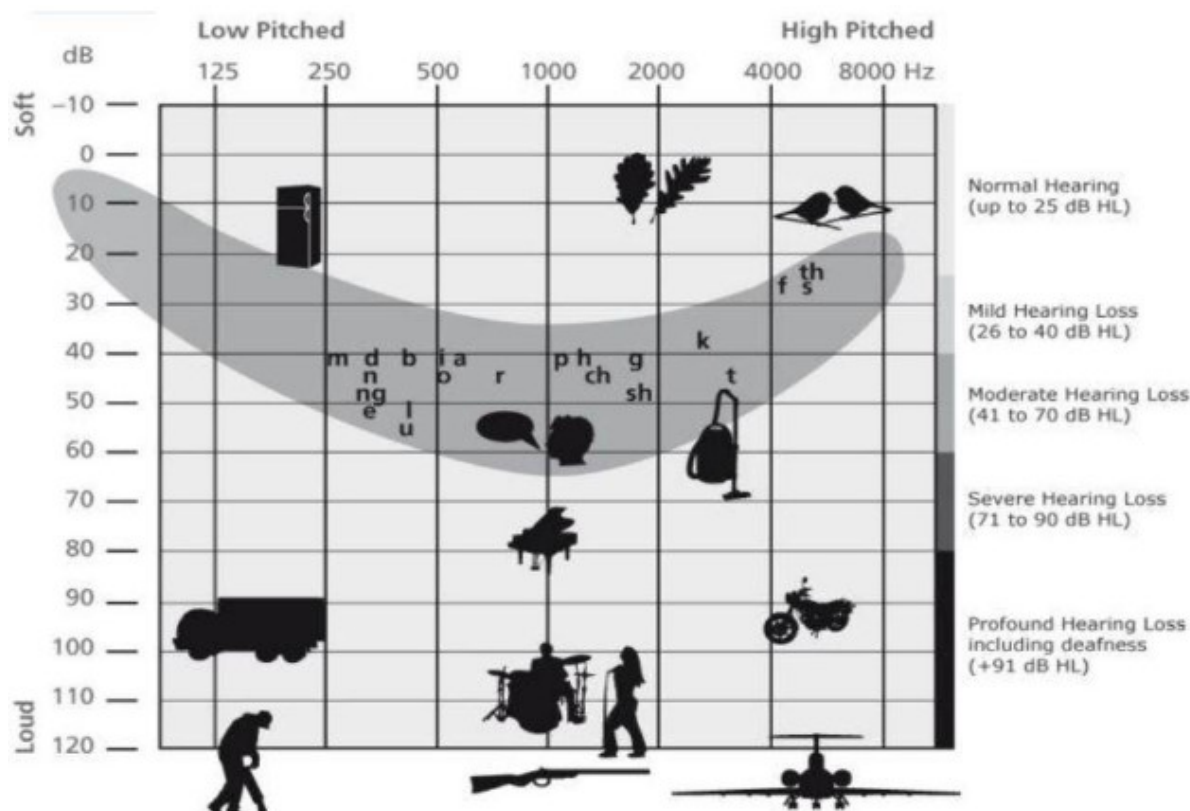
Nesse sentido, “os problemas de comunicação, no cotidiano dos surdos, são uma condição permanente, que acarreta graves consequências no seu desenvolvimento social, emocional e cognitivo” (FELLINGER *et al.*, 2007 apud CHAVEIRO *et al.*, 2014)² Portanto, situações de interação que envolvam sons comuns a pessoas ouvintes podem não ser experimentadas pela maioria das pessoas com deficiência auditiva.

¹ AFONSO, Carlos. Reflexões sobre a surdez: a problemática específica da surdez. Vila Nova de Gaia: Gailivro, 2008.

² FELLINGER, Johannes et al. Mental distress and quality of life in the hard of hearing. Acta Psychiatrica Scandinavica, v. 115, n. 3, p. 243-245, 2007.

Segundo Davis *et al.* (1970 apud FIGUERÊDO, 2015)³ há uma classificação da surdez quanto ao grau de comprometimento da audição que é medido em dB (decibéis), a qual expressa a intensidade do som. A audição normal vai até 25 dB, a perda auditiva leve está entre 26 a 40 dB. A surdez moderada compreende a audição entre 41 a 55 dB. A surdez moderadamente severa está entre 56 a 70 dB. Já a perda auditiva severa é de 71 a 90 dB. Por fim, a perda auditiva profunda, acima a de 91 dB. Esta classificação pode ser representada pela Figura 1.

Figura 1 – Banana da Fala.



Fonte: NORTHEN *et al.*, 1979.

A área acinzentada na Figura 1 representa a Banana da Fala que mostra onde os sons da fala se inserem em um audiograma, considerando sua intensidade e frequência sonora, permitindo identificar quais sons são mais audíveis para um indivíduo com algum grau de perda auditiva. No eixo “x” é representada a frequência, variando de sons mais graves aos mais agudos, enquanto no eixo “y” é representada a intensidade sonora, variando de sons mais fracos ao mais forte. Portanto, qualquer grau de perda auditiva indica uma dificuldade para ouvir esses sons.

Nesse contexto, demonstra-se uma necessidade de desenvolver recursos que auxiliam deficientes auditivos na orientação de sons que normalmente não conseguem ouvir. Conforme visualizado na Figura 1, certos sons cotidianos podem passar despercebidos dependendo do grau

³ DAVIS, H.; SILVERMAN, S. R. Auditory Test Hearing Aids. In: DAVIS, H.; SILVERMAN, S. R. Holt Rinehart and Winston Hearing and Deafness, 1970.

de perda auditiva. Portanto, criar um protótipo que abrange uma faixa de frequência com os sons mais comuns torna-se essencial nessa perspectiva.

2.2 Tecnologia Assistiva (TA)

A Tecnologia Assistiva (TA) engloba uma variedade de produtos, recursos, métodos e serviços destinados a promover a funcionalidade e autonomia de pessoas com deficiências físicas, deficiências visuais, auditivas e de fala. Proporcionando a capacidade de realizar tarefas cotidianas que, de outra forma, seriam difíceis ou impossíveis de executar de forma independente. (SANTOS *et al.*, 2017).

Diferente de outras tecnologias, a TA é vista como um “recurso do usuário”, destinado a acompanhar a pessoa com deficiência em diferentes ambientes e momentos de sua vida cotidiana, promovendo sua autonomia. Dessa forma a TA não se trata de uma tecnologia comum como as outras, visto que “Por princípio, a TA acompanha naturalmente o usuário que o utilizará em diferentes espaços na sua vida cotidiana.” (BERSCH, 2008).

Dessa forma a TA desempenha um papel crucial na inclusão dos deficientes auditivos ao desenvolver soluções que promovam autonomia aos usuários que possuem perda auditiva leve ou profunda. Facilitando a comunicação e a interação com o ambiente em que o usuário está inserido e com as pessoas envolvidas no seu cotidiano.

2.3 Computação vestível - Wearable Computing

Os computadores vestíveis são dispositivos tecnológicos projetados para serem usados como acessórios no corpo do usuário. Sendo capazes de armazenar e processar dados de forma ágil e acessível, devido sua proximidade com o usuário. (MANN, 1998).

Os computadores vestíveis podem ser dotados das capacidades completas de um sistema de computador e se destacam por ser não apenas um dispositivo computacional, mas também por estar integrado como um acessório vestível. Essa integração é o que o diferencia de outros computadores pessoais que não se integram completamente ao cotidiano do usuário. (SZEREMETA, 2013).

Segundo Mann (1998), as características desses dispositivos são:

É um computador que está inserido no espaço pessoal do usuário, é controlado pelo usuário e tem constância operacional e interacional, ou seja, está sempre ligado e sempre acessível. Mais notavelmente, é um dispositivo que está sempre com o usuário, e no qual o usuário pode sempre inserir comandos e executar um conjunto de comandos inseridos.

Os computadores vestíveis estão entrelaçados com o usuário, oferecendo uma experiência

mais integrada e personalizada, permitindo que o usuário execute comandos e acesse informações enquanto realiza diversas atividades. (MANN, 1998).

Um dos exemplos atuais mais utilizados são os relógios inteligentes, conhecidos como smartwatch. Que podem proporcionar ao usuário diversas funcionalidades dependendo do modelo e marca, porém em sua maioria existe a possibilidade de ler e responder tanto e-mails como mensagens de texto, receber notificações, uso de despertadores. Além de possibilitarem o recebimento de alertas e monitoramento de sinais vitais do usuário. (MENDES *et al.*, 2023).

A computação vestível oferece uma oportunidade significativa de aprimorar a acessibilidade para deficientes auditivos. Por meio da integração da tecnologia com acessórios vestíveis, é possível transmitir informações ou alertas em tempo real de forma visual, tátil e vestível. Além disso, esses dispositivos podem facilitar a comunicação com outras pessoas, como por exemplo: utilizar tradutor de Libras ou sistemas de alerta de forma portátil, possibilitando independência e melhorando a qualidade de vida do usuário no dia a dia.

No contexto deste trabalho o protótipo se concentra na simulação de um sistema de alerta vibratório, que poderá servir de base para uma futura implementação de uma pulseira vibratória física, caracterizada como um dispositivo de computação vestível destinado a fornecer alertas táteis para deficientes auditivos.

2.4 Processamento digital de um sinal de áudio utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT)

O processamento digital de sinais realiza a manipulação matemática de sinais com o objetivo de extrair informações relevantes, modificá-los ou aprimorá-los por meio de algoritmos e fundamentos teóricos. Para aplicações de processamento de áudio é fundamental quando se deseja identificar padrões espectrais característicos de um sinal sonoro.

Nesse contexto, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) se destaca como uma técnica amplamente utilizada para converter sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo a extração de informações relevantes sobre os componentes do som, como a identificação de frequências harmônicas e dominantes.

A FFT trata-se de um algoritmo computacional eficiente e que realiza o cálculo da Transformada Discreta de Fourier (DFT). A DFT permite decompor um sinal de tempo discreto e representar as diferentes frequências que compõem esse sinal.

Segundo Martins *et al.* (2016), a DFT é uma ferramenta aplicável a análise espectral de sinais discretos e está relacionada a Transformada de Fourier.

A Transformada de Fourier é a ferramenta essencial para se obter a transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Esta representação, denominada espectro de frequência, é a maneira mais usual de representar as características de um sinal captado. Através do espectro de frequência podem-se avaliar as diversas frequências componentes do sinal e a magnitude de cada um destes componentes.

A equação da Transformada Discreta de Fourier é dada por:

$$X(m) \equiv \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{nm}{N}} \quad (2.1)$$

Com base na Equação 2.1 apresentada, onde $x(n)$ representa o sinal no domínio do tempo e N é o número total de amostras, utiliza-se o algoritmo FFT para otimizar o cálculo da DFT. A qual reduz a complexidade de calcular a DFT de ordem N^2 para ordem $N \log_2 N$. Quando o número de amostras N é elevado, a economia computacional proporcionada pelo algoritmo FFT é tão significativa que torna viável a realização da DFT em tempo real.

O algoritmo da FFT divide a sequência $x(n)$ em duas sequências menores, uma com os coeficientes de índices par e outra com os coeficientes de índices ímpares. Calculando a DFT para cada uma delas e depois combinando-as de modo a se obter a DFT da sequência completa (MARTINS *et al.*, 2016).

No contexto deste trabalho, a FFT será utilizada para analisar sinais de áudio gerados de forma sintética, simulando sons de alerta. Após a captação do som, o algoritmo realiza a transformação para o domínio da frequência e identifica a frequência dominante do sinal, sendo a frequência com maior amplitude no espectro de um sinal. Ou seja, aquela que concentra a maior quantidade da energia.

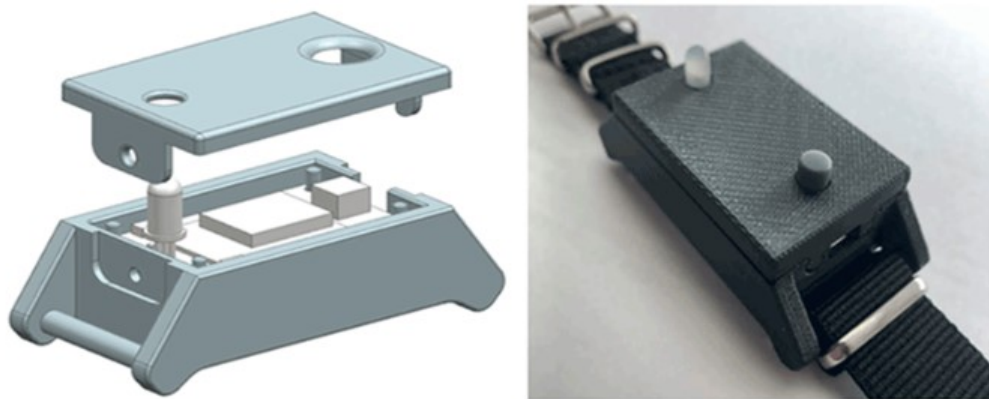
A frequência dominante de um sinal em um espectro de potência é determinada pelo maior valor absoluto do coeficiente da FFT elevado ao quadrado, ou seja, são os picos do espectro gerado a uma taxa de amostragem constante (DANTAS *et al.*, 2015).

A utilização da frequência dominante como critério para emissão dos alertas para o sistema se baseia na premissa de que determinados sons, mesmo sendo perceptíveis para ouvintes normais, podem não ser percebidos por indivíduos com deficiência auditiva, especialmente quando se encontram em faixas de frequência fora do espectro mais audível para aqueles com algum grau de perda auditiva. Dessa forma a análise espectral possibilita a identificação de sons cuja frequência dominante esteja concentrada em uma faixa de interesse.

2.5 Trabalho relacionado: Pulseira de alerta vibratória para notificação de pessoas com Deficiência Visual e Auditiva

Este projeto apresenta uma pulseira de alerta vibratório desenvolvida para uso em asilos, voltada a idosos com deficiência visual ou auditiva. O sistema é composto por duas pulseiras e um aplicativo móvel, comunicando-se via Wi-Fi. As pulseiras, foram colocadas em caixas impressas em 3D e utilizadas como relógios de pulso, possuem duas funções principais: receber um sinal e responder com vibração para alertar o usuário, ou enviar um sinal de emergência ao pressionar um botão.

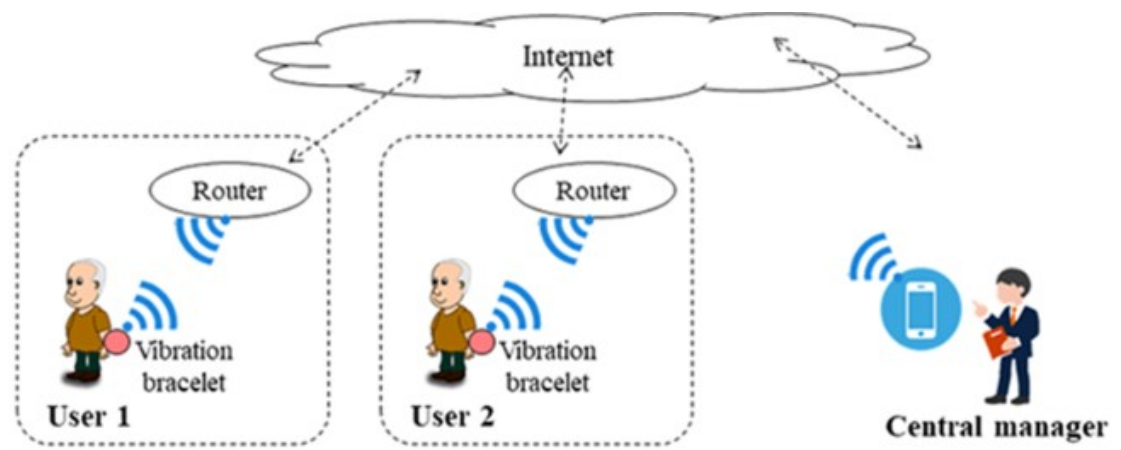
Figura 2 – Modelo 3D impresso da pulseira de alerta vibratório.



Fonte: CONLEY *et al.*, 2019.

Uma das pulseiras é atribuída ao idoso e a outra ao gestor do asilo, que pode enviar alertas a todos ou a usuários específicos, além de receber sinais de socorro por meio de sua própria pulseira e do aplicativo. O projeto foi concebido como uma solução open source, com arquivos de hardware e software disponibilizados publicamente, permitindo replicação e adaptação para diferentes contextos de aplicação.

Figura 3 – Sistema pulseira de alerta vibratório.



Fonte: CONLEY *et al.*, 2019.

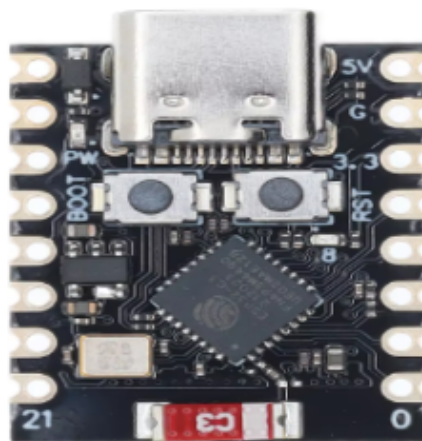
3 METODOLOGIA

3.1 Microcontrolador ESP32-C3 e Motor de Vibração

Neste trabalho será utilizado o microcontrolador ESP32-C3 e um Motor de Vibração. Este microcontrolador foi desenvolvido pela Espressif Systems a qual é 32 bits e é baseado na arquitetura RISC-V. Além de possuir 400 KB de RAM e opera em uma frequência de 160 MHz. Também possui tecnologia Wi-Fi 2.4 GHz e Bluetooth Low Energy (BLE) 5.0. (SYSTEMS, 2024).

Foi escolhido este modelo de microcontrolador principalmente pelo fato de possuir um baixo consumo de energia e processamento de dados de 32bits, o qual irá garantir uma velocidade de processamento mais rápida e tempo de bateria maior. Além disso, sua arquitetura RISC-V é uma vantagem por ser um conjunto de instruções de código aberto, proporcionando custo reduzido ao desenvolver o protótipo com processador de forma gratuita. (SYSTEMS, 2024).

Figura 4 – ESP32-C3.



Fonte: SYSTEMS, 2024.

Além do fato de que a capacidade de se comunicar em Wi-Fi e Bluetooth oferece uma solução eficaz para a comunicação entre o computador e o microcontrolador, visto que para aplicações de computação vestível deve ser levado em consideração a capacidade de armazenar e processar dados de forma rápida acessível, devido sua proximidade com o usuário.

Será utilizado a rede Wi-Fi neste trabalho devido sua capacidade de maior alcance e rápida transmissão de dados. Além da utilização do protocolo de comunicação que será o MQTT, devido sua capacidade de transmitir e receber dados por meio de uma rede, e pela sua arquitetura "*Publish/Subscribe*" a qual terá o publicador que irá transmitir os alertas e o consumidor que irá receber o evento do alerta. (MQTT, 2022).

Portanto, o software analisará os arquivos de áudio e, caso detecte um sinal programado

como alerta, enviará a informação para o microcontrolador.

Quando o microcontrolador ESP32-C3 receber a informação, ele ativará o motor de vibração. O motor, ao ser acionado, notificará o usuário de maneira tátil sobre o alerta de que um sinal sonoro específico foi detectado.

O motor de vibração utilizado é um modelo comercial, operando com uma tensão de 5Vcc e uma corrente de 90mA. Ele será alimentado pelos pinos VCC e GND do microcontrolador, que fornecem 5V para circuitos externos, eliminando a necessidade de uma fonte de bateria externa.

Figura 5 – Motor de Vibração.

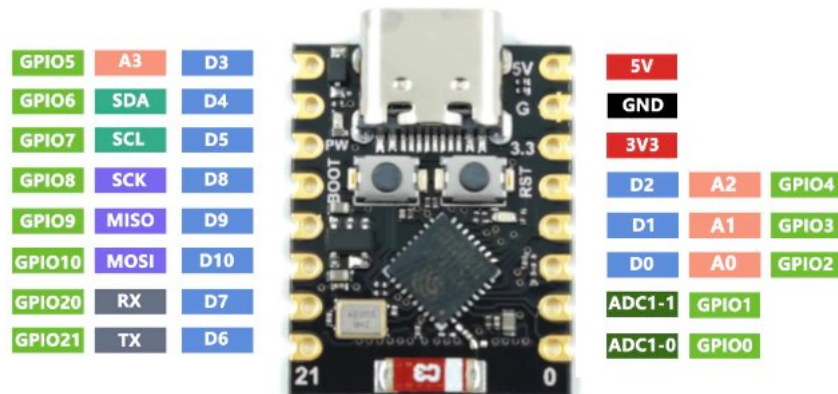


Fonte: ALIEXPRESS, 2024.

3.1.1 Montagem do microcontrolador com o motor de vibração

Na implementação do protótipo, foi utilizado o microcontrolador ESP32-C3, ao qual foram utilizados terminais soldados para permitir a conexão com o motor de vibração. Essa etapa foi necessária, pois a placa utilizada não possui pinos soldados por padrão, o que impede a utilização direta dos GPIOs em uma protoboard ou conexão com fios jumper. Através da Figura 6 pode-se visualizar o esquema de pinagem da placa utilizada neste projeto:

Figura 6 – Pinagem do microcontrolador ESP32-C3.



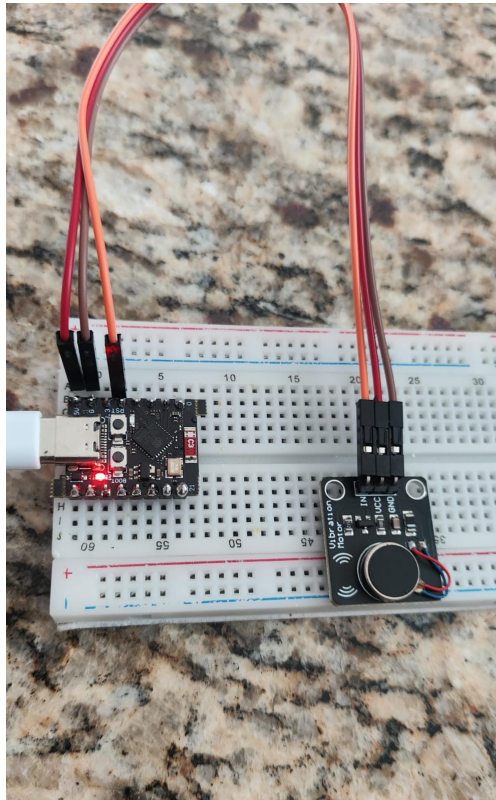
Fonte: FORUM, 2023.

A conexão do motor de vibração foi realizada conforme descrito abaixo:

- Pino 5V: Fornecimento da alimentação ao motor.
- Pino GND: Referência de terra.
- GPIO 4: Configurado como saída digital para envio do sinal de controle, sendo responsável por comandar o acionamento do motor.

Essa configuração permitiu que o microcontrolador controlasse diretamente o funcionamento do motor, reproduzindo o alerta vibratório simulado no projeto. A Figura 7 demonstra a montagem física do circuito, destacando a ligação entre o microcontrolador e o motor de vibração.

Figura 7 – Montagem física do circuito do microcontrolador ESP32-C3.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

3.2 Software Audacity

Para gerar os sinais sonoros de forma sintética, foi utilizado o software Audacity, um software de código aberto voltado para gravação e edição de áudio (AUDACITY, 2024), que oferece ferramentas próprias para geração de tons. A escolha por essa ferramenta se deve à sua praticidade na criação de sons com características específicas, o que é ideal para simulações.

O objetivo de incluir sinais sintéticos foi para criar um cenário de teste controlado, permitindo avaliar o desempenho do algoritmo sem interferência de ruídos ou outros elementos sonoros. Para isso, foram gerados tons puros em frequências específicas dentro e fora da faixa de 250 Hz a 1000 Hz, definida com base na análise dos áudios utilizados neste trabalho.

3.3 Áudios representativos de um ambiente real

Além dos sons sintéticos gerados, também foram utilizados efeitos sonoros representativos de situações reais, a fim de tornar os testes do sistema mais próximos de um cenário cotidiano. Não foram realizadas gravações com microfone em tempo real, pois isso exigiria equipamentos de boa qualidade e técnicas de tratamento de áudio para lidar com ruídos, distorções e outras variáveis, o que não é o foco deste trabalho.

Os sons utilizados foram obtidos no site Depositphotos, uma biblioteca digital que disponibiliza conteúdos como imagens, vídeos e áudios livres de royalties. Os arquivos de áudio utilizados neste trabalho foram baixados na opção "baixar amostra", que oferece uma prévia do som original.

Na análise dos áudios disponíveis no site, observou-se maior frequência de ocorrência de sons como:

- Cachorro latindo
- Campainha tocando
- Bebê chorando
- Aspirador de pó

Esses sons apresentaram componentes espectrais que, em sua maioria, se situavam entre 250 Hz e 1000 Hz, o que motivou a definição dessa faixa como intervalo de interesse para emissão do alerta ao usuário.

No caso dos áudios sintéticos, a escolha da faixa seguiu o mesmo critério: gerar sinais em frequências representativas dos intervalos mais recorrentes nos áudios analisados, garantindo que os testes contemplassem condições compatíveis com os áudios.

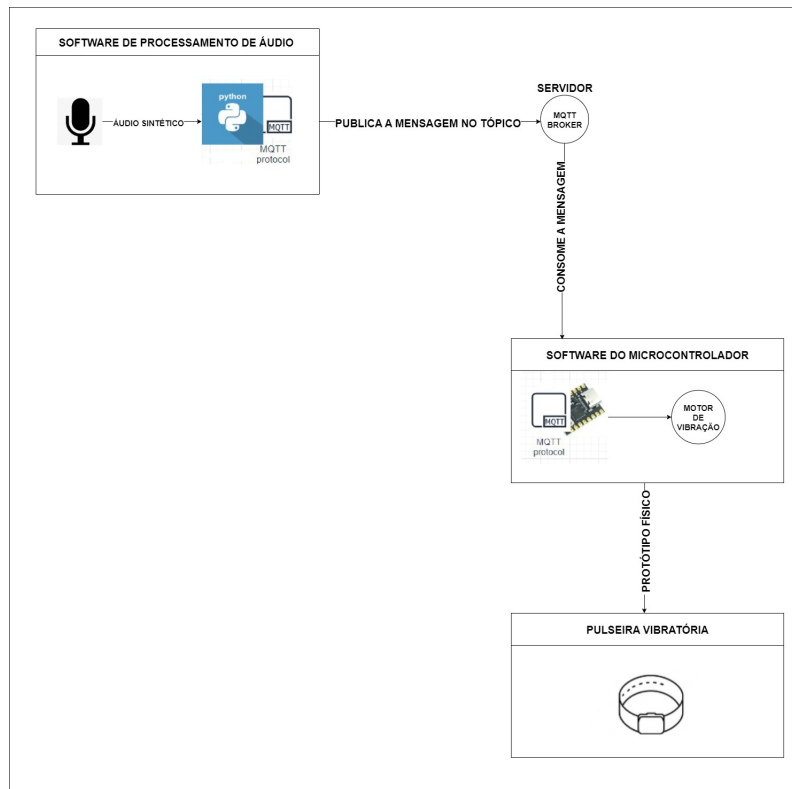
3.4 Arquitetura do Protótipo

Através do fluxograma da Figura 8 pode ser visualizado o processo de captação de áudio, processamento e envio do alerta ao usuário.

Será desenvolvido um software em Python que receberá o áudio gerado de forma sintética como entrada. O software utilizará a Transformada Rápida de Fourier (FFT), a qual é um algoritmo que calcula a Transformada Discreta de Fourier (DFT). A FFT será usada para converter o sinal de áudio em componentes espectrais, fornecendo informações sobre as frequências presentes naquele sinal. (GONÇALVES, 2004).

Caso uma frequência determinada como alerta seja identificada, o software publicará uma mensagem no "EMQX", que é o Broker MQTT responsável por ser o servidor central e por gerenciar a comunicação entre todas as mensagens recebidas pelo publicador e que é encaminhada para o consumidor, que neste trabalho será o Microcontrolador, conectado à rede Wi-Fi como assinante desse tópico. Após a mensagem ser recebida pelo microcontrolador, ele ativará o motor de vibração que irá simular o alerta ao usuário de forma tátil de que foi detectado o som na frequência determinada.

Figura 8 – Fluxograma.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após realizar a programação do microcontrolador ESP32-C3 e a integração com o motor de vibração, é realizado a montagem do protótipo físico, integrando esses dispositivos em uma pulseira a ser fabricada. Para isso, a pulseira poderá ser construída utilizando um molde gerado por impressora 3D ou confeccionada com materiais de baixo custo, como couro ou borracha. A Figura 2 e a Figura 9 apresentam exemplos de moldes de pulseiras que podem servir como referência.

Figura 9 – Modelo de Couro da pulseira de alerta vibratório.



Fonte: ADAFRUIT, 2015.

Embora neste trabalho não seja construída fisicamente a pulseira vibratória, o projeto foi realizado de forma a permitir sua futura implementação. A ideia é que, em versões posteriores, o microcontrolador e o motor de vibração sejam integrados em um dispositivo vestível, como uma pulseira, fabricada a partir de um molde produzido por impressora 3D ou confeccionada com materiais de baixo custo, como couro ou borracha.

O objetivo é utilizar materiais de baixo custo para garantir que o protótipo seja acessível. Além disso, o molde deverá ser adequado e confortável para uso cotidiano, aplicando o conceito de Computação Vestível, que envolve a utilização de dispositivos tecnológicos como acessórios utilizados diretamente no corpo do usuário, proporcionando acessibilidade aos alertas táteis enquanto o usuário realiza suas atividades diárias.

4 RESULTADOS

4.1 Áudios Sintéticos

No software Audacity foram gerados dois áudios sintéticos com o som em forma de onda senoidal, que é uma forma de onda simples e que é ideal para analisar apenas a frequência sem interferência de outros elementos do som. A amplitude foi definida como 1, que é o valor máximo permitido pelo software Audacity.

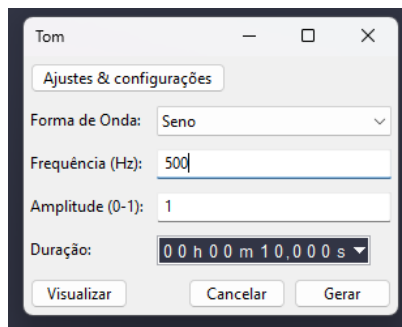
Além disso cada áudio analisado, foi gerado um espectrograma, que exibe como a energia do sinal se distribui ao longo do tempo e das frequências, sendo útil para visualizar claramente quais frequências estão presentes no som gerado.

4.1.1 *Áudio gerado com a Frequência Dominante de 500 Hz*

Foi gerado um áudio, com frequência de 500 Hz, que está dentro da faixa de interesse definida (250 Hz a 1000 Hz). O som foi utilizado para simular uma situação em que o software deveria identificar um alerta.

Na Figura 10 é possível visualizar os ajustes realizados no Audacity para gerar o som com as características desejadas.

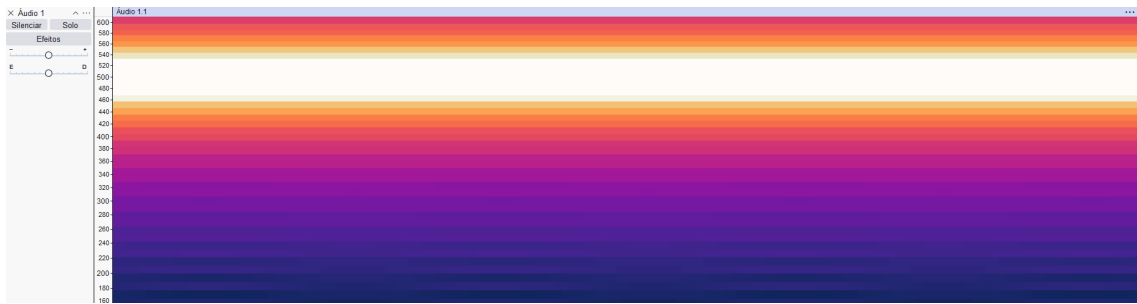
Figura 10 – Configuração para gerar o áudio de 500 Hz.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após a geração do som, foi utilizado o próprio Audacity para gerar o espectrograma e verificar se o áudio produzido estava conforme o esperado.

Figura 11 – Espectrograma do áudio de 500 Hz.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

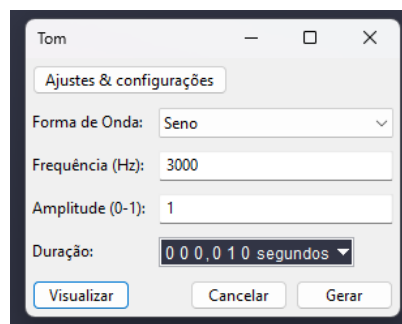
Através do espectrograma da Figura 11, é possível confirmar que o som gerado apresenta uma frequência dominante de 500 Hz, pois essa é a faixa em que há maior concentração de energia, representada com mais intensidade de cor no gráfico.

4.1.2 *Áudio gerado com a Frequência Dominante de 3000 Hz*

Também foi gerado um áudio, com frequência de 3000 Hz, que está fora da faixa de interesse definida (250 Hz a 1000 Hz). O objetivo desse áudio é testar se o software ignora corretamente sons cuja frequência dominante está fora da faixa monitorada.

Na Figura 12, é possível observar os parâmetros utilizados no Audacity para gerar esse som.

Figura 12 – Configuração para gerar o áudio de 3000 Hz.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após a geração do som, foi utilizado o próprio Audacity para gerar o espectrograma e verificar se o áudio produzido estava conforme o esperado.

Figura 13 – Espectrograma do áudio de 3000 Hz.



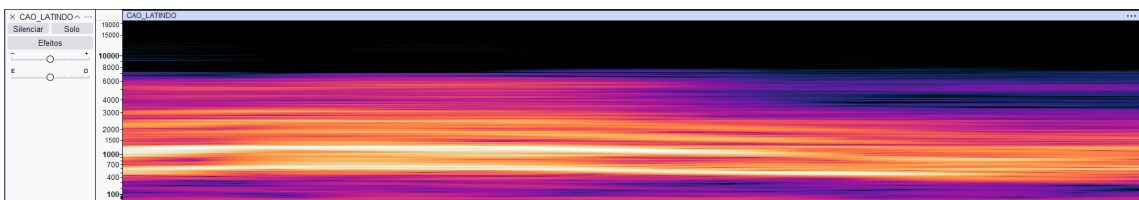
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

No espectrograma da Figura 13, é possível observar que a frequência de 3000 Hz concentra a maior quantidade da energia do sinal, o que confirma que esse áudio possui uma frequência dominante fora da faixa de interesse, e portanto não deve gerar um alerta no software.

4.1.3 Áudios representativos de um ambiente real

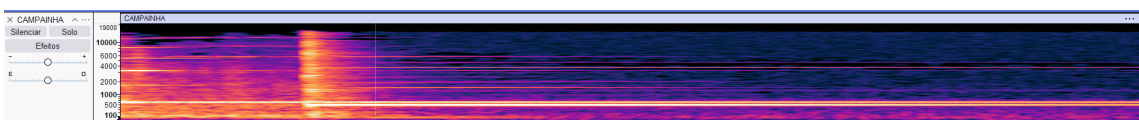
A seguir está representado os espectrograma dos áudios representativos de um ambiente real e que foram gerados pelo software Audacity, a fim de verificar a quantidade de energia do sinal a frequência dominante presente.

Figura 14 – Espectrograma áudio cachorro latindo.



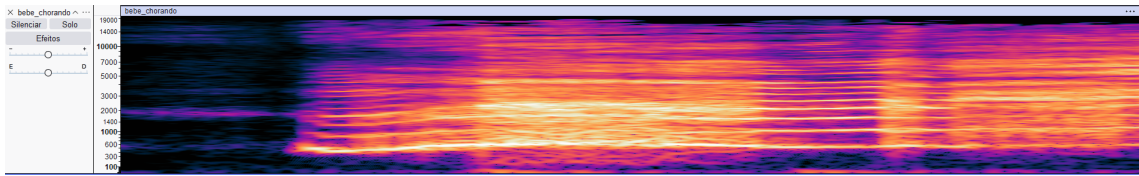
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 15 – Espectrograma áudio campainha tocando.



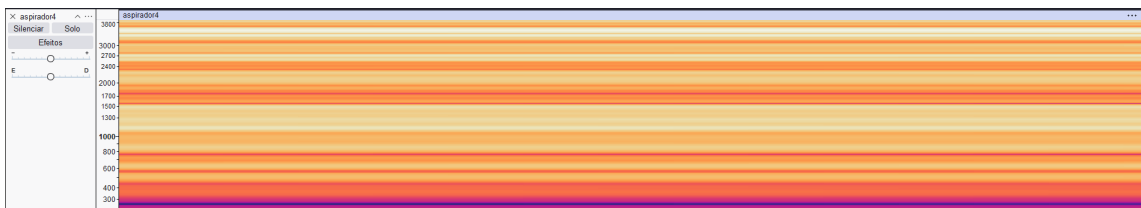
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 16 – Espectrograma áudio bebê chorando.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 17 – Espectrograma aspirador de pó.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

- Na Figura 14, observa-se que a energia parece estar mais concentrada em frequências um pouco acima de 1000 Hz, sugerindo que esse som pode não ser detectado pelo software como um alerta, dependendo da frequência dominante exata.
- A Figura 15 indica uma concentração de energia próxima dos 500 Hz, o que pode estar dentro da faixa considerada relevante no software.
- A a Figura 16 mostra uma concentração de energia em torno de 600 Hz, o que também sugere que o software pode identificar esse som como um alerta válido.
- Já a Figura 17 Observa-se que a energia do sinal está mais concentrada em torno de 3700 Hz, um pouco abaixo de 3800 Hz, pois essa é a região com maior intensidade no gráfico. Sugerindo que o software não reconhecerá esse som como um alerta válido, por estar fora da faixa de frequências esperada.

Vale ressaltar que embora o espectrograma ofereça uma boa visualização da distribuição de energia, ele não permite determinar com exatidão a frequência dominante apenas pela análise visual. No entanto, ele já fornece uma indicação sobre quais sons estão dentro da faixa esperada para disparar os alertas no software.

4.2 Desenvolvimento do Software de Processamento de Áudio

Para o desenvolvimento do software responsável pelo processamento dos sinais de áudio, foi utilizada a linguagem de programação Python. A escolha se deve ao fato de ser uma linguagem de alto nível, com sintaxe simples e com grande variedade de bibliotecas.

O processamento de áudio é realizado por meio da FFT e para isso foi utilizada a biblioteca `scipy.fft`, responsável por aplicar a FFT no sinal de áudio.

As bibliotecas e suas funções usadas neste trabalho foram:

- `scipy.fft`: Utilizada para aplicar a FFT no sinal, convertendo do domínio do tempo para o domínio da frequência.
- `scipy.io`: Utilizada neste trabalho para ler arquivos de áudio no formato wav (Waveform Audio File Format).
- `numpy`: Utilizada para operações numéricas, manipulação de arrays e vetores, e para auxiliar nos cálculos matemáticos necessários ao processamento.
- `matplotlib.pyplot`: Utilizada para gerar gráficos, como a representação do espectro de frequência de cada áudio processado.
- `IPython.display` : Utilizada para reproduzir os áudios diretamente no ambiente Jupyter Notebook.

Com base nas bibliotecas mencionadas, foi elaborado o código do software de processamento de áudio. O fluxo definido segue as seguintes etapas: leitura do arquivo wav, com pré-processamento do sinal; aplicação da FFT; extração da frequência dominante; verificação se essa frequência está dentro da faixa de interesse (250 Hz a 1000 Hz) considerando uma margem tolerância de 10%, e por fim, geração de uma resposta informando se o áudio analisado representa ou não um alerta.

4.2.1 *Leitura do arquivo de áudio e Pré-processamento do sinal de áudio*

Para realizar a leitura dos áudios, tanto os gerados quanto os baixados, os arquivos foram adicionados a pasta do programa e verificados quanto ao formato wav. Esse formato foi escolhido devido sua capacidade de armazenar áudio sem compressão, mantendo o todas as informações do sinal de áudio.

Após o carregamento, é necessário verificar se o áudio é estéreo ou monofônico (mono). Áudios estéreo possuem dois canais (esquerdo e direito), representando dois sinais distintos, a qual poderia aumentar a complexidade do processamento do áudio. Por outro lado, os áudios mono possuem somente um único sinal, onde todas as informações do som estão combinadas em um único canal, o que simplifica o processamento e facilita a identificação da frequência dominante.

Para realizar essa verificação, foi implementada uma verificação condicional no código. Caso o áudio seja estéreo, é realizada a média dos valores dos dois canais em cada ponto no tempo, resultando em um único vetor de áudio. Em seguida, independente do número de canais

original, o áudio é limitado a 80.000 amostras, a qual tem como objetivo reduzir a quantidades de dados processados, tornando o processamento mais rápido.

4.2.2 *Aplicação da Transformada Rápida de Fourier*

Após realizado a leitura do arquivo de áudio e o pré-processamento do sinal, é realizada a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) por meio da função *serieFourier()*, desenvolvida com base na biblioteca *scipy.fft*. A qual essa função foi criada para converter o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, possibilitando a identificação das componentes espectrais presentes no áudio.

A escolha do nome *serieFourier()* para esta função está relacionada ao conceito de que para analisar sinais de tempo contínuo usando ferramentas computacionais, é necessário representá-los por meio de uma versão amostrada e finita. Isso ocorre porque os computadores não lidam com sinais infinitos. Portanto, para poder processá-los é preciso realizar a amostragem, convertendo o sinal contínuo em uma sequência discreta de valores.

Uma vez que o sinal foi discretizado, a função aplica a FFT para decompor esse sinal em suas componentes de frequência. Durante essa etapa, o código realiza as seguintes fases de processamento:

- A FFT é normalizada, dividindo o resultado da FFT pelo co número de amostras, para que a escala de amplitude esteja corretamente ajustada e gere proporcionalmente a intensidade das frequências correta.
- É retirado o espelhamento gerado pela simetria da FFT. Isso ocorre porque, ao aplicar a FFT em sinais reais, o resultado apresenta simetria: as frequências negativas são um espelho das frequências positivas. Como essas informações são redundantes, apenas a metade positiva do espectro é utilizada na análise.
- Em seguida, as frequências diferentes de zero têm seu módulo dobrado, para compensar a energia do sinal que foi retirada com o espelhamento. Multiplicando a saída FFT por 2 para reproduzir a amplitude dos sinais originais.

Após essas fases concluídas, obtém-se o espectro de frequência do sinal de áudio através da FFT, permitindo a extração da frequência dominante. A qual torna-se possível verificar se essa frequência dominante se encontra dentro da faixa de interesse definida (250 Hz a 1000 Hz).

4.2.3 *Verificação da frequência dominante*

Para identificar a frequência dominante do sinal de áudio, foi criada a função *verificar-faixa-frequencia()*. A qual identifica a frequência com maior magnitude utilizando a função *np.argmax()* da NumPy. Essa função retorna o índice da maior magnitude em um *array*, indicando

o pico da frequência dominante. A partir desse valor, é possível verificar através de uma lógica condicional se a frequência dominante está dentro da faixa desejada.

Inicialmente, a função define a faixa de frequência de interesse, a qual para este trabalho foi estabelecida em 250 Hz a 1000 Hz. Em seguida para tornar a detecção do alerta com mais confiabilidade, foi aplicada uma margem de tolerância de 10% em relação a faixa definida. A qual amplia o intervalo válido para frequências entre 225 Hz à 1100 Hz. Essa tolerância foi adotada considerando que sinais de áudio podem apresentar pequenas variações na frequência, além de sofrerem interferências como ruído e distorções. Um critério de verificação rigoroso poderia limitar a identificação de sons relevantes que estejam um pouco fora dos limites exatos. Em um sistema de alerta a confiabilidade é crucial, sendo mais adequado aceitar pequenas variações do que deixar de identificar alertas de sons importantes.

Após definir a margem de tolerância, a frequência dominante extraída do áudio é submetida a uma lógica condicional que verifica se ela está dentro do intervalo permitido. Caso seja verdadeiro a condição, o sistema retorna a mensagem: "*A frequência dominante está dentro da faixa de tolerância*". Caso seja falso, retorna: "*A frequência dominante NÃO está dentro da faixa de tolerância*".

4.2.4 Visualização gráfica da verificação da frequência dominante

Com as funções da FFT e de verificação da faixa de frequência implementadas, é possível obter uma visualização gráfica dos resultados por meio da função *plotar-audio()*. A qual gera um gráfico contendo o espectro de frequência do sinal, permitindo analisar a frequência dominante identificada no áudio.

A visualização gráfica serve como uma ferramenta complementar para validar se o retorno da lógica condicional, responsável por verificar se a frequência dominante está dentro da faixa de interesse, está coerente com os dados reais do sinal analisado. Dessa forma, o gráfico atua como uma confirmação visual do processamento realizado pelo software.

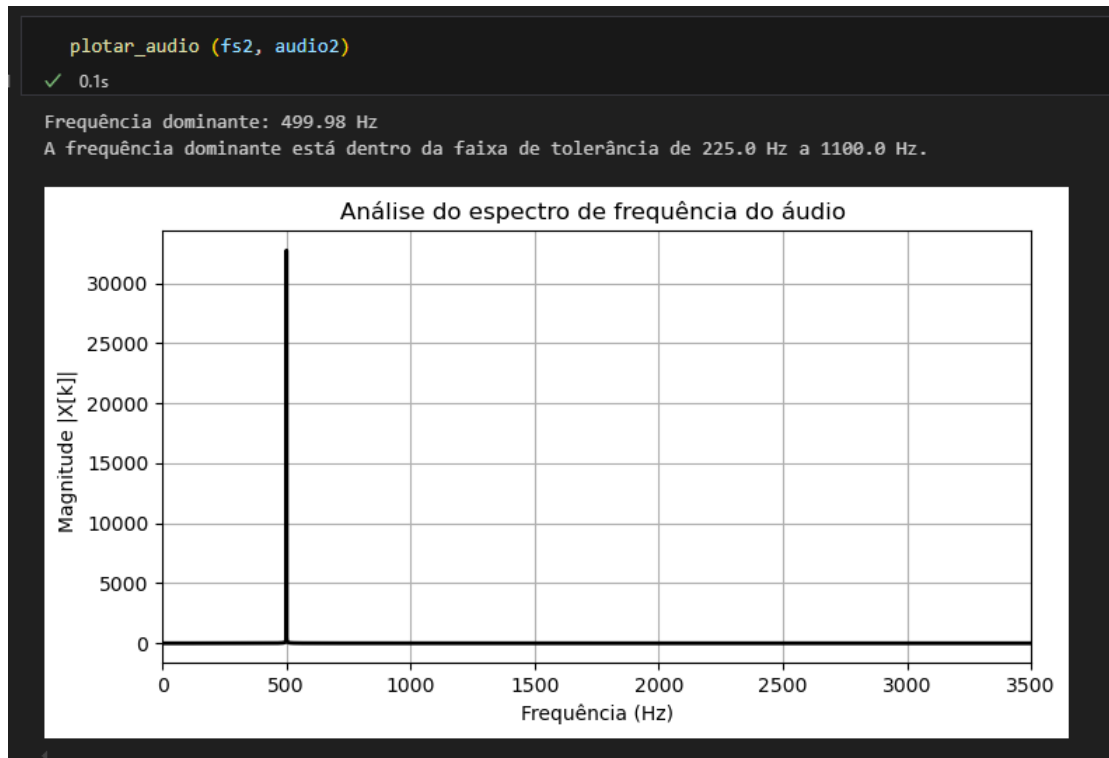
4.2.4.1 Visualização gráfica - Áudio gerado com a Frequência Dominante de 500 Hz

Com base no resultado apresentado no gráfico da Figura 18, observa-se que o software identificou corretamente a frequência dominante e indicou se ela está dentro da faixa de tolerância estabelecida. Nota-se que houve acerto na lógica condicional implementada, uma vez que o gráfico evidencia um pico acentuado em 500 Hz, e o sistema retornou esse mesmo valor como a frequência dominante na saída exibida pelo sistema. No gráfico, observa-se apenas a presença de uma única frequência dominante, isso ocorre devido ao fato que o áudio utilizado é um sinal senoidal puro, contendo apenas uma frequência e sem a presença de ruídos ou distorções. A qual era um resultado esperado, visto que se trata de um áudio sintético.

Outro aspecto a ser destacado é que a magnitude $|X[k]|$ representa a intensidade de

cada componente de frequência presente no sinal. Indicando a proporção de energia associada a determinada frequência: quanto maior a magnitude, mais significativa é a presença dessa frequência no sinal original. Além disso, optou-se por exibir os gráficos em escala linear de magnitude, ao invés de usar a escala logarítmica em decibéis (dB), pois o objetivo é identificar a frequência dominante no sinal, e não realizar uma comparação dos níveis de intensidade sonora entre diferentes sinais.

Figura 18 – Espectro de frequência do áudio de 500 Hz.



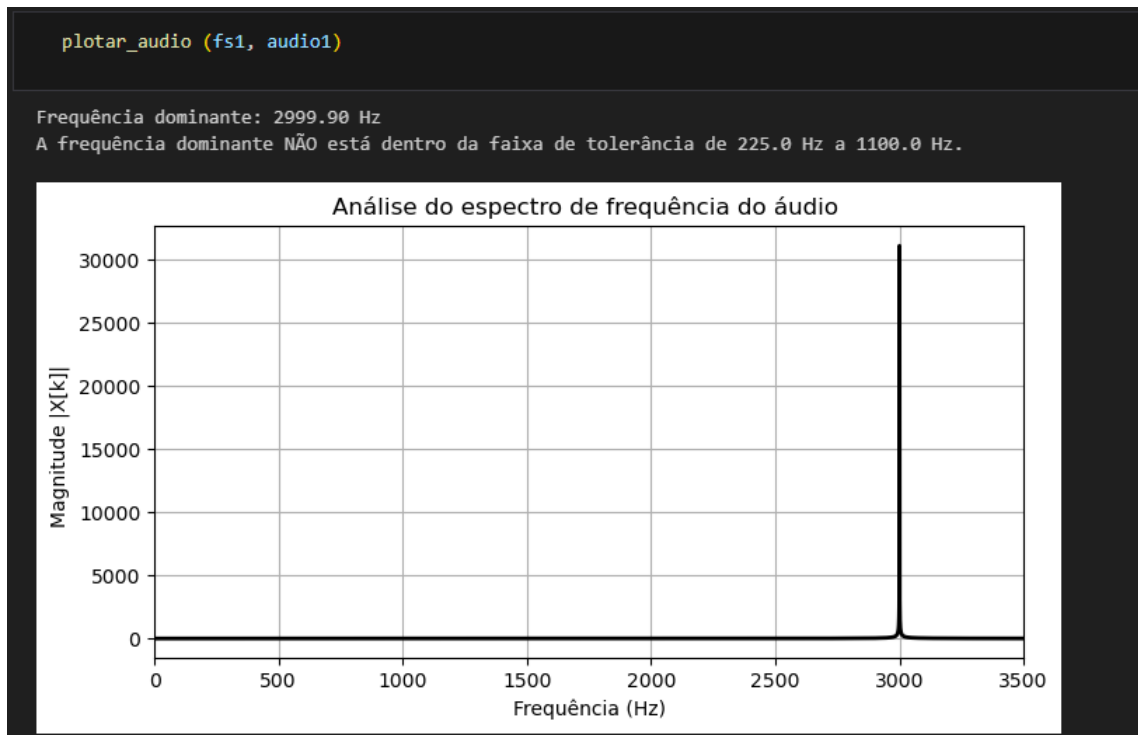
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.2.4.2 Visualização gráfica - Áudio gerado com a Frequência Dominante de 3000 Hz

No gráfico da Figura 19, é possível observar um pico acentuado em 3000 Hz, evidenciando que esta é a frequência dominante do sinal analisado. Além disso observa-se que o software identificou corretamente esse valor e retornou uma saída informando que a frequência dominante está fora da faixa de interesse definida (250 Hz a 1000 Hz, com 10% de tolerância).

Esse resultado demonstra que o software está operando de forma adequada, pois além de detectar corretamente a frequência dominante, também é capaz de emitir a resposta negativa quando esta se encontra fora da faixa permitida.

Figura 19 – Espectro de frequência do áudio de 3000 Hz.



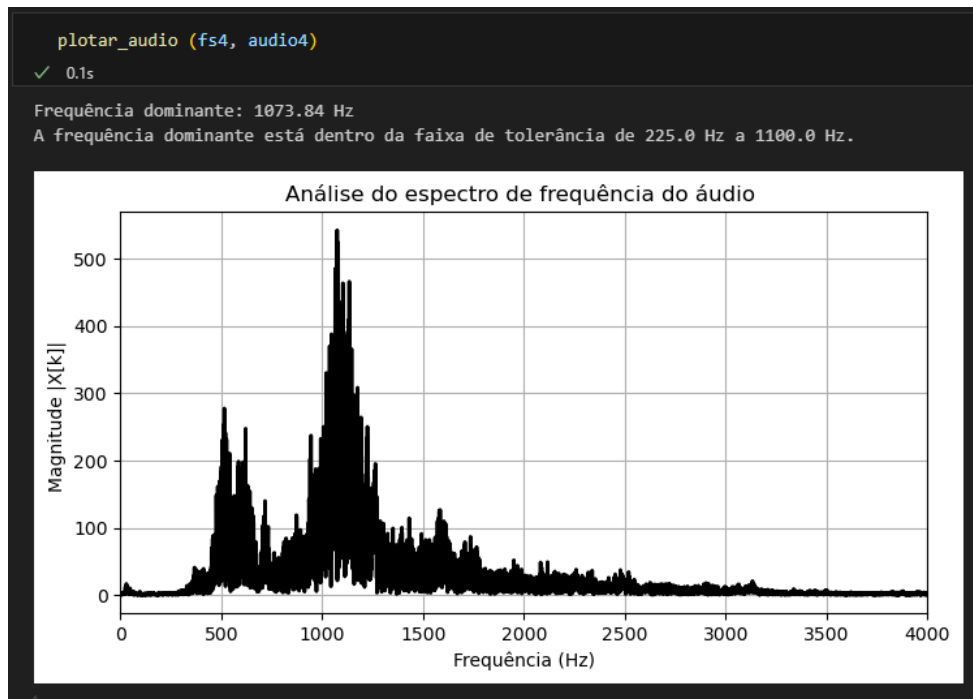
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.2.4.3 Visualização gráfica - Áudios representativos de um ambiente real

Após a verificação inicial com sinais sonoros sintéticos, foram inseridos áudios que simulam situações reais do cotidiano, a fim de testar a aplicabilidade do software em um ambiente mais próximo da realidade. Dessa forma espera-se que o sistema consiga identificar corretamente a frequência dominante desses sons e classificar se eles estão ou não dentro da faixa de interesse para geração de alerta.

No gráfico da Figura 20 refere-se ao som do cachorro latindo, a qual apresenta uma frequência dominante de aproximadamente 1073,84 Hz. Apesar de este valor estar um pouco acima do limite superior da faixa de interesse de 1000 Hz, o sistema o classificou como sinal válido devido a margem de tolerância de 10% aplicada ao intervalo. No espectro de frequência, observa-se a presença de outras componentes com energia significativa, mas o pico de maior magnitude ocorre em 1073,84 Hz. Isso demonstra que o sistema conseguiu reconhecer corretamente a frequência dominante e classificá-la de forma adequada.

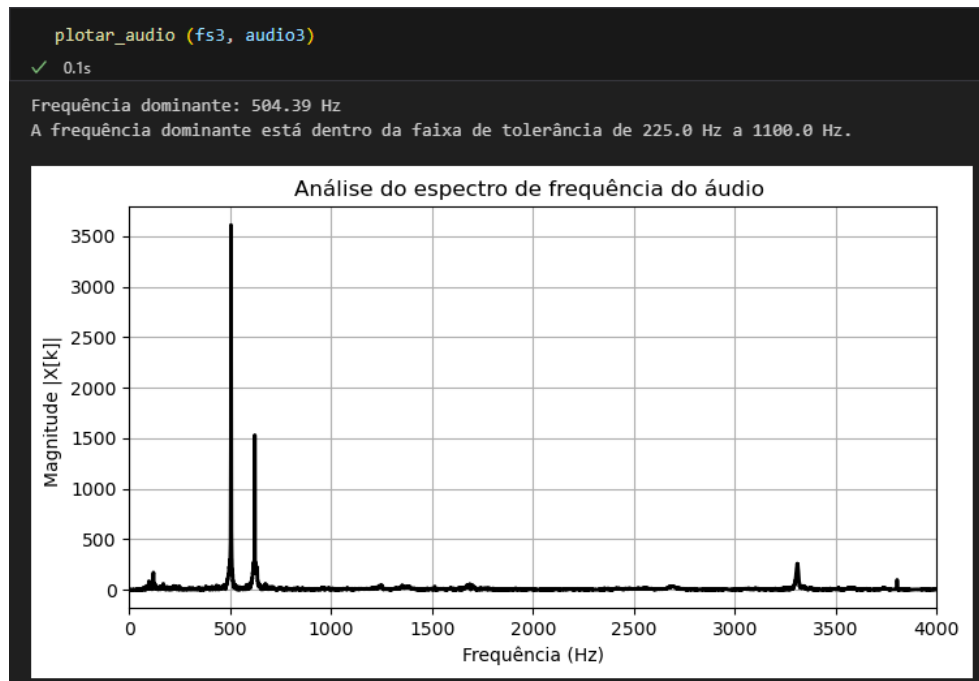
Figura 20 – Espectro de frequência do áudio cachorro latindo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na Figura 21, tem-se o gráfico referente ao som de uma campainha tocando. Neste caso, o sistema identificou uma frequência dominante de 504,39 Hz, valor que se encontra dentro da faixa de interesse definida como alerta no sistema. O espectro apresenta um pico bem acentuado, com quase nenhuma outra frequência relevante, o que condiz com a característica do som de uma campainha que geralmente composto por um tom constante.

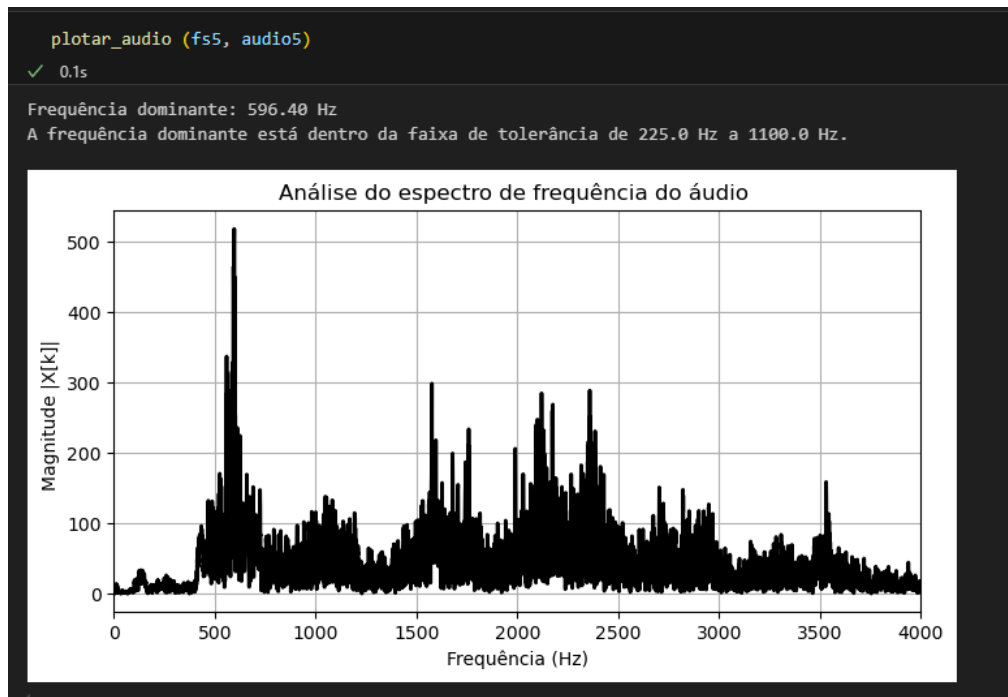
Figura 21 – Espectro de frequência do áudio campainha tocando.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Já gráfico da Figura 22 apresenta o espectro do som do choro de um bebê. A frequência dominante detectada foi de 596,48 Hz, também situada dentro da faixa de interesse definida pelo sistema. O gráfico mostra outras componentes de frequência com diferentes níveis de energia, como é esperado em sons vocais. No entanto, a frequência de 596,48 Hz se destaca claramente como a de maior magnitude, permitindo ao sistema classificá-la corretamente como um alerta válido.

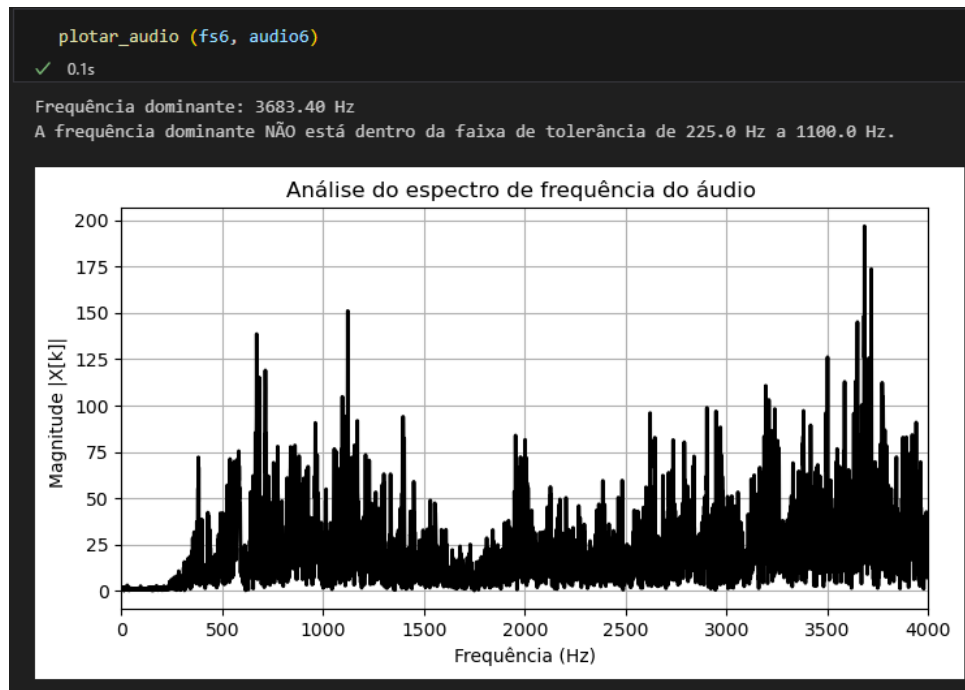
Figura 22 – Espectro de frequência do áudio bebê chorando.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Por fim o gráfico da Figura 23 refere-se ao som de um aspirador de pó, A frequência dominante identificada foi de 3683,40 Hz, valor que está acima da faixa de interesse estabelecida. O espectro apresenta uma ampla distribuição de frequências, porém o sistema conseguiu distinguir corretamente a frequência dominante e classificou o som como não sendo um alerta. Esse resultado reforça a capacidade do algoritmo de identificar não apenas quando um som deve gerar alerta, mas também de filtrar adequadamente sinais que não representam eventos relevantes.

Figura 23 – Espectro de frequência do áudio aspirador de pó.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.2.5 Análise do consumo de memória e tempo de execução do Software de Processamento de Áudio

Para avaliar o desempenho do software desenvolvido, foi realizada a medição do consumo de memória RAM e do tempo necessário para processar os arquivos de áudio. A análise foi executada em todos os sinais de áudio utilizados nos testes, considerando a etapa completa de processamento, que inclui a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a verificação da frequência dominante por meio da função *verificar-faixa-frequencia()*

Através da Tabela 1, pode-se verificar os resultados obtidos:

Tabela 1 – Resultados de consumo de memória e tempo de execução para cada áudio analisado

Áudios analisados	Memória utilizada	Tempo de execução
Áudio de 500 Hz	1,8438 MB	0,3579 s
Áudio de 3000 Hz	1,8906 MB	0,3456 s
Áudio cachorro latindo	2,1211 MB	0,3132 s
Áudio campainha tocando	1,8711 MB	0,3486 s
Áudio bebê chorando	2,4727 MB	0,3512 s
Áudio aspirador de pó	1,8594 MB	0,3795 s

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O valor de memória utilizada representa o aumento no consumo de RAM durante o processamento do áudio. Esse valor é obtido medindo-se a quantidade de memória usada pelo

programa antes do início da execução e comparando-a com o maior uso registrado durante o processamento (valor máximo). A diferença entre esses dois valores corresponde à memória adicional necessária para executar a análise, conforme medido pela biblioteca *memory-profiler*. Os resultados mostram que o software exigiu entre 1,84 MB e 2,47 MB para processar cada áudio, o que representa uma baixa demanda computacional.

O tempo de execução corresponde à duração total do processamento, incluindo a leitura do arquivo, aplicação da FFT e análise da frequência dominante. Todos os áudios foram processados em aproximadamente 0,31 a 0,37 segundos.

Entretanto, vale ressaltar que a limitação do áudio para 80.000 amostras teve como objetivo reduzir o consumo de memória e o tempo de execução da análise. Dessa forma, os resultados de consumo de memória e tempo de execução estão relacionados a essa redução de dados processados, o que torna o processamento mais rápido. Por outro lado, essa limitação também restringe a análise apenas ao trecho inicial do áudio, o que pode fazer com que sons relevantes fora dessa janela não sejam detectados como um alerta. Em trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a janela de análise dos dados a serem processados.

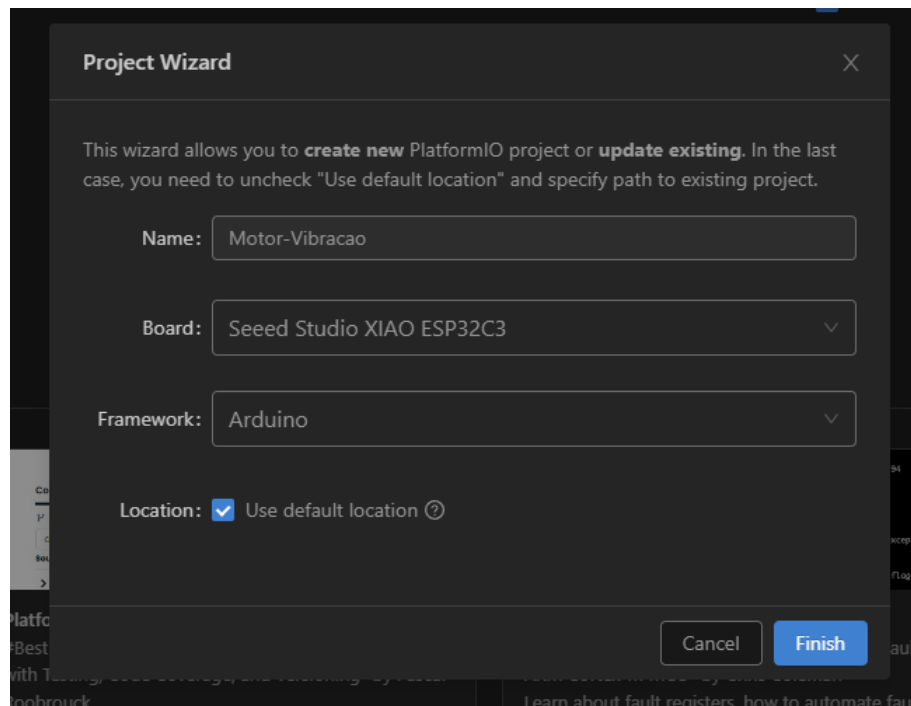
4.3 Implementação da integração entre o ESP32-C3 e o Motor de Vibração

4.3.1 Configuração do projeto na plataforma PlatformIO

Para a implementação da integração entre o microcontrolador ESP32-C3 e o motor de vibração, utilizou-se o ambiente de desenvolvimento Visual Studio Code, que permite a instalação da extensão PlatformIO IDE, a qual é uma plataforma empregada no desenvolvimento de sistemas embarcados.

Inicialmente foi necessário configurar o projeto, incluindo a definição da placa a ser utilizada (Seeed XIAO ESP32-C3) e o framework adotado (Arduino). Essas configurações são realizadas no arquivo *platformio.ini*, responsável por definir todos os parâmetros do projeto. Através da Figura 24 pode-se visualizar os parâmetros configurados.

Figura 24 – Configuração do projeto na plataforma Platformio.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.3.2 Desenvolvimento do Código de Controle do ESP32-C3

Após a parametrização do projeto na plataforma PlatformIO foi feita a implementação do código do microcontrolador ESP32-C3. O código elaborado tem como principal função permitir a recepção de comandos via protocolo MQTT, e com base nesses comandos controlar o acionamento do motor de vibração conectado ao pino GPIO 4. Toda a lógica foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação C++.

Inicialmente o código estabelece uma conexão com a rede Wi-Fi local utilizando o SSID e senha configurados. Uma vez conectado, realiza a conexão com o broker MQTT público e gratuito EMQX, na porta 1883, e se inscreve no tópico "pulseira/vibrar", por meio do qual os comandos de alerta são recebidos.

Quando uma nova mensagem chega no tópico, o ESP32-C3 executa automaticamente a função `onMessageReceivedMqtt()`, que interpreta o conteúdo recebido. Caso a mensagem seja igual a "Alerta!", o microcontrolador aciona o motor de vibração, enviando um sinal de nível alto por um intervalo de 1 segundo. Além disso, é exibida no terminal a mensagem "Alerta!", possibilitando que seja visualizado que a mensagem recebida é um alerta.

Por outro lado, caso a mensagem recebida seja diferente de um alerta, nenhuma ação é executada, porém é exibido no terminal a mensagem "Não é um alerta", permitindo o acompanhamento de todas as mensagens recebidas, mesmo aquelas que não são um alerta.

Além disso, a função `powerOnPort()` que é responsável por acionar o motor de vibração.

Ela recebe como parâmetros o número do pino a ser acionado e o tempo de ativação em milissegundos. Seu funcionamento consiste em exibir a mensagem "Ligando porta..."no terminal, ativar o pino digital (nível alto), manter o pino ativo pelo tempo especificado e em seguida desativá-lo (nível baixo), encerrando a vibração do motor.

Através da Figura 25 pode ser visualizado como são exibidas as mensagens recebidas no terminal conforme descrito acima.

Figura 25 – Exibição mensagens no terminal.

```
Mensagem recebida [pulseira/vibrar]: Alerta!  
Alerta!  
Ligando porta...  
Mensagem recebida [pulseira/vibrar]: Não é um alerta  
Não é um alerta
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.4 Comunicação entre o Software de Processamento de Áudio e o ESP32-C3

A comunicação entre o software de processamento de áudio e o microcontrolador ESP32-C3 foi estabelecida utilizando o protocolo MQTT. Nesse contexto, o software atua como publicador (*publisher*), enquanto o ESP32-C3 desempenha o papel de assinante (*subscriber*).

A lógica de publicação é executada sempre que o software detecta que a frequência dominante do áudio analisado está dentro da faixa de interesse. Quando essa condição é atendida é enviado uma mensagem de "Alerta!" para o tópico "pulseira/vibrar". Caso contrário, publica a mensagem "Não é um alerta". Essa lógica é implementada na função *verificar-faixa-frequencia()*, que chama a função auxiliar *publicar-mensagem-mqtt()* responsável por realizar a publicação da mensagem.

Na função *publicar-mensagem-mqtt()* o envio da mensagem é feito com QoS=1 (Qualidade de Serviço) que refere-se ao nível de garantia de entrega de mensagens entre o publicador e o assinante. Dessa forma o publicador envia a mensagem ao broker e exige uma confirmação de recebimento (PUBACK) por parte do assinante, garantindo que a mensagem será entregue pelo menos uma vez.

Ja o consumidor da mensagem permanece conectado ao broker e inscrito no tópico "pulseira/vibrar". A lógica implementada prevê que sempre que uma nova mensagem for publicada no tópico, a função *onMessageReceivedMqtt()* será acionada automaticamente. O conteúdo da mensagem é convertido para String e comparado ao texto "Alerta!". Caso o conteúdo corresponda a um alerta, o microcontrolador executa a rotina de controle do motor de vibração, conforme descrito anteriormente.

Dessa forma essa estrutura de comunicação assegura que ao identificar uma frequência de interesse, o software publique a mensagem de alerta e o microcontrolador a receba, acionando o motor de vibração conforme necessário. Foi considerado o uso de QoS=1 para garantir um nível de confiabilidade no sistema, por se tratar de um alerta é necessário que a mensagem seja recebida corretamente.

4.5 Considerações sobre os Resultados

Em relação aos resultados obtidos, o sistema desenvolvido demonstrou-se funcional e eficaz dentro da proposta deste trabalho, que teve como objetivo explorar e simular a aplicação de um sistema de alerta por vibração baseado na análise de frequência de sinais sonoros.

No entanto, apesar dos resultados positivos observados, o projeto apresenta limitações importantes que devem ser consideradas. Por se tratar de um sistema simples de alerta, o sistema proposto não realiza reconhecimento do tipo de som, ou seja, não é capaz de identificar se o áudio corresponde, por exemplo, a uma campainha. A análise é baseada apenas na frequência dominante do sinal, sem distinguir que tipo de som se trata.

Além disso, não foi implementada uma etapa de tratamento de ruídos ou distorções no sinal de áudio. O algoritmo não aplica filtros digitais, como passa-faixa ou rejeita-faixa, para isolar apenas as frequências de interesse.

Outra limitação observada refere-se ao processamento centralizado no computador, o que restringe a portabilidade do sistema. O microcontrolador ESP32-C3 é utilizado apenas para o acionamento físico do atuador, enquanto toda a análise do áudio ocorre no computador. Embora essa abordagem tenha atendido aos objetivos da simulação proposta, ela não representa um sistema embarcado autônomo.

Além disso, os testes foram realizados apenas com áudios sintéticos e arquivos de áudios gravados, sem captação em tempo real do som. Essa limitação impede avaliar o desempenho do sistema em situações dinâmicas, nas quais fatores como variação da intensidade sonora e interferências de ruídos externos poderiam influenciar a detecção de alerta e a análise do som.

O uso de um broker MQTT público (EMQX) também impõe limitações. Ainda que tenha facilitado a implementação e os testes, esse tipo de servidor não é ideal para aplicações comerciais, que exigem maior controle de segurança, privacidade e desempenho. Para futuras versões o recomendável é o uso de um servidor privado e dedicado.

Apesar dessas limitações, o valor acadêmico do trabalho não foi comprometido. Pelo contrário, os resultados obtidos evidenciam que o sistema proposto funciona como uma prova de conceito viável, demonstrando como é possível integrar a análise de sinais sonoros a um microcontrolador utilizando o protocolo de comunicação MQTT, permitindo dessa forma que a estrutura desenvolvida possa servir como base para futuras implementações mais robustas.

Para possibilitar a reprodução e continuidade de desenvolvimentos na área, o código desenvolvido neste trabalho se encontra disponível no seguinte repositório: <<https://github.com/AlineRMorais/TCC-SISTEMA-DE-ALERTA>>.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como proposta o desenvolvimento e simulação de um sistema de alerta voltado para pessoas com deficiência auditiva. O objetivo principal foi demonstrar, por meio de uma prova de conceito, como a identificação de sons com frequência específica pode ser utilizada para gerar alertas, oferecendo uma alternativa de acessibilidade em situações do cotidiano.

A solução apresentada insere-se no campo da Tecnologia Assistiva, ao propor uma aplicação orientada à acessibilidade. Além disso, pode ser utilizada dentro da Computação Vestível, uma vez que o sistema desenvolvido pode futuramente ser incorporado a dispositivos vestíveis. No contexto deste trabalho, o protótipo concentra-se na simulação de um sistema vibratório, que poderá servir como base para a construção de uma pulseira física, voltada para realizar alertas vibratórios de maneira tátil.

A abordagem adotada utilizou a Transformada Rápida de Fourier (FFT) como ferramenta de análise do sinal de áudio, permitindo auxiliar a identificação da frequência dominante do som. Os testes realizados demonstraram que o sistema foi capaz de cumprir seu objetivo, reconhecendo sinais sintéticos dentro da faixa de interesse (250 Hz a 1000 Hz), bem como ignorando sons fora dessa faixa. Além disso, foi implementado o protocolo MQTT como meio de comunicação, o que permitiu a entrega das mensagens de alerta ao microcontrolador ESP32-C3, dessa forma evidenciando a viabilidade da proposta e integrando software e hardware.

Além disso, o software desenvolvido pode ser usado como uma etapa de pré-processamento para sistemas de classificação baseados em inteligência artificial, atuando como um filtro inicial que verifica se o áudio capturado possui características, como a frequência dominante dentro da faixa de interesse, que justifiquem o envio para um sistema mais complexo de reconhecimento ou classificação. Assim, evita-se o processamento desnecessário de sons irrelevantes, otimizando recursos computacionais e reduzindo a carga de processamento de um sistema de inteligência artificial.

Apesar das limitações identificadas, os resultados obtidos demonstram o potencial de aplicação da proposta e sua relevância para a promoção da acessibilidade. A utilização de recursos tecnológicos como os desenvolvidos neste trabalho pode representar uma melhoria significativa na qualidade de vida de pessoas com deficiência.

Como trabalhos futuros, destaca-se:

- **Construção de um protótipo físico da pulseira vibratória:** Desenvolvimento de uma pulseira que integre o microcontrolador e o motor de vibração, permitindo ao usuário receber alertas táteis de forma prática.
- **Processamento do áudio diretamente no microcontrolador ou em um microcomputador:** Implementação do algoritmo de detecção de alerta no próprio microcontrolador, tornando o sistema mais portátil e independente do computador principal. Alternativamente,

o processamento poderia ser feito em um microcomputador de baixo custo, instalado no ambiente do usuário, como um Raspberry Pi, que ficaria responsável por processar os sons, enviando o alerta ao dispositivo vestível.

- **Aplicação de filtros digitais:** Uso de técnicas de filtragem, para reduzir ruídos e isolar melhor as frequências de interesse.
- **Captação em tempo real dos sons:** Adaptação do sistema para processar sons captados diretamente por um microfone no momento da ocorrência, sem depender de arquivos de áudios gravados.
- **Ampliação da janela de análise:** Permitir o processamento de um número maior de amostras do sinal de áudio, superando a limitação atual de 80.000 amostras, com o objetivo de aumentar a precisão na detecção de alertas e ampliar a quantidade de dados analisadas. Essa modificação também permitirá observar o comportamento do software de processamento quando submetido a um volume maior de dados, possibilitando ajustes e otimizações no desempenho do sistema.
- **Adoção de técnicas de correspondência de modelos:** Implementação de métodos mais robustos de processamento que comparem padrões do sinal de áudio, sem depender exclusivamente da frequência dominante para identificar alertas.

Por fim, este trabalho contribuiu para o aprimoramento de habilidades práticas em programação, especialmente na implementação de algoritmos de processamento de sinais e no desenvolvimento de soluções integradas entre software e hardware. Também reforçou a importância de aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo da formação acadêmica em projetos que gerem impacto social e promovam a acessibilidade.

REFERÊNCIAS

- ADAFRUIT. **Buzzing Mindfulness Bracelet**. 2015. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/buzzing-mindfulness-bracelet>. Acesso em: 21 mar. 2024. Citado na página 20.
- AFONSO, C. Reflexões sobre a surdez: a problemática específica da surdez. **Vila Nova de Gaia : Gailivro**, 2008. Apud CARVALHO, M. das G. et al. . História e Memória da Deficiência Auditiva no Brasil. ID on line. Revista de psicologia, v. 9, n. 27, p. 194-204, 2015. Citado na página 8.
- ALIEXPRESS. **Motor de Vibração**. 2024. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/1005007096568666.html?src=google&src=googleal&bch=shoppingacnt=768-202-3196&isdl=yslnk=plac=mtctp=albbt=Google>. Acesso em: 21 mar. 2024. Citado na página 16.
- AUDACITY. **Software Audacity**. 2024. Disponível em: <https://www.audacityteam.org/FAQ/>. Acesso em: 21 mar. 2024. Citado na página 18.
- BERSCH, R. Introdução à tecnologia assistiva. **Porto Alegre: CEDI**, v. 21, p. 1–20, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 10.
- CARVALHO, M. das G. *et al.* História e memória da deficiência auditiva no brasil. **ID on line. Revista de psicologia**, v. 9, n. 27, p. 194–204, 2015. Citado na página 8.
- CHAVEIRO, N. *et al.* Qualidade de vida dos surdos que se comunicam pela língua de sinais: revisão integrativa. **Interface-Comunicação, Saúde, Educação**, v. 18, p. 101–114, 2014. Citado na página 8.
- CONLEY, K. *et al.* Vibration alert bracelet for notification of the visually and hearing impaired. **Journal of Open Hardware**, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- CORSO, A. Uma breve introdução aos computadores vestíveis: Corpo, tecnologia e ficção científica. **7º Simpósio Nacional da Associação Brasileira de Cibercultura**, 2013. Citado na página 6.
- DANTAS, T. *et al.* Determinação da taxa de amostragem e análise do efeito do falseamento dos componentes de frequência de um sinal de identificação. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 12440–12447, 2015. Citado na página 12.
- DAVIS *et al.* Hearing and deafness. **Auditory Test Hearing Aids**, p. Apud FIGUERÊDO, R. O impacto da vulnerabilidade decorrente da deficiência auditiva na manifestação do consentimento informado em casos de experimentação humana. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia 2015., 1970. Citado na página 9.
- FELLINGER, J. *et al.* Mental distress and quality of life in the hard of hearing. **Acta Psychiatrica Scand**, p. 11:243–45. Apud CHAVEIRO, Neuma et al. Qualidade de vida dos surdos que se comunicam pela língua de sinais: revisão integrativa. **Interface-Comunicação, Saúde, Educação**, v. 18, p. 101–114, 2014., 2007. Citado na página 8.
- FIGUERÊDO, R. B. S. **O impacto da vulnerabilidade decorrente da deficiência auditiva na manifestação do consentimento informado em casos de experimentação humana**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 2015. Citado na página 9.

- FORUM, A. **ESP32 C3 Supermini Pinout**. 2023. Disponível em: <https://forum.arduino.cc/t/esp32-c3-supermini-pinout/1189850>. Acesso em: 23 mar. 2024. Citado na página 17.
- GONÇALVES, L. A. **Um estudo sobre a transformada rápida de Fourier e aplicações**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Citado na página 19.
- IBGE, I. B. G. E. **Pesquisa nacional de saúde 2019: ciclos de vida**. 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101846.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024. Citado na página 8.
- MANN, S. **Definition of "Wearable Computer"**. 1998. Disponível em: <http://wearcomp.org/wearcompdef.html>. Acesso em: 31 mar. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- MARTINS, M. L. *et al.* Estudo da aplicação da fft (fast fourier transform) em análise da condição de máquinas rotativas. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, v. 2, n. 23, p. 125–144, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- MENDES, A. A. S. *et al.* Smartwatch. — **Faculdade de Tecnologia de São Bernado do Campo**, 2023. Citado na página 11.
- MQTT. **MQTT: The Standard for IoT Messaging**. 2022. Disponível em: <https://mqtt.org/>. Acesso em: 21 mar. 2024. Citado na página 15.
- NORTHEN, J. L. *et al.* **Hearing in Children**. Baltimore: The Williams Wilkins, 1979. 418 p. Apud KOPPER, Hélen. Habilidades auditivas e de linguagem em um grupo de crianças deficientes auditivas com diagnóstico e intervenção precoce. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Fonoaudiologia, Mestrado em Fonoaudiologia, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2011. Citado na página 9.
- OMS, O. M. da S. **WHO: 1 in 4 people projected to have hearing problems by 2050**. 2021. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/02-03-2021-who-1-in-4-people-projected-to-have-hearing-problems-by-2050>. Acesso em: 21 mar. 2024. Citado na página 6.
- _____. **Deafness and hearing loss**. 2024. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>. Acesso em: 21 mar. 2024. Citado na página 6.
- SANTOS, R. F. dos *et al.* Tecnologia assistiva e suas relações com a qualidade de vida de pessoas com deficiência. **Revista de Terapia Ocupacional da Universidade de São Paulo**, v. 28, p. 54–62, 2017. Citado na página 10.
- SILVA, A. M. B. da; CARVALHO, A. R. de. Cartilha comunicação/interação: A gênese para a formação omnilateral dos surdos e deficientes auditivos no campus barbacena. **Portal eduCAPES**, 2021. Citado na página 8.
- SYSTEMS, E. **ESP32-C3**. 2024. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-c3>. Acesso em: 21 mar. 2024. Citado na página 15.

SZEREMETA, J. O. Aplicações e funcionalidade da computação vestível. — **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, 2013. Citado na página 10.