

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curso de Engenharia Eletrônica

VITOR THIMOTEO DAUBERMANN

DESENVOLVIMENTO DE UM
DISPOSITIVO PARA AUXILIAR A
PERCEPÇÃO DE MELODIAS A PESSOAS
COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA TOTAL
ATRAVÉS DE SINAIS TÁTEIS

Toledo

2025

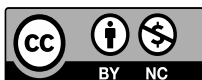
VITOR THIMOTEO DAUBERMANN

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA
AUXILIAR A PERCEPÇÃO DE MELODIAS A
PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA TOTAL
ATRAVÉS DE SINAIS TÁTEIS
DEVELOPMENT OF A DEVICE TO ASSIST THE
PERCEPTION OF MELODIES FOR INDIVIDUALS WITH
COMPLETE HEARING IMPAIRMENT THROUGH TACTILE
SIGNALS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a) MARCOS BOMBACINI

Toledo
2025



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.xz

VITOR THIMOTEO DAUBERMANN

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA
AUXILIAR A PERCEPÇÃO DE MELODIAS A
PESSOAS COM DEFICIÊNCIA AUDITIVA TOTAL
ATRAVÉS DE SINAIS TÁTEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Toledo, 10 de junho de 2025 :

MARCOS BOMBACINI

UTFPR-Toledo
Orientador(a)

Prof. Felipe Walter Dafico Pfrimer

UTFPR - Toledo

Prof. Renato Lada Guerreiro

IFPR - Assis Chateaubriand

Prof. Sergio Ricardo Ferrazoli

IFPR - Assis Chateaubriand

Toledo
2025

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso

AGRADECIMENTOS

Às vésperas da conclusão deste trabalho, sinto-me profundamente grato a todas as pessoas que tornaram possível a realização do meu TCC.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Prof. Marcos Bombacini, pela incansável dedicação, pelos ensinamentos, pelas valiosas orientações e pelo estímulo constante ao longo de todas as etapas deste estudo. Seu conhecimento, paciência e entusiasmo foram fundamentais para o desenvolvimento e aprimoramento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Renato Lada Guerreiro e Prof. Sergio Ricardo Ferrazoli, agradeço pela afinada leitura crítica, pelos questionamentos instigantes e pelas sugestões que certamente enriquecerão ainda mais este trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Toledo (UTFPR-TD) e ao Departamento de Engenharia Eletrônica, agradeço pela infraestrutura disponibilizada, pelo acesso às bibliotecas e laboratórios, bem como pelo ambiente acadêmico acolhedor que proporcionou o intercâmbio de ideias e o aprofundamento na área do tema proposto.

Agradeço também à minha família, em especial a minha mãe, Joseane, pelo amor incondicional, pelo apoio emocional, pelos sacrifícios diários e renúncia de seus próprios sonhos, sem a qual eu não teria chegado até aqui. Ao meu irmão, Henrique, a quem agradeço pelo apoio em diversos momentos do curso.

Aos colegas de curso e amigos, em especial a Franz Duncan, quem compartilhei maiores momentos do curso, Hector Dallanora, Luiz Pessoa, Nathielly Dundi e Cristiane Nishimura meu coração transborda gratidão por cada palavra de ânimo nas madrugadas de dedicação, pelos cafés compartilhados que foram mais que pausa — foram momentos de cumplicidade — e pelos abraços apertados que renovaram minha força quando eu mais precisava. Vocês não apenas iluminaram meus dias mais desafiadores, mas também celebraram comigo cada pequena vitória, fazendo-me sentir que nenhum obstáculo seria grande demais enquanto estivéssemos juntos. Obrigado por caminhar ao meu lado e tornar esta jornada verdadeiramente inesquecível.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se concretizasse, o meu muito obrigado!

*As melhores e mais belas coisas do mundo não podem ser vistas nem tocadas. Elas
devem ser sentidas com o coração.
(Helen Keller)*

RESUMO

A música é uma das formas mais universais de expressão e emoção humanas. No entanto, para pessoas com surdez profunda, a experiência musical convencional é amplamente inacessível. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico não invasivo capaz de traduzir sinais musicais digitais em estímulos táteis, viabilizando a percepção rítmica e melódica por meio da vibração, com foco em acessibilidade e inclusão sensorial. O sistema foi projetado utilizando o microcomputador Raspberry Pi 4 Model B como unidade de controle central, motores vibratórios do tipo Vibracall 1027 para emissão de estímulos táteis, sensores piezoelétricos para feedback e uma interface homem-máquina (IHM) acessível. Os atuadores foram estrategicamente posicionados nos dedos da mão, região com alta densidade de receptores sensoriais, a fim de maximizar a percepção vibratória. A interface gráfica permite selecionar músicas, visualizar gráficos em tempo real e controlar parâmetros de vibração, promovendo uma experiência interativa e intuitiva. Foram realizados testes, cujos relatos destacaram a leveza do dispositivo, a facilidade de uso, a resposta rápida e a clareza na percepção das vibrações, especialmente para padrões rítmicos distintos. Foi apontado que o uso do dispositivo sem a luva oferece maior conforto, enquanto a interpretação de frequências muito similares ainda representa um desafio, devido à limitação perceptiva natural dos corpúsculos de Pacini e Meissner. A experiência geral foi descrita como marcante e emocionante, proporcionando sensações consideradas antes inacessíveis. O projeto se mostra como uma alternativa promissora no campo das tecnologias assistivas, com potencial de aplicação em educação musical inclusiva, apresentações sensoriais e terapias multissensoriais. Contribui significativamente para o debate sobre acessibilidade cultural e reforça o papel da engenharia na promoção da equidade sensorial.

Palavras-chave: Acessibilidade; Dispositivo musical; Integração social.

ABSTRACT

Music is one of the most universal forms of human expression and emotion. However, for individuals with profound deafness, traditional musical experiences remain largely inaccessible. This work presents the development of a non-invasive electronic device capable of translating digital musical signals into tactile stimuli, enabling users to perceive rhythm and melody through vibration, with a strong focus on accessibility and sensory inclusion. The system was designed using the Raspberry Pi 4 Model B as the central processing unit, Vibracall 1027 vibration motors for tactile output, piezoelectric sensors for feedback, and a user-friendly human-machine interface (HMI). The actuators were strategically positioned on the fingers, a region rich in mechanoreceptors, to maximize vibration perception. The graphical interface allows users to select music, visualize real-time signal plots, and adjust vibration parameters, providing an interactive and intuitive experience. Tests revealed that the device is lightweight, easy to use, and offers fast tactile response. Participants highlighted the clarity of distinct rhythmic patterns and emphasized that using the device without the glove was more comfortable. Some challenges were observed in differentiating very similar frequencies, which were attributed to the natural perceptual limits of Pacinian and Meissner corpuscles. Overall, the experience was described as exciting and emotionally impactful, granting users access to sensations previously deemed impossible. This project represents a promising alternative in the field of assistive technology, with potential applications in inclusive music education, sensory performances, and multisensory therapy. It contributes meaningfully to the discourse on cultural accessibility and reinforces the role of engineering in promoting sensory equity.

Keywords: Accessibility; Musical device; Social integration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Equipamento da Tron Robótica	11
Figura 2 – Fatores Determinantes no Desenvolvimento do Dispositivo	12
Figura 3 – Receptores sensoriais	15
Figura 4 – Receptores sensoriais didático	15
Figura 5 – Caminho da informação reebida do dispositivo	16
Figura 6 – Ilustração dos corpúsculos na mão e o caminho percorrido	17
Figura 7 – Gráfico de melhor região para o dispositivo	18
Figura 8 – Percurso Metodológico da Investigação	19
Figura 9 – Esquema didático do projeto - equipamentos	21
Figura 10 – Raspberry 4 montado	22
Figura 11 – Placa de circuito impresso - representação e aplicação	23
Figura 12 – Esquema didático do projeto	24
Figura 13 – Interação homem maquina	24
Figura 14 – Interação homem maquina	25
Figura 15 – Vibracall 1027	26
Figura 16 – Sensor de vibração piezoelétrico	26
Figura 17 – Raspberry pi 4 model B	27
Figura 18 – Prototipo	28
Figura 19 – Duas vistas do protótipo com luva.	29
Figura 20 – Fluxo do processamento de áudio e controle de motores	33
Figura 21 – Análise do dispositivo	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
1.2	Justificativa	12
1.3	Estrutura do Trabalho	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Ferramentas utilizadas atualmente	14
2.2	Fundamentos teóricos	14
2.2.1	Estudo anatômico	14
3	METODOLOGIA	19
3.1	Descrição anatômica	19
3.2	Descrição física	20
3.2.1	Raspberry Pi	20
3.2.2	Vibracall 1027	21
3.2.3	Sensor piezoelétrico	21
3.2.4	Placa de circuito impresso	22
3.2.5	Equipamento	23
3.2.5.1	Integração e funcionamento geral	23
4	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA	30
4.1	Bibliotecas utilizadas e configuração do ambiente	30
4.2	Configuração do hardware	30
4.3	Variáveis e Parâmetros Globais	30
4.4	Classe MusicLibrary	31
4.5	Funções principais	31
4.5.1	ler sensores()	31
4.5.2	calcular frequencia()	31
4.5.3	processar audio()	31
4.6	Interface Gráfica	32
4.7	Encerramento do Sistema	32
5	RESULTADOS	34
5.1	Montagem do Dispositivo	34
5.1.1	Integração dos Componentes	34

5.1.2	Calibração dos Motores	34
5.1.3	Desenvolvimento da Interface Gráfica	34
5.1.4	Análise pró dispositivo	34
5.1.5	Análise das limitações e desafios	35
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
7	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A música é uma forma de arte que trabalha com receptores mecânicos, principalmente com a capacidade auditiva. Contudo, apesar de a arte conceitualmente ser acessível a todos, existem indivíduos com deficiência auditiva parcial ou totalencontram barreiras significativas para a percepção musical pelos meios convencionais. Além disso, não existem soluções não invasivas consolidadas no mercado que permitam a esses usuários vivenciar experiências musicais adaptadas ao sentido do tato.

Apesar disso, alguns esforços são registrados, como o projeto da TRON ROBOTICA¹, que usa um auto-falante focalizado no tórax do indivíduo, demonstrado na Fig. 1, o que difere da metodologia proposta nesse projeto. Outros estudos exploram a integração de informações táteis na percepção da fala. TRANCHANT et al. (2017) investigaram a sincronização do ritmo com a música vibrotátil em pessoas ouvintes e surdas, descobrindo que a maioria dos participantes foi capaz de sincronizar precisamente seus saltos com as vibrações. Além disso, HOLMES (2017) explorou a experiência musical entre pessoas surdas, desafiando as suposições de que a audição é central para a música e que a surdez é uma perda total de audição. Outros autores mostram que a percepção de sílabas pode ser alterada por sopros de ar inaudíveis aplicados na pele. Sílabas ouvidas ao mesmo tempo que sopros de ar na pele tendem a ser percebidas como aspiradas. Isso indica que os ouvintes podem combinar informações táteis relevantes com a percepção auditiva, assim como fazem com informações visuais (GICK; DERRICK, 2009).

Diante da escassez de soluções acessíveis para pessoas com deficiência auditiva total, este projeto teve como objetivo desenvolver um dispositivo capaz de auxiliar na percepção musical por meio de estímulos táteis, com aplicação tanto em contextos educativos quanto recreativos. O trabalho foi estruturado em duas etapas principais: (1) estudo de caso e (2) desenvolvimento do dispositivo.

A primeira etapa consistiu na análise de fundamentos da teoria musical e da anatomia humana, com ênfase em frequências sonoras, notas musicais, instrumentos e na identificação de regiões do corpo adequadas para o posicionamento do dispositivo. A segunda etapa, integrada à primeira, envolveu a seleção dos componentes eletrônicos, a definição da arquitetura de processamento dos sinais e a estratégia de conversão dos estímulos auditivos em sinais táteis. Optou-se por posicionar os atuadores nos dedos das mãos, dada a sua elevada sensibilidade tátil.

A execução do projeto iniciou-se com o planejamento das atividades essenciais, incluindo o levantamento bibliográfico sobre o tema, a leitura de referências técnicas e

¹ PINHO, L. **TRON desenvolve dispositivo em parceria com o artista Whindersson Nunes para que surdos e deficientes auditivos possam sentir a música.** Disponível em: <<https://tron-edu.com/blog/86-news/325-tron-desenvolve-dispositivo-em-parceria-com-o-humorista-whindersson-nunes-para-surdos>>. Acesso em: 22 set. 2023.

Figura 1 – Equipamento da Tron Robótica

Fonte: Editado de Carnauba valley (2022).

científicas e, na sequência, o desenvolvimento do protótipo funcional.

1.1 OBJETIVOS

Será abordado os objetivos a serem alcançados neste projeto.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um dispositivo não invasivo que traduza sinais musicais digitais em vibrações táteis, permitindo a percepção de elementos rítmicos e melódicos por usuários com surdez profunda.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Selecionar e dimensionar os componentes eletrônicos (motores vibratórios, placa de processamento e sensores) de acordo com critérios de percepção humana, consumo energético e custo.

- Avaliar a resposta tátil ao longo de sessões prolongadas, por meio de testes de usabilidade e medidas quantitativas de conforto.
- Definir e implementar o posicionamento ergonômico dos atuadores, considerando a densidade de mecanorreceptores em diferentes regiões do corpo, como demonstra a Fig. 17.
- Projetar e validar uma interface gráfica que permita o controle e a visualização em tempo real das características sonoras processadas.

Figura 2 – Fatores Determinantes no Desenvolvimento do Dispositivo



Fonte: Autoria própria (2025).

1.2 JUSTIFICATIVA

A música, enquanto forma universal de expressão humana, deve ser acessível a todas as pessoas, independentemente de suas condições auditivas. Contudo, indivíduos com surdez enfrentam barreiras significativas para acessar e apreciar manifestações musicais. A acessibilidade é um direito fundamental e se mostra ainda mais crucial no caso das pessoas surdas, considerando que a comunicação é um elemento essencial para a participação plena na vida em sociedade. A ausência de acessibilidade pode contribuir para a exclusão social e marginalização desses indivíduos, comprometendo sua qualidade de vida e bem-estar emocional.

A acessibilidade musical para pessoas surdas insere-se em um contexto mais amplo: o da acessibilidade cultural. O acesso à cultura é um direito garantido a todos os cidadãos brasileiros, inclusive àqueles com deficiência auditiva. Nesse sentido, torna-se fundamental o investimento em iniciativas que promovam a inclusão, como a produção de conteúdos culturais acessíveis — a exemplo de vídeos com legendas, espetáculos teatrais com intérpretes de Libras e, de maneira mais inovadora, dispositivos que possibilitem novas formas de percepção musical por meio de outros sentidos, como o tato.

Dessa forma, o projeto propôs a utilização de um microcontrolador responsável pelo processamento das informações musicais e pela comunicação com três atuadores vibratórios. Esses atuadores são acoplados aos dedos da mão do usuário, permitindo a percepção de vibrações de forma direta e tátil. Atualmente, experiências sensoriais semelhantes só são possíveis por meio de métodos invasivos, como o implante coclear, que exige intervenção cirúrgica e nem sempre é acessível ou eficaz para todos os casos. No que diz respeito a alternativas não invasivas, ainda não há soluções consolidadas no mercado, havendo apenas estudos e protótipos em fase de pesquisa por parte da comunidade científica.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está estruturado em sete capítulos, sendo que o primeiro capítulo tem como propósito introduzir a proposta de pesquisa e expor os objetivos, justificativa e motivação subjacentes ao desenvolvimento do trabalho. No segundo capítulo, apresenta-se o referencial teórico, com o propósito de explorar os conceitos e tecnologias que foram aplicados neste trabalho, tais como placa de processamento, comunicação e motores. A análise desses temas facilita a compreensão dos elementos fundamentais que compõem o escopo da pesquisa, além de possibilitar a identificação de possíveis soluções para os desafios enfrentados no desenvolvimento do trabalho. No terceiro capítulo deste trabalho, abordam-se os métodos para a montagem do dispositivo, considerando os requisitos técnicos para garantir a sua funcionalidade e evitar possíveis comprometimentos. No quarto capítulo, é analisado o código produzido para o dispositivo, desde as bibliotecas utilizadas até o processo final. No quinto capítulo deste trabalho, discutem-se os resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa. A discussão desses aspectos foi fundamental para avaliar a eficácia da proposta de pesquisa e para determinar se os objetivos da pesquisa foram atingidos. No sexto capítulo, são avaliados os resultados e em que aspectos futuros entusiastas podem se aventurar para aprimorar o dispositivo. Por fim, no sétimo capítulo, é feita uma análise dos resultados em comparação com os objetivos e estudos pré-desenvolvimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, serão apresentados diversos conceitos anatômicos e tecnologias relacionadas ao dispositivo. Serão abordados temas como processamento, motores, tratamento de sinal e inclusão social. A análise desses tópicos será fundamental para o entendimento dos elementos que compõem a estrutura do projeto proposto, bem como para a compreensão das vantagens e limitações de cada uma dessas tecnologias.

2.1 FERRAMENTAS UTILIZADAS ATUALMENTE

Atualmente, não há dispositivos parecidos disponíveis para o público, apenas em pesquisa. Apesar disso, pode-se citar PINHO (2022), que publicou um artigo sobre a TRON ROBÓTICA, que utiliza um autofalante focalizado no tórax do usuário, e as outras pesquisas, todas em comum, têm que utilizar transmissão tátil.

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesta seção, serão discutidas as melhores formas de aplicar a ideia do projeto. Além disso, discutir o hardware que foi implementado e será apresentado o estudo anatômico realizado.

2.2.1 Estudo anatômico

Em primeiro momento, foi estudado sobre a fisiologia humana com foco no sistema nervoso e detalhes do cérebro, a fim de entender melhor como seria a reação aos estímulos, bem como identificar a melhor integração do dispositivo.

Os terminais nervosos nas mãos são responsáveis por transmitir os sinais táteis dos dedos para o cérebro. A pele da parte interna dos dedos tem uma elevada concentração de terminais nervosos que são sensíveis à vibração, incluindo o corpúsculo de Pacini e o corpúsculo de Meissner, tornando-os centros do sentido do tato. Esses nervos são responsáveis por transportar os impulsos sensoriais das mãos para o cérebro e por comunicar os impulsos motores do cérebro para as mãos (GUYTON; HALL, 2017).

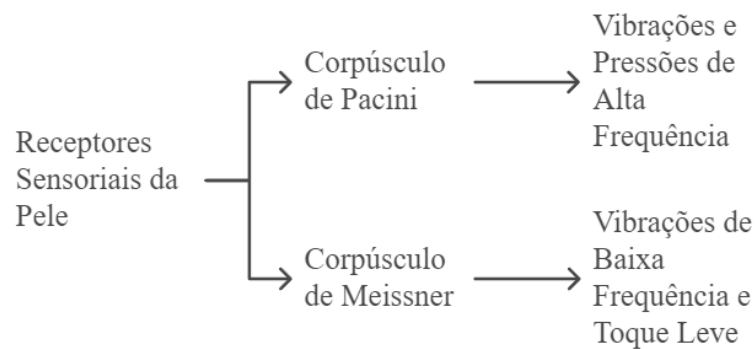
O corpúsculo de Pacini detecta vibrações e pressões de alta frequência. Eles são encontrados nas camadas profundas da pele, no tecido conjuntivo e nas articulações. Esses receptores se apresentam sob a forma de uma terminação nervosa, envolvida por camadas concêntricas de tecido conjuntivo.

O corpúsculo de Meissner, por outro lado, é sensível ao tato fino ao movimento de objetos leves à vibração em baixa frequência. Eles são pequenos receptores formados por um axônio mielínico (axônio envolvido pela bainha de mielina) e estão localizados nas

saliências sem pelos, assim como os dedos, demonstrados de forma didática na Fig. 4 (SILVERTHORN, 2017).

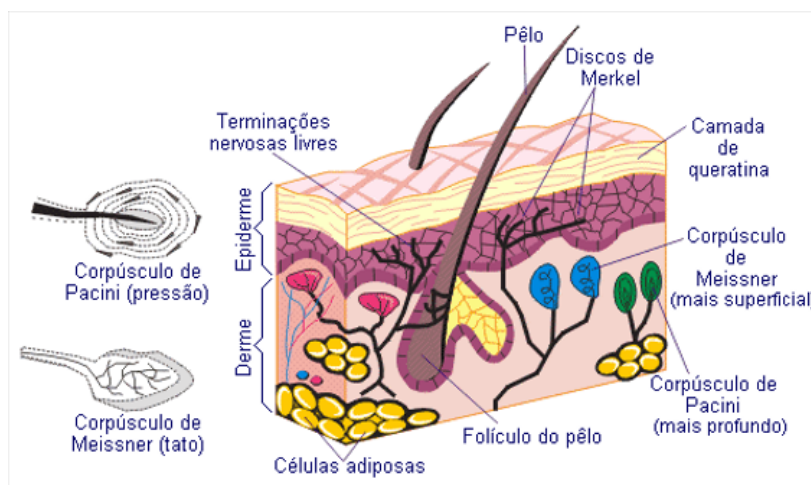
A Fig. 3 apresenta um esquema ilustrativo dos principais tipos de mecanorreceptores encontrados na pele humana, incluindo os corpúsculos de Meissner e de Pacini. Essa representação tem o objetivo de facilitar a compreensão visual das diferentes localizações, profundidades e respostas desses receptores táteis. Os corpúsculos de Meissner são mostrados na região mais superficial da derme, evidenciando sua sensibilidade ao toque leve e vibração de baixa frequência, enquanto os corpúsculos de Pacini aparecem mais profundamente posicionados, em camadas subdérmicas, destacando sua resposta a pressões mais intensas e vibrações de alta frequência. Embora esquemática, a figura contribui para visualizar o raciocínio técnico por trás da escolha anatômica dos pontos de aplicação dos atuadores vibratórios.

Figura 3 – Receptores sensoriais



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 4 – Receptores sensoriais didático



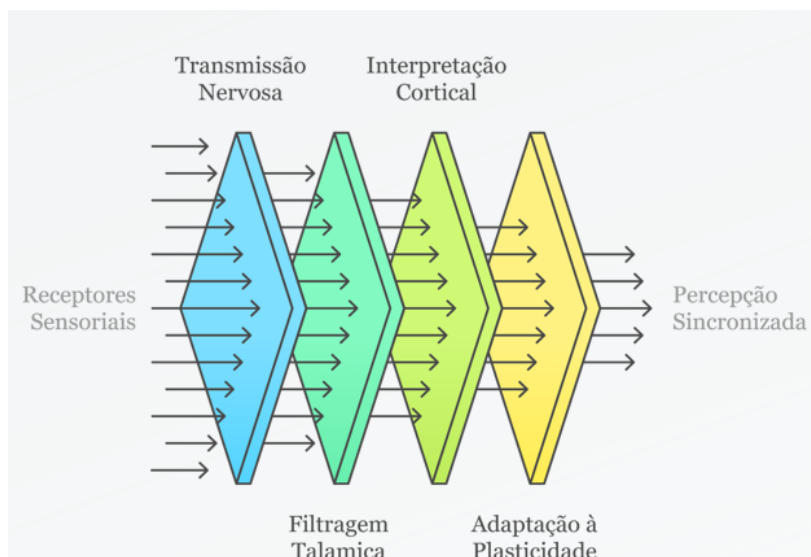
Fonte: Educabras (2024).

Os axônios, que são prolongamentos dos neurônios, desempenham um papel crucial na transmissão desses sinais. No centro desses receptores, existem axônios não mieliniza-

dos, que apresentam canais iônicos mecanossensíveis. Os axônios aferentes primários do sistema sensorial somático formam uma vasta rede que percorre os nervos periféricos e são responsáveis pelo transporte da informação sensorial para o Sistema Nervoso Central (GUYTON; HALL, 2017).

O fluxo de informação sobre o tato segue para o cérebro por vias distintas das que dizem respeito à percepção de vibração e é denominada via coluna dorsal-lemnisco medial. Os axônios transportadores das informações táteis terminam do mesmo lado nos núcleos da coluna dorsal, situados no limite da medula espinal e do bulbo. A partir deste ponto, a informação segue, via um trato de substância branca denominado lemnisco medial, para os bulbos ventral e medial contralaterais e, em seguida, para o núcleo ventral posterior do tálamo. Nesse momento, necessita de plasticidade para que seja designado a qual córtex somatossensorial deve enviar os dados recebidos, representado na Fig. 5.

Figura 5 – Caminho da informação reebida do dispositivo

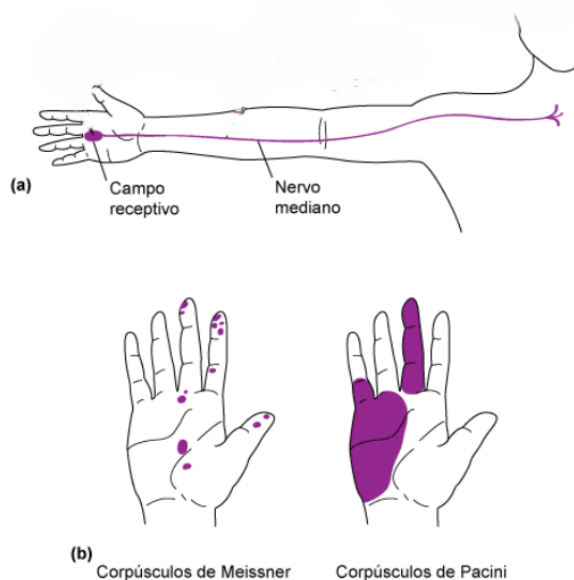


Fonte: Aatoria própria (2025).

Ao interpretar vibrações captadas pelos dedos, o cérebro mobiliza uma rede complexa que integra processamento sensorial e adaptação neural. Quando os mecanorreceptores na pele dos dedos detectam vibrações Fig. 6, os sinais são conduzidos por axônios sensoriais até a medula espinal, seguindo pela via coluna dorsal-lemnisco medial até o córtex somatossensorial primário, localizado no lobo parietal. Nessa região, organizada topograficamente pelo homúnculo cortical, áreas específicas correspondem a partes do corpo, com os dedos ocupando uma proporção ampliada devido à alta densidade de receptores táteis. A interpretação da vibração depende não apenas da ativação dessas áreas, mas também da plasticidade cerebral, que permite ao córtex reorganizar-se dinamicamente em resposta a experiências repetidas — como ocorre em músicos ou pessoas que leem Braille, cujas regiões dedicadas aos dedos se expandem para otimizar o processamento de estímulos. Assim, a percepção tátil resulta da integração entre vias neurais específicas e a capa-

cidade adaptativa do cérebro, reforçando sua eficiência na decodificação de informações ambientais (MACHADO; HAERTEL, 2013).

Figura 6 – Ilustração dos corpúsculos na mão e o caminho percorrido

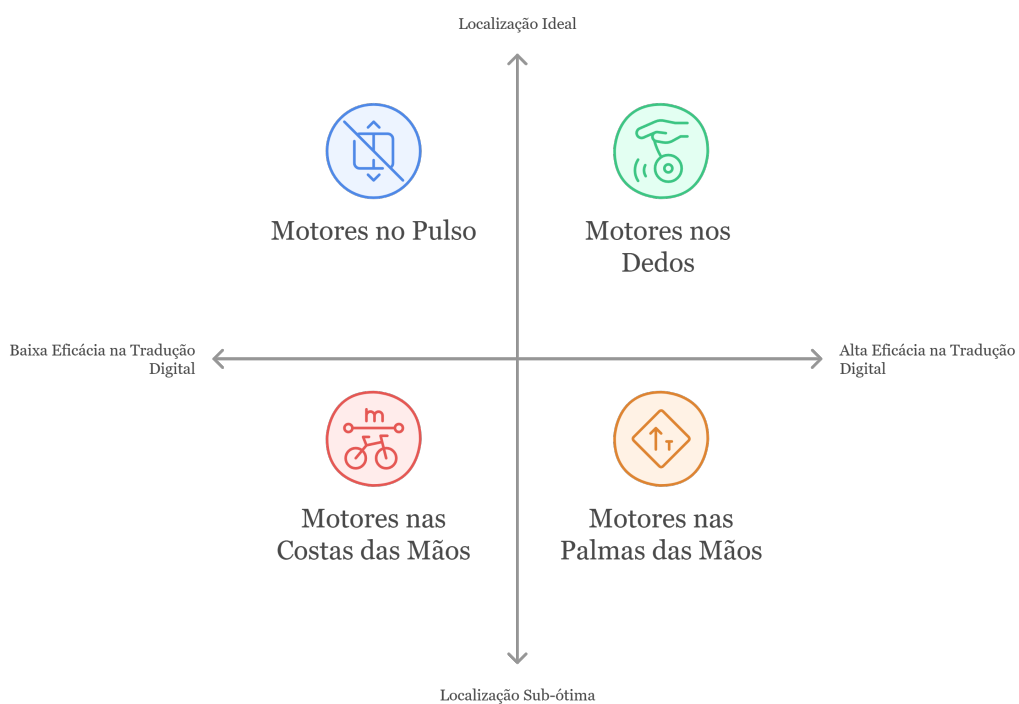


Fonte: Adaptado de (GUYTON; HALL, 2017).

Em um estudo relacionado, o artigo de TRANCHANT et al. (2017) explorou como as vibrações musicais podem ser percebidas tanto por pessoas ouvintes quanto por aquelas com deficiência auditiva precoce. A pesquisa destacou que o sistema tátil pode ser uma via eficaz para a percepção rítmica, especialmente em indivíduos com perda auditiva, que desenvolvem uma sensibilidade aumentada às vibrações. O estudo demonstrou que ambas as populações, ouvintes e surdos, são capazes de sincronizar seus movimentos com a batida da música transmitida por vibrações, revelando a plasticidade do cérebro humano em adaptar-se a diferentes formas de estímulo sensorial.

Com o que foi apresentado, logo se chega à conclusão da melhor região para se equipar o dispositivo, sendo os dedos. Assim como representa a Fig. 7, é necessário fazer uma relação entre a quantidade dos corpúsculos e a facilidade de colocar os motores.

Figura 7 – Gráfico de melhor região para o dispositivo



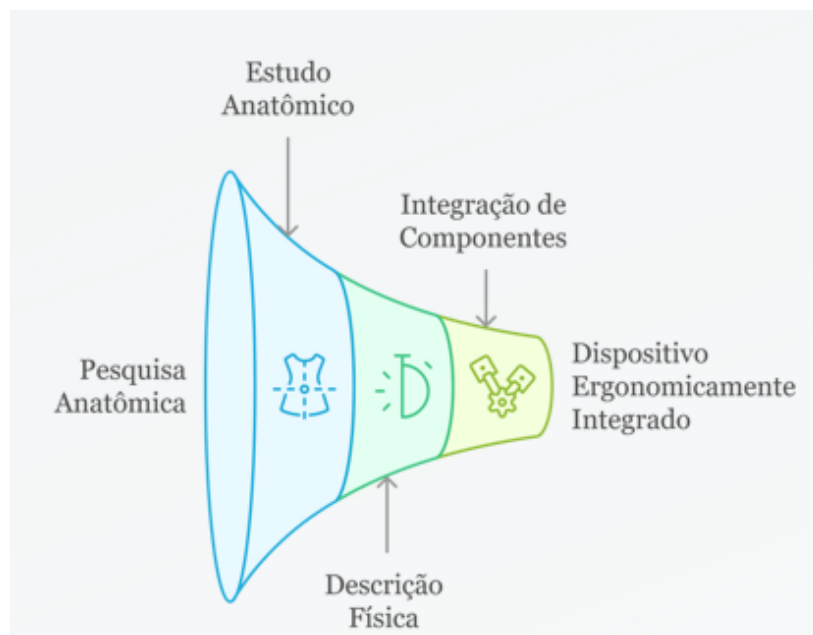
Fonte: Autoria própria (2025).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada da metodologia e dos materiais que foram utilizados neste trabalho de pesquisa, seguindo a ordem da Fig. 8. Além disso, abordam-se em detalhes os dispositivos e tecnologias pretendidos na montagem do protótipo da Fig. 18.

A Fig. 8 ilustra de forma esquemática o fluxo metodológico seguido neste trabalho. Nela, a etapa de "pesquisa anatômica" refere-se à seleção de materiais e fontes bibliográficas sobre a fisiologia sensorial tátil, enquanto o "estudo anatômico" corresponde à análise aprofundada desse material, com foco na identificação das regiões corporais mais adequadas à aplicação dos estímulos. Em seguida, são apresentadas as fases de definição dos componentes físicos, integração dos sistemas e validação do dispositivo. Esse esquema tem como objetivo fornecer uma visão geral do processo de desenvolvimento, facilitando a compreensão da sequência lógica adotada durante a construção do dispositivo.

Figura 8 – Percurso Metodológico da Investigação



Fonte: Autoria própria (2025).

3.1 DESCRIÇÃO ANATÔMICA

A escolha dos dedos como ponto de aplicação dos estímulos táteis se baseou em uma análise aprofundada da fisiologia sensorial da pele humana. As regiões palmares dos dedos concentram uma elevada densidade de mecanorreceptores, em especial os corpúsculos de Pacini e de Meissner.

Os corpúsculos de Meissner, localizados nas camadas superficiais da derme, são sensíveis a vibrações de baixa frequência (10–50 Hz) e a toques leves. Já os corpúsculos de Pacini, encontrados em camadas mais profundas, são especializados na detecção de vibrações de alta frequência (até cerca de 300–400 Hz) em estímulos de pressão profunda (GUYTON; HALL, 2017; SILVERTHORN, 2017).

Esses receptores transmitem os sinais captados por meio da via coluna dorsal-leminisco medial até o córtex somatossensorial primário, onde ocorre a interpretação consciente do estímulo (??). Essa rota neural reforça a importância de um estímulo tátil bem posicionado e adequadamente calibrado para gerar uma percepção significativa.

3.2 DESCRIÇÃO FÍSICA

O sistema do dispositivo foi composto por uma placa Raspberry Pi 4 Model B, três motores vibratórios do tipo Vibracall 1027, fixados por meio de tiras de velcro — visando melhor adaptação à mão do usuário — também utilizados para os três sensores de *feedback* e uma tela utilizada como interface gráfica, sequência assim representada na Fig. 9.

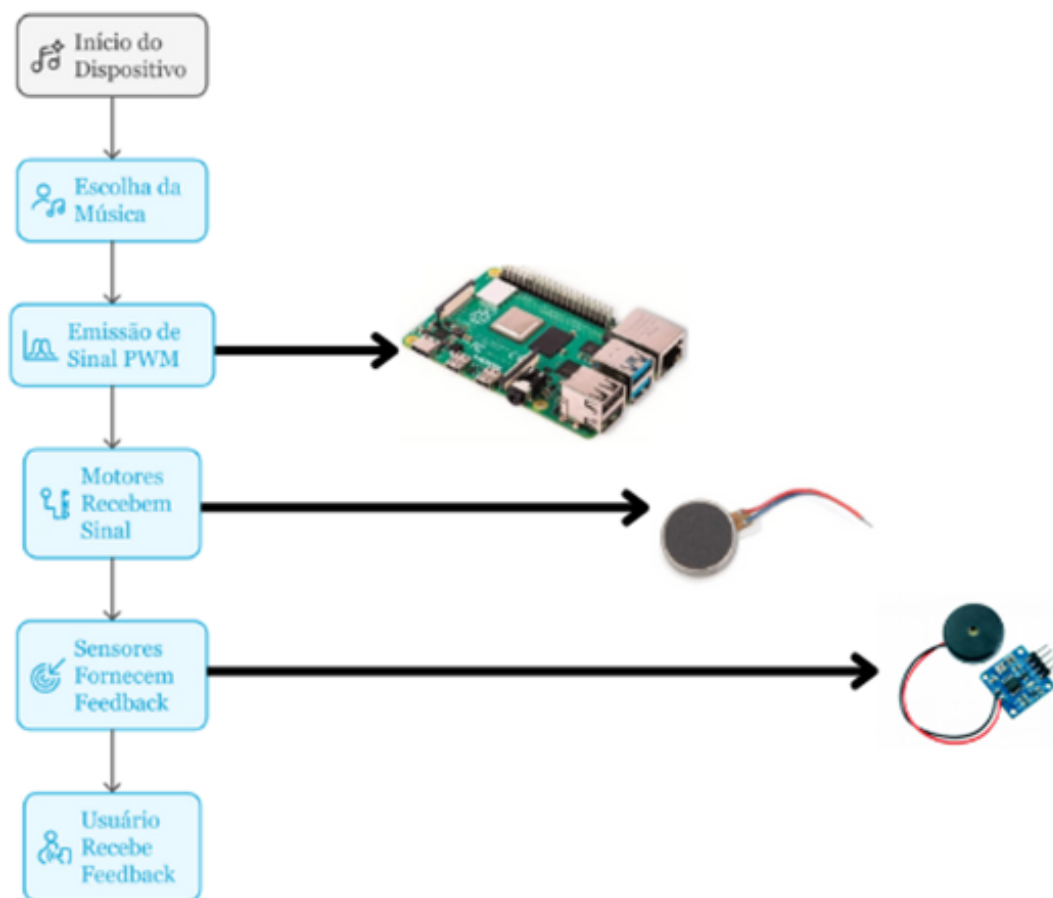
3.2.1 Raspberry Pi

A escolha do Raspberry Pi 4 Model B, Fig. 10, foi motivada por suas características robustas, que atenderam plenamente às necessidades do projeto. A placa conta com um processador quad-core ARM Cortex-A72 e até 8 GB de memória RAM, o que proporcionou elevada capacidade de processamento e suporte a múltiplas tarefas simultâneas. Suas portas PWM nativas foram fundamentais para o controle preciso da frequência de vibração dos motores. Além disso, as diversas interfaces de conectividade — incluindo portas USB, HDMI, Ethernet, Wi-Fi e Bluetooth — conferiram grande versatilidade para a integração de periféricos e comunicação com outros dispositivos (RASPBERRY PI LTD., 2024). Além da programação ser em python, uma linguagem já previamente instalada no processador.

Para garantir o desempenho térmico adequado durante o funcionamento contínuo, foram integrados à placa dissipadores de calor e uma ventoinha de resfriamento, vistos na Fig. 10. Esses elementos servem para evitar o superaquecimento do sistema, especialmente durante o processamento intensivo de dados e a execução de tarefas em paralelo, mantendo a estabilidade operacional e prolongando a vida útil do hardware.

Outro fator determinante para a escolha do Raspberry Pi foi o suporte a um sistema operacional completo, como o Raspberry Pi OS, o que facilitou significativamente o desenvolvimento, a execução e o teste de softwares mais complexos, diferentemente de plataformas mais limitadas, como o Arduino.

Figura 9 – Esquema didático do projeto - equipamentos



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2 Vibracall 1027

Os motores Vibracall 1027, Fig. 15, foram selecionados por serem compactos, leves e energeticamente eficientes, características ideais para a geração de vibrações táteis perceptíveis. Cada motor possui um diâmetro de 10 mm e comprimento de 2,7 mm, operando com uma tensão entre 2 V e 3,6 V. Eles geram vibrações na faixa de 120 Hz, valor adequado para a estimulação tátil dos dedos, proporcionando uma percepção clara e contínua do estímulo. A escolha por esse modelo também se justificou pelo seu baixo consumo de energia, compatibilidade com a tensão de saída da placa Raspberry Pi e facilidade de fixação à mão por meio de velcros, o que garantiu conforto e flexibilidade de uso (BEST ELECTRONICS, 2017).

3.2.3 Sensor piezoelétrico

O módulo de vibração e toque piezoelétrico de 20 mm (Fig. 16) foi incorporado ao sistema para servir como elemento de teste e calibração da sensibilidade tátil. Ele operou a

Figura 10 – Raspberry 4 montado

Fonte: Autoria própria (2025).

5 V CC, suportando temperaturas de -10°C a 70°C , e apresentou saída tanto analógica — que varia proporcionalmente à intensidade da vibração aplicada — quanto digital — que sinaliza nível alto ou baixo quando a vibração ultrapassa um limiar ajustável via trimpot integrado. A pastilha piezoelétrica, com diâmetro de 20 mm, foi montada em um módulo de dimensões aproximadas de $20 \times 20 \times 5$ mm e peso de cerca de 3 g, contando com fios pré-soldados para garantir confiabilidade nas conexões (MURATA MANUFACTURING CO., LTD., 1990–2023).

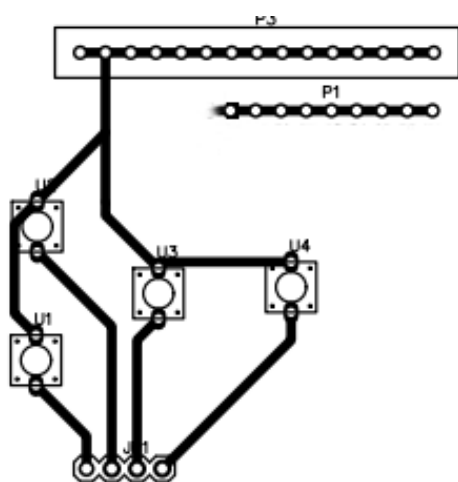
Durante a fase de desenvolvimento, esse sensor foi conectado ao Raspberry Pi através da PCB personalizada, permitindo a leitura dos sinais analógicos pelo conversor ADC e o disparo de eventos pelo sinal digital. Essa configuração possibilitou a avaliação da resposta do sistema a diferentes frequências e amplitudes de vibração, auxiliando na definição dos parâmetros de acionamento dos motores Vibracall 1027 e na calibração da sensibilidade geral do dispositivo.

3.2.4 Placa de circuito impresso

Com o intuito de facilitar a distribuição de energia para os sensores e atuadores, foi projetada e confeccionada uma placa de circuito impresso (PCB) personalizada, representada na Fig. 11a e aplicada na 11b. Essa PCB permitiu a organização eficiente das conexões de 5 V e GND, melhorando a confiabilidade elétrica do sistema e evitando sobre-

carga nos pinos do Raspberry Pi. Além disso, a placa integrou quatro botões físicos que desempenharam funções essenciais para a navegação na interface gráfica do dispositivo. Os botões foram configurados da seguinte forma: um botão para interrupção imediata da operação, outro para a seleção da música desejada, um para subir e outro para descer o cursor durante a navegação no menu de seleção.

Figura 11 – Placa de circuito impresso - representação e aplicação



(a) Projeto



(b) PCB impressa

Fonte: Autoria própria (2025).

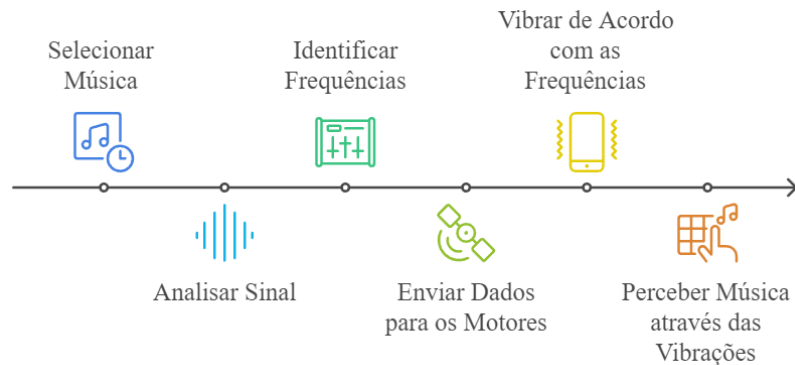
3.2.5 Equipamento

Após entender a reação do corpo e discutir cada componente, foi realizado um esquema para exemplificar o dispositivo de forma didática, cujas etapas são apresentadas na Fig. 12.

3.2.5.1 Integração e funcionamento geral

A integração desses componentes possibilitou o desenvolvimento de uma interface tátil eficaz, aliada a um sistema de controle robusto, assegurando uma experiência consistente na interpretação de sinais sonoros por meio de vibrações. Assim que o Raspberry Pi identificava a seleção da música, os dados eram processados e rapidamente convertidos em comandos enviados aos motores vibratórios, promovendo uma resposta quase imediata. O sistema também permitia a interrupção da operação a qualquer momento, conferindo ao usuário maior autonomia e controle durante o uso.

Figura 12 – Esquema didático do projeto



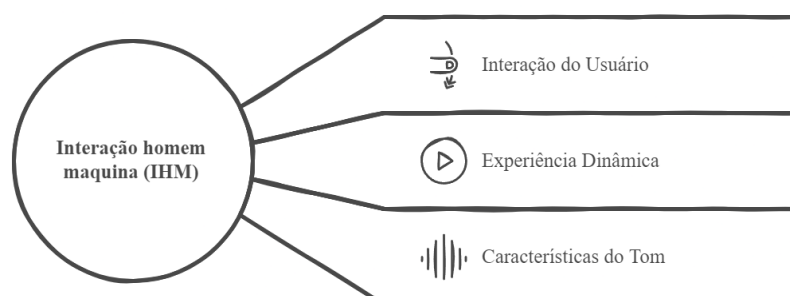
Fonte: Autoria própria (2025).

A alimentação do sistema foi realizada por meio da fonte oficial do Raspberry Pi, do tipo USB-C, com fornecimento de 5 V e corrente mínima de 3 A. Essa especificação foi essencial para garantir a estabilidade do sistema, sobretudo em situações nas quais periféricos adicionais estavam conectados, como unidades de armazenamento externo, teclados ou mouses.

Na Fig. 9, o dispositivo processa a música selecionada pela pessoa surda e analisa o sinal, identificando as diferentes faixas de frequência e, por fim, envia esses dados aos motores, os quais fazem com que ocorra a vibração de acordo com a faixa de frequência detectada. O objetivo é traduzir as características sonoras da música em estímulos táteis, permitindo que o desfrutador perceba os elementos rítmicos e melódicos por meio das vibrações.

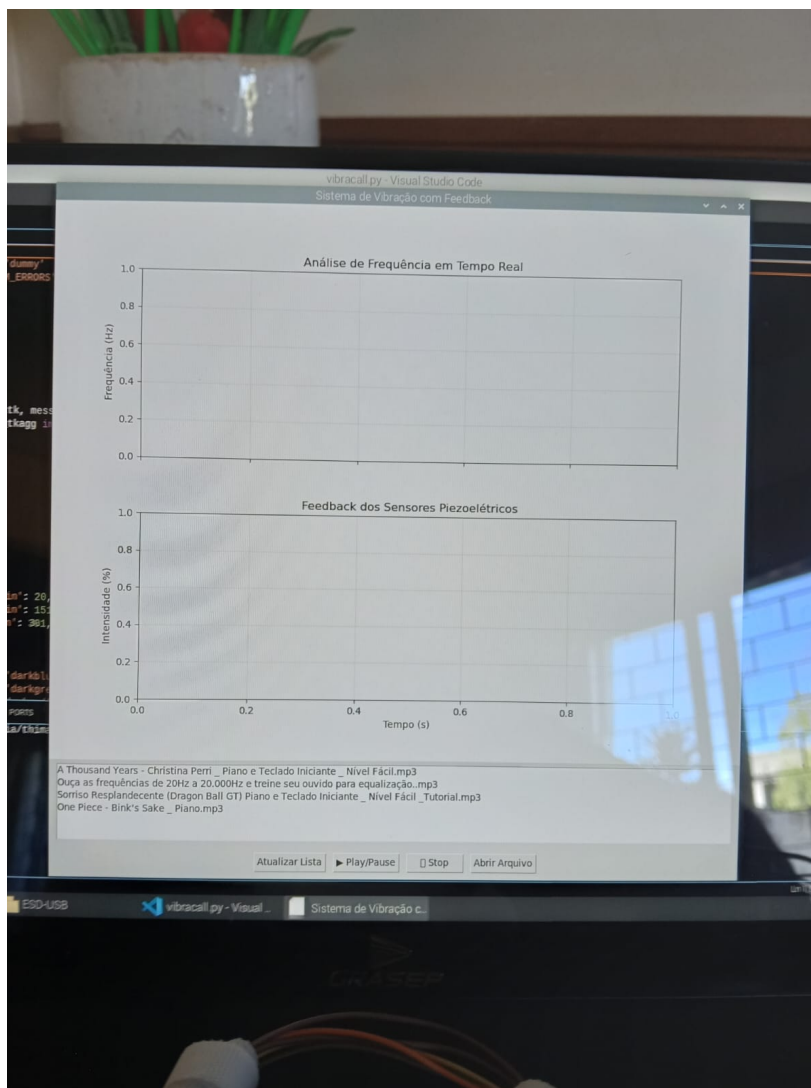
Para o processo de comunicação com a pessoa, o sistema apresenta graficamente o sinal processado, permitindo que ela compreenda visualmente as características da música, como a predominância de tons agudos ou graves. Além disso, o dispositivo oferece uma funcionalidade de interrupção, possibilitando que a pessoa pause ou interrompa o processo a qualquer momento, se necessário. Também é possível trocar de música sem a necessidade de esperar que a faixa atual termine, proporcionando uma experiência de uso mais dinâmica e interativa, vide Fig. 13 e Fig. 14.

Figura 13 – Interação homem máquina



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 14 – Interação homem maquina



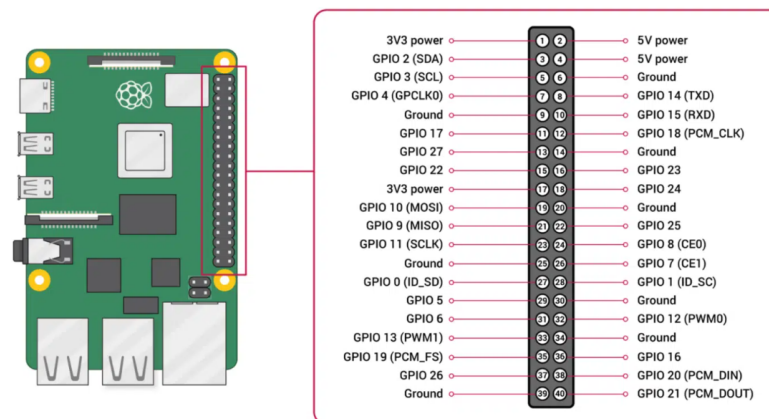
Fonte: Autoria própria (2025).

Para realizar a integração do processador com o corpo humano, foi utilizado o motor Vibracall 1027, Fig. 15, que é compacto, cilíndrico e projetado para gerar vibrações perceptíveis em pequenos dispositivos. Este motor possui diâmetro de 10 mm e comprimento de 2,7 mm, opera com uma tensão de 3 V e gera uma frequência de vibração em torno de 120 Hz, ideal para feedback tátil. Sua leveza e baixa potência garantem ergonomia, permitindo que seja integrado ao dispositivo sem causar desconforto à pessoa. Esse motor atende de maneira simples e eficiente ao objetivo do projeto, ao proporcionar vibrações que podem ser sentidas diretamente na pele, criando uma interface tátil eficaz.

O sensor de vibração piezoelétrico, Fig. 16, opera com tensão de 3,3V a 5V, sendo facilmente integrado à microcontroladores como o Raspberry Pi 4 ou Arduino. Ele oferece saídas analógica, que fornecem um sinal proporcional à intensidade da vibração, e digital, com sinal de alta ou baixa lógica. Com 20 mm de diâmetro, o sensor é altamente sensível, de baixo consumo de energia e adequado para detectar vibrações e toques. No projeto, ele

focado em projetos de microcontroladores, com suporte limitado a interfaces, enquanto o Raspberry Pi 4 Model B oferece maior poder de processamento, mais memória e diversas portas de entrada/saída, incluindo portas PWM nativas, essenciais para este projeto. Foi escolhido o Raspberry Pi 4 Model B devido às portas PWM já inclusas, facilitando o controle da oscilação de frequência, que será representada pela variação de tensão na faixa permitida pelo motor Vibracall 1027, cuja tensão mínima é de 2 V e a máxima é de 3,6 V. Além disso, o Raspberry Pi 4 Model B possui um sistema operacional completo, o que o diferencia de alternativas como o Arduino, que requer um ambiente de desenvolvimento mais básico e menos funcionalidades integradas.

Figura 17 – Raspberry pi 4 model B

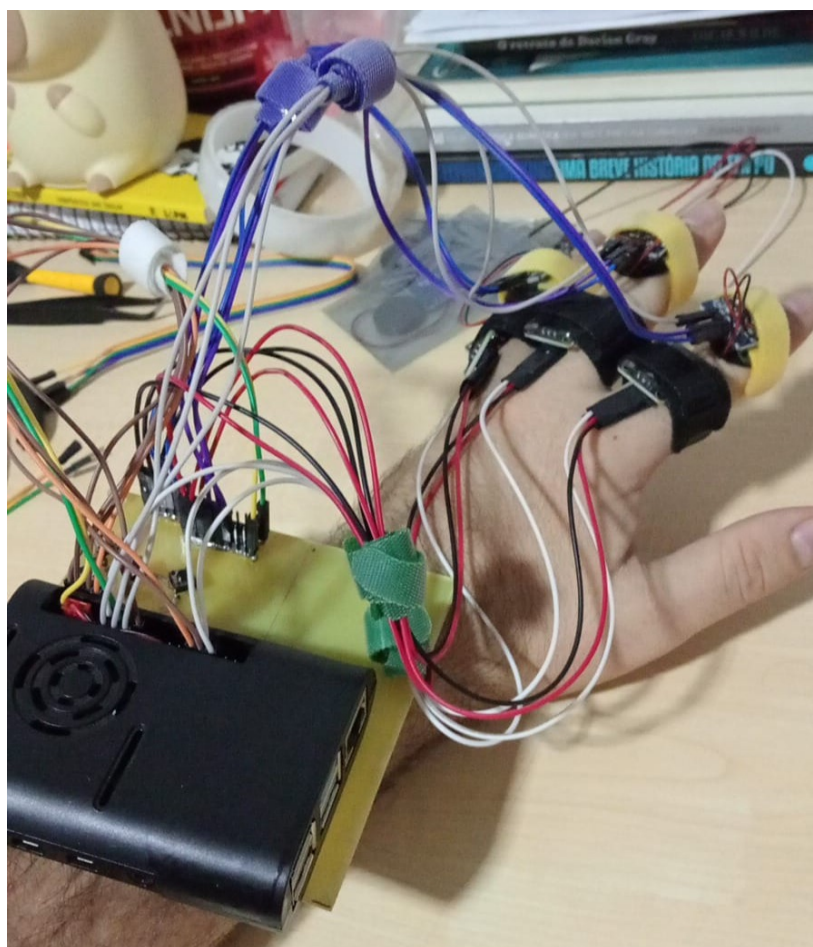


Fonte: Maker hero (2025).

Segue a integração dos equipamentos citados, sendo conectados com velcro para melhor adaptação, levando em consideração os pontos da Fig. 17. Além disso, a Fig. 18 demonstra como o dispositivo deve ser posicionado em um primeiro momento.

Com o objetivo de ocultar a fiação e facilitar a instalação do dispositivo, os elementos foram montados em uma luva, que recebeu um forro interno destinado à organização dos cabos, conforme ilustrado na Fig. 19a e Fig. 19b. Contudo, durante os testes realizados, observou-se que o tamanho da luva era superior ao da mão, o que gerou certo desconforto. Além disso, ao manipular os fechos de velcro presentes nos motores e sensores, foi percebida uma experiência de uso mais satisfatória, indicando uma possível preferência por esse tipo de fixação.

Figura 18 – Prototipo



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 19 – Duas vistas do protótipo com luva.



(a) Protótipo com luva (vista 1)



(b) Protótipo com luva (vista 2)

Fonte: Autoria própria (2025).

4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Este capítulo apresenta a estrutura e o funcionamento do sistema desenvolvido, desde a configuração do ambiente e bibliotecas utilizadas até o fluxo de funcionamento, integração com hardware e interface gráfica.

4.1 BIBLIOTECAS UTILIZADAS E CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE

O código foi desenvolvido na linguagem **Python**, pela sua versatilidade, legibilidade e ampla compatibilidade com o Raspberry Pi. Foram utilizadas as seguintes bibliotecas:

- **NumPy**: processamento numérico eficiente.
- **wave** e **pyaudio**: leitura e reprodução de arquivos de áudio.
- **scipy.fftpack** e **scipy.signal**: cálculo da FFT e aplicação de janela de Hann.
- **pydub**: conversão de arquivos MP3 para WAV.
- **RPi.GPIO**: controle dos pinos de entrada e saída da Raspberry Pi.
- **tkinter** e submódulos: construção da interface gráfica.
- **matplotlib**: exibição de gráficos em tempo real.
- **threading**, **queue** e **collections**: controle de execução paralela e armazenamento eficiente de dados.

4.2 CONFIGURAÇÃO DO HARDWARE

Os pinos do Raspberry Pi foram configurados em modo BCM. Foram definidos dois dicionários para mapear os motores e sensores:

Motores: Associados a faixas de frequência (baixo, médio, alto), cada um ligado a um pino PWM e representado por uma cor nos gráficos.

Sensores: Mapeados a pinos digitais com resistores de pull-down para evitar ruído.

4.3 VARIÁVEIS E PARÂMETROS GLOBAIS

- **BUFFER-SIZE**: 2048 amostras por bloco de áudio.
- **TAXA-AMOSTRAGEM-SENSORES**: 100 Hz.
- **MIN-FREQ** e **MAX-FREQ**: 20 Hz a 500 Hz.

- data-queue: fila de comunicação entre threads.
- x-data, y-freq, y-sensores: buffers circulares para tempo, frequência e sensores.
- **playing e paused**: controle de execução com `threading.Event()`.

4.4 CLASSE MUSICLIBRARY

Essa classe escaneia diretórios predefinidos em busca de arquivos MP3 ou WAV e retorna uma lista de caminhos completos, usados para alimentar a lista de seleção de músicas na interface gráfica.

4.5 FUNÇÕES PRINCIPAIS

Principais funções requeridas para o funcionamento do dispositivo, as quais asseguram a operacionalidade do fluxograma ilustrado na Fig. 20.

4.5.1 ler sensores()

Executa dez leituras digitais consecutivas de cada sensor piezoelétrico, calcula a média e retorna valores em porcentagem, filtrando ruídos.

4.5.2 calcular frequencia()

Aplica FFT a um bloco de áudio após janela de Hann, identifica o pico espectral e retorna a frequência dominante, indicando qual motor ativar.

4.5.3 processar audio()

Executada em thread paralela, realiza:

- Conversão de MP3 para WAV (caso necessário);
- Leitura de blocos de áudio;
- Cálculo da frequência dominante;
- Controle dos motores via PWM (com duty cycle proporcional à frequência);
- Leitura de sensores e envio para atualização gráfica.

4.6 INTERFACE GRÁFICA

Desenvolvida com `tkinter`, permite:

- Escolha de música via navegador de arquivos;
- Visualização de gráficos de frequência e resposta sensorial em tempo real;
- Comandos de reprodução: iniciar, pausar, parar e trocar música.

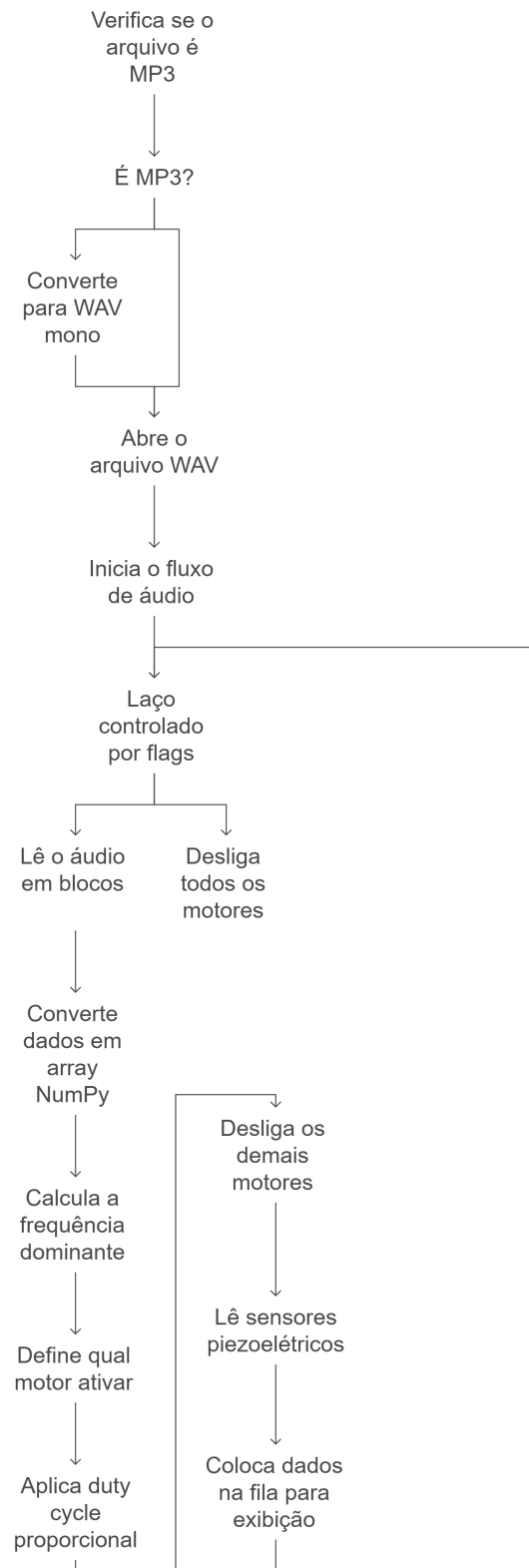
A interface atualiza-se dinamicamente com base nos dados lidos da thread de processamento de áudio, tornando a experiência interativa e intuitiva.

4.7 ENCERRAMENTO DO SISTEMA

Ao final da execução ou em caso de interrupção, os motores são desligados, as threads são encerradas e os pinos GPIO são resetados, garantindo segurança e estabilidade para execução futura do sistema.

Figura 20 – Fluxo do processamento de áudio e controle de motores

Processo de Controle de Motor por Frequência de Áudio



Fonte: Autoria própria (2025).

5 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento do projeto, com base nos objetivos propostos.

5.1 MONTAGEM DO DISPOSITIVO

A montagem do dispositivo constituiu uma etapa essencial para garantir seu funcionamento eficaz e seguro. As etapas a seguir detalham os resultados alcançados.

5.1.1 Integração dos Componentes

A integração entre o Raspberry Pi 4 Model B, os motores vibratórios (Vibracall 1027), os sensores piezoelétricos e a interface gráfica demonstrou ser eficaz. A alimentação dos motores foi feita com controle PWM, e os sensores foram conectados com resistores de pull-down, minimizando ruídos. Os motores foram fixados com tiras de velcro, proporcionando conforto e flexibilidade para ajustes conforme o tamanho da mão de cada usuário.

5.1.2 Calibração dos Motores

Os motores Vibracall 1027 foram calibrados para produzir vibrações correspondentes às intensidades e frequências desejadas. Durante os testes, foi observado que a resposta tátil era rápida e as vibrações, de forma geral, eram bem interpretadas. Contudo, foi apontado que frequências muito similares nem sempre eram bem diferenciadas, mesmo quando o sensor indicava diferenças claras. Esse fenômeno foi atribuído à interpretação sensorial dos corpúsculos de Pacini e Meissner, bem como ao processamento cerebral.

5.1.3 Desenvolvimento da Interface Gráfica

A interface gráfica desenvolvida no dispositivo foi considerada intuitiva e de fácil utilização. Apesar de simples, a interface foi descrita como agradável e funcional. A funcionalidade de feedback visual auxiliou na compreensão do estado do dispositivo, melhorando a experiência do usuário.

5.1.4 Análise pró dispositivo

Conforme ilustrado na Fig. 21, diversos aspectos positivos do projeto foram destacados.

Inovação e Inclusão: O dispositivo ampliou o acesso à experiência musical e cultural para pessoas com deficiência auditiva, ao converter vibrações sonoras em estímulos táteis.

Tecnologia Assistiva Avançada: A transformação de informações auditivas em sensações físicas explorou a plasticidade cerebral, permitindo que o córtex somatossensorial interpretasse vibrações com eficiência. Isso abriu novas formas de interação com o ambiente.

Impacto Social: A tecnologia demonstrou potencial não apenas para beneficiar indivíduos com deficiência auditiva, mas também para promover avanços em áreas como educação e entretenimento inclusivos.

5.1.5 Análise das limitações e desafios

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas:

Barreiras Técnicas e Financeiras: O custo elevado de desenvolvimento e a complexidade técnica ainda representam entraves para uma maior acessibilidade, especialmente em regiões com poucos recursos.

Adaptação e Manutenção: O uso eficiente do dispositivo requer certo treinamento, e a dependência de manutenção especializada pode dificultar sua adoção em larga escala.

Desconforto Prolongado: Apesar de os motores serem leves, foi relatado que seu uso por longos períodos pode causar desconforto.

Limitação de Diferenciação de Frequências: Frequências muito similares foram percebidas de maneira semelhante, o que sugere uma limitação perceptual mesmo quando os sensores indicavam diferenças claras.

Estética: A aparência do dispositivo foi considerada regular, não comprometendo o uso, mas também não se destacando positivamente.

Figura 21 – Análise do dispositivo

Análise do Dispositivo: Pontos Fortes e Fracos

Característica	Pontos Fortes	Limitações
Acessibilidade	Acesso ampliado à música	Alto custo limita a acessibilidade
Tecnologia	Tecnologia assistiva avançada explorou a plasticidade	Requer adaptabilidade e manutenção
Experiência do Usuário	Confortável, leve, responsivo, intuitivo	Uso prolongado causa desconforto
Percepção	Abre novas formas de interação	Diferença de frequência limitada
Estética	N/A	Aparência considerada regular
Impacto Social	Promove inclusão e integração	N/A

Fonte: Autoria própria (2025).

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas observações feitas durante os testes, diversas oportunidades de aprimoramento e expansão do projeto foram identificadas. Abaixo, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que podem contribuir para o avanço da tecnologia assistiva desenvolvida:

- **Aprimoramento ergonômico do dispositivo:** desenvolver um novo formato de fixação dos motores que dispense o uso da luva, priorizando conforto, estabilidade e facilidade de uso, inclusive por longos períodos.
- **Design industrial e estético:** investir no aperfeiçoamento visual do dispositivo, tornando-o mais discreto e esteticamente agradável, a fim de aumentar a aceitação social e o uso cotidiano pelos usuários.
- **Integração com plataformas de música:** ampliar a interface do sistema para permitir conexão com serviços de streaming, oferecendo uma experiência mais rica e personalizada.
- **Sistema de diferenciação tátil aprimorado:** investigar e implementar estratégias para melhorar a distinção de vibrações com frequências próximas, considerando a resposta dos corpúsculos de Pacini e Meissner e o processamento neurológico das sensações táteis.
- **Customização da experiência tátil:** desenvolver perfis de vibração personalizados com base nas preferências individuais de cada usuário, permitindo ajustes finos de intensidade, localização e padrão de vibração.
- **Acompanhamento por tempo prolongado:** realizar estudos de usabilidade com um grupo maior de participantes e por períodos mais longos, avaliando os impactos ergonômicos, cognitivos e emocionais do uso contínuo do dispositivo.
- **Expansão para outras aplicações sensoriais:** explorar o uso da tecnologia para outras finalidades além da música, como notificações acessíveis, feedback em jogos digitais ou experiências sensoriais imersivas para pessoas com outras deficiências.
- **Integração com inteligência artificial:** aplicar algoritmos de aprendizado de máquina para ajustar automaticamente os padrões de vibração de acordo com o estilo musical, preferências do usuário ou contextos de uso.

Essas direções de continuidade demonstram o potencial de expansão e refinamento do projeto, consolidando-o como uma ferramenta inovadora no campo da acessibilidade sensorial e da inclusão digital.

7 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do dispositivo vibrotátil proposto neste trabalho demonstrou ser uma solução viável e promissora para ampliar o acesso à experiência musical por pessoas com deficiência auditiva. A montagem dos componentes, a calibração dos motores e o desenvolvimento da interface gráfica foram realizados com sucesso, resultando em um sistema funcional, responsivo e intuitivo.

Diferentemente de protótipos acadêmicos e comerciais existentes, nosso dispositivo se destaca pela combinação inédita de três atuadores vibratórios integrados a uma interface gráfica personalizável, o que permite mapear distintas faixas de frequência musical em pontos de estimulação tátil de forma simultânea e sincronizada. Essa originalidade confere ao usuário uma experiência de percepção multifrequencial mais rica e fiel à dinâmica da música, superando limitações de resolução e latência observadas em soluções anteriores.

Os testes revelaram aspectos positivos significativos: o dispositivo foi considerado leve, fácil de utilizar e com resposta rápida; a interface, mesmo de design simples, mostrou-se agradável e funcional. Observou-se, porém, uma limitação na diferenciação de frequências muito próximas, possivelmente relacionada aos mecanismos de processamento tátil do sistema nervoso humano.

A utilização da luva, originalmente proposta para acomodar cabos e organizar o sistema, apresentou restrições ergonômicas—uma oportunidade clara para aprimorar o design físico e aumentar o conforto em uso prolongado. Esses achados ressaltam a importância de integrar critérios de usabilidade e adaptação anatômica em tecnologias assistivas.

Para validar a eficácia clínica do dispositivo e sua aplicabilidade em contextos terapêuticos, é imprescindível realizar estudos controlados com profissionais de saúde—fisioterapeutas, terapeutas ocupacionais e fonoaudiólogos—que avaliem parâmetros funcionais e de bem-estar ao longo do tempo. Ensaios clínicos em populações com diferentes perfis de perda auditiva poderão fornecer evidências robustas sobre segurança, tolerabilidade e benefícios sensoriais a longo prazo.

Em suma, apesar de desafios técnicos e necessidade de refinamentos, o protótipo desenvolvido representa uma contribuição original ao campo de interfaces táteis musicais, unindo mapeamento multifrequencial e interatividade gráfica em um sistema portátil. Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Otimizar o design ergonômico (luva e pontos de contato) visando conforto e adesão ao uso diário;
- Aperfeiçoar algoritmos de diferenciação de frequências e explorar estratégias de feedback adaptativo;

- Conduzir estudos clínicos com equipe multidisciplinar para atestar a eficácia, segurança e impacto na qualidade de vida de usuários com deficiência auditiva;
- Contribuir para a inclusão de pessoas com deficiência auditiva em experiências culturais e musicais, além de abrir novas possibilidades de interação sensorial mediada por tecnologia.

Como trabalhos futuros, recomenda-se o aprimoramento do design físico do dispositivo para maior conforto, o aumento da precisão na diferenciação de frequências e a realização de testes com uma amostra maior de usuários. Há também espaço para o desenvolvimento de interfaces mais sofisticadas e personalizáveis, bem como para a integração com plataformas de streaming musical.

REFERÊNCIAS

- BEST ELECTRONICS. **1027 Disc Vibration Motor Datasheet**. 2017. Disponível em: <<https://buybestelectronic.com/part-image/15684/datasheet/15684.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- GICK, B.; DERRICK, D. Aero-tactile integration in speech perception. **Nature**, Nature Publishing Group, London, UK, v. 462, n. 7272, p. 502–504, nov. 2009. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature08572>> Acesso em: 10 jan. 2025.
- GUYTON, A. C.; HALL, J. E. **Tratado de Fisiologia Médica**. 13. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- HOLMES, J. A. Expert listening beyond the limits of hearing: Music and deafness. **Journal of the American Musicological Society**, University of California Press, Berkeley, CA, USA, v. 70, n. 1, p. 171–220, 2017. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/26417288>> Acesso em: 10 jan. 2025.
- MACHADO, A.; HAERTEL, L. M. **Neuroanatomia Funcional**. São Paulo: Atheneu, 2013.
- MURATA MANUFACTURING CO., LTD. **Piezoelectric Ceramic Sensors (PIEZOTITE®) Catalog**. 1990–2023. Disponível em: <<https://static.chipdip.ru/lib/180/doc000180475.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- PINHO, L. **TRON desenvolve dispositivo em parceria com o artista Whindersson Nunes para que surdos e deficientes auditivos possam sentir a música**. 2022. Disponível em: <<https://tron-edu.com/blog/86-news/325-tron-desenvolvedispositivo-em-parceria-com-o-humorista-whindersson-nunes-para-surdos>>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- RASPBERRY PI LTD. **Raspberry Pi 4 Model B Datasheet**. 2024. Disponível em: <<https://datasheets.raspberrypi.org/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2025.
- SILVERTHORN, D. U. **Fisiologia Humana: Uma abordagem integrada**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017.
- TRANCHANT, P. et al. Feeling the beat: Bouncing synchronization to vibrotactile music in hearing and early deaf people. **Frontiers in Neuroscience**, Frontiers Media S.A., Lausanne, Switzerland, v. 11, p. 507, set. 2017. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2017.00507/full>> Acesso em: 10 jan. 2025.