

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

Paloma Fernanda Loureiro Sette

Maria Candal Werneck

**PROJETO DE TRADUÇÃO SENSORIAL DE ESTÍMULOS SONOROS PARA PESSOAS
PORTADORAS DE DEFICIÊNCIA AUDITIVA**

RIO DE JANEIRO

2025

PALOMA FERNANDA LOUREIRO SETTE
MARIA CANDAL WERNECK

TECNOLOGIAS ASSISTIVAS EM NEUROCIÊNCIAS (NEC1605)

**PROJETO DE TRADUÇÃO SENSORIAL DE ESTÍMULOS SONOROS PARA PESSOAS
PORTADORAS DE DEFICIÊNCIA AUDITIVA**

Trabalho apresentado para avaliação na disciplina
Tecnologias Assistivas em Neurociências na
PUC-Rio com o professor William Barbosa.

RIO DE JANEIRO

2025

RESUMO

Este projeto propõe o desenvolvimento de um protótipo sensorial capaz de traduzir sons do ambiente — incluindo música, fala e sons no geral — em estímulos perceptíveis por meio de cores, formas e vibrações. A proposta visa ampliar a acessibilidade auditiva para pessoas com deficiência sensorial, utilizando sensores como microfones piezoelétricos e eletretos, processados em tempo real por um microcontrolador (Arduino ou Raspberry Pi). O som captado é analisado via transformada rápida de Fourier (FFT) e outros parâmetros espectrais, sendo então mapeado para saídas multissensoriais: cores em LEDs RGB, formas geométricas em displays visuais, e padrões de vibração mecânica. Além do caráter técnico e funcional, o projeto carrega um compromisso social e educacional, promovendo inclusão e percepção alternativa do som.

Palavras-chave: acessibilidade, som, tradução sensorial, vibração, cor, deficiência auditiva.

ABSTRACT

This project proposes the development of a sensory prototype capable of translating environmental sounds — including music, speech, and other signals — into perceptible stimuli through colors, shapes, and vibrations. The goal is to enhance auditory accessibility for individuals with sensory impairments, using sensors such as piezoelectric and electret microphones, processed in real time by a microcontroller (Arduino or Raspberry Pi). The captured sound is analyzed via Fast Fourier Transform (FFT) and other spectral parameters, then mapped to multisensory outputs: RGB LED colors, geometric shapes on visual displays, and mechanical vibration patterns. Beyond its technical and functional dimensions, the project carries a strong social and educational commitment, promoting inclusion and alternative perception of sound.

Keywords: accessibility, sound, sensory translation, vibration, color, hearing impairment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	5
2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO DA MARCA.....	5
3 REFERENCIAL CONCEITUAL E MERCADOLÓGICO.....	6
3.1 IDENTIDADE DA MARCA.....	6
3.2 PÚBLICO-ALVO.....	7
3.3 PESQUISA DE MERCADO.....	7
4 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....	10
4.2 Arquitetura geral do sistema.....	10
4.3 Pipeline de processamento computacional.....	10
4.3.1 Princípios do pré-processamento do sinal.....	11
4.3.2 Pré-processamento e preparação dos dados.....	12
4.3.3 Modelagem computacional (Machine Learning).....	13
4.3.4 Fluxograma geral do sistema.....	13
5. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....	15
5.1 Especificações de hardware.....	16
5.2 Especificações de software.....	17
5.3 Mapeamento som → estímulos sensoriais.....	18
5.4 Montagem e integração dos módulos.....	18
5.5 Estratégia de prototipagem e testes.....	19
5.5.1 FASE 1 – Validação computacional do pipeline.....	19
5.5.2 FASE 2 – Prototipagem física inicial.....	19
5.5.3 FASE 3 – Integração parcial e testes sensoriais.....	19
5.5.4 FASE 4 – Ajustes heurísticos e expansão modular.....	20
6. FUNCIONAMENTO DO PRODUTO.....	20
6.1 Fluxo de entrada e saída (o que entra como som, o que sai como estímulo).....	20
6.2 Exemplo de uso.....	21
7. PLANO DE MARKETING E INSERÇÃO NO MERCADO.....	21
7.1 Estratégia de divulgação.....	22
7.2 Faixa de preço estimado.....	23
7.3 Canais de distribuição.....	23
8. RISCOS, LIMITAÇÕES E POTENCIAIS MELHORIAS.....	24
CONCLUSÃO.....	26
REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

A música é uma das formas mais poderosas de expressão humana, mas ainda permanece inacessível para uma parcela significativa da população com deficiência auditiva. Diante desse desafio, o presente projeto propõe o desenvolvimento de uma solução tecnológica inovadora que permita a tradução de sons musicais em estímulos sensoriais alternativos (especialmente visuais e táteis) como forma de ampliar o acesso à experiência musical.

O projeto MusTEM (Música: Tradução Emocional Multissensorial) está sendo desenvolvido no contexto da disciplina Tecnologias Assistivas em Neurociência, do curso de Engenharia da PUC-Rio, e parte da proposta de integrar conceitos de engenharia eletrônica, neurociência, design sensorial e acessibilidade. A iniciativa tem como objetivo principal investigar a viabilidade de um dispositivo experimental de substituição sensorial, capaz de captar sons do ambiente e traduzi-los, em tempo real, em estímulos perceptíveis por outros sentidos.

Mais do que uma ferramenta de mediação sensorial, o MusTEM busca promover a inclusão de pessoas com deficiência auditiva por meio da tecnologia, respeitando os princípios de democratização da arte, inovação acessível e empatia no design. Ao explorar os limites entre percepção, tecnologia e comunicação, o projeto também se propõe a abrir caminho para novas linguagens multissensoriais e formas de interação com o som.

2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO DA MARCA

A motivação central deste projeto nasce do compromisso com a inclusão social e a democratização do acesso à informação sensorial. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), mais de 430 milhões de pessoas em todo o mundo vivem com algum grau de deficiência auditiva (“Saúde auditiva - OPAS/OMS | Organização Pan-Americana da Saúde”, n.d.), o que frequentemente limita sua participação plena em experiências culturais, educacionais e sociais (WHO, 2021). Diante desse cenário, torna-se fundamental o desenvolvimento de soluções inovadoras que possam ampliar as possibilidades de percepção do ambiente para esse público.

Inspirada por princípios de acessibilidade e *design* universal, a marca busca criar uma ponte entre universo sonoro e outros canais sensoriais, como visão e tato. O objetivo é

proporcionar uma nova forma de vivenciar sons - incluindo música, fala e ruídos ambientais - por meio de estímulos visuais e táteis, promovendo uma experiência multissensorial única e acessível. Essa abordagem não apenas beneficia pessoas com deficiência auditiva, mas também a criatividade, a educação inclusiva e a percepção alternativa do som para todos.

O projeto propõe, portanto, o desenvolvimento de um protótipo sensorial inovador, capaz de captar sons do ambiente, analisá-los em tempo real e traduzi-los em cores, formas e vibrações. Utilizando tecnologias como microfones piezoelétricos, microcontroladores e algoritmos de processamento de sinais e machine learning, a solução visa criar uma linguagem universal para os sons, ampliando horizontes de comunicação e expressão. Ao unir tecnologia, sensibilidade social e criatividade, a marca reafirma seu compromisso em transformar desafios em oportunidades de inclusão, tornando o mundo mais acessível, diverso e conectado.

3 REFERENCIAL CONCEITUAL E MERCADOLÓGICO

Esta seção apresenta os fundamentos conceituais e estratégicos que embasam o desenvolvimento da marca, bem como sua proposta de valor, público-alvo e inserção no mercado. São exploradas as origens da identidade da marca, os princípios que orientam sua missão social e a visão de inovação assistiva que permeia todo o projeto. A partir desse referencial, delineiam-se as diretrizes para o posicionamento do produto como uma tecnologia acessível, inclusiva e emocionalmente significativa para pessoas com deficiência auditiva e demais públicos sensíveis à multissensorialidade.

3.1 IDENTIDADE DA MARCA

A MusTEM surgiu, inicialmente, apenas com a ideia de um produto e um objetivo: traduzir música em cores, formas e vibrações para que pessoas com deficiência auditiva pudessem experienciar essa forma de arte. A partir dessa ideia, se criou o nome MusTEM, acrônimo para Música: Tradução Emocional Multissensorial.

Com o desenvolvimento da marca, a ideia se ampliou para substituição sensorial de estímulos sonoros, musicais ou não - incluindo assim fala e sons do ambiente. Oferecer um aparelho de substituição sensorial que possibilite a pessoas com deficiência auditiva experienciar estímulos auditivos através da visão e do tato - usando cores, formas e vibração - é a missão da MusTEM.

Figura 1 - Logotipo da marca



A logotipo da marca (Figura 1) também foi criada com base na ideia inicial. Com base na pesquisa de Valdez e Mehrabian (1994) sobre associações entre cores e emoções, as cores escolhidas foram azul - associada à palavra “confortável” - e preto - associada a palavras como “poderoso” e “forte”. A tipografia foi feita na fonte Quicksand, por ser leve, moderna e amigável, e o símbolo da clave de fá foi escolhido para complementar a logo. A clave de fá é um símbolo da teoria musical, usado para determinar a posição das notas em um pentagrama. Ele foi incluído por ter um formato que remete, ao mesmo tempo, um ouvido externo e metade de um coração. Assim, a logotipo transmite a essência da MusTEM, uma marca inclusiva, sensível, criativa, artística, simples e moderna.

3.2 PÚBLICO-ALVO

O público-alvo do produto é a comunidade de pessoas com deficiência auditiva, especialmente aquelas que buscam alternativas sensoriais para ampliar sua percepção sonora em contextos educacionais, artísticos ou cotidianos. O sistema MusTEM também se destina a profissionais de inclusão, terapeutas ocupacionais, educadores de surdos, artistas experimentais e instituições interessadas em tecnologias assistivas inovadoras.

Além disso, o produto pode beneficiar:

- Crianças em processo de reabilitação auditiva;
- Estudantes de escolas inclusivas e centros de educação especial;
- Usuários interessados em experiências sensoriais multimodais (arte, performance, tecnologia).

A proposta busca atender a um público diverso, promovendo acessibilidade, inclusão social e experimentação sensorial em diferentes faixas etárias e contextos socioculturais.

3.3 PESQUISA DE MERCADO

A pesquisa de mercado do produto foi feita em duas frentes. A primeira, voltada ao público-alvo e à viabilidade de aplicação da tecnologia, foi conduzida a partir de um

formulário online. Enquanto a segunda investigou a concorrência, mapeando produtos e sistemas que tivessem um objetivo igual ou semelhante ao da MusTEM.

Na primeira pesquisa foram obtidas 17 respostas, todas de participantes do Rio de Janeiro. A faixa etária dos respondentes variou bastante, a maior parte se encaixando entre 19 e 24 anos (52,9%), enquanto a segunda maior frequência foi mais de 50 anos (29,4%). Além disso, mais da metade dos participantes se identificaram como estudantes.

Ainda na parte de conhecer os respondentes do formulário, a pergunta “Qual a importância da música na sua vida?” foi feita e obteve respostas como: “Ouço música praticamente todos os dias, sinto que a música me conecta comigo mesma e com o mundo de diversas maneiras”; “Extrema, sinto que a música me move.”; e “Amo música, pra mim é importante para colocar no eixo de novo, me acalma ao mesmo tempo que me dá ânimo pra viver”. Respostas como essas demonstram a importância da música na vida das pessoas e apoiam uma das motivações por trás da MusTEM: oferecer uma experiência musical para pessoas com deficiência auditiva.

Para voltar a pesquisa ao público-alvo do produto foi incluída uma seção voltada à identificação de deficiência auditiva. Dentre os participantes, apenas 1 (5,9%) respondeu sim, declarando deficiência auditiva congênita, ou seja, de nascença, de grau moderado (nível 3 em uma escala de 1 a 5). No entanto, 70% afirmaram conhecer alguém com deficiência auditiva. Quanto a relação dessas pessoas com música, poucos responderam e esses se dividiram entre ter uma relação ou não, sendo inconclusiva.

A última seção do formulário era relativa ao interesse e percepção do produto proposto. Sobre a possível utilidade e benefícios do produto (“Você acha que esse aparelho seria útil e benéfico para pessoas com deficiência auditiva?”), 82,4% dos participantes marcaram a opção “sim” e 17,6% “talvez”. Como demonstra a Figura 2, as respostas sobre interesse de compra do produto foram divididas. No entanto, na Figura 3 é possível observar que a maior parte dos participantes recomendaria o produto.

Figura 2 - Gráfico de respostas de intenção de compra

Você compraria esse aparelho?

17 respostas

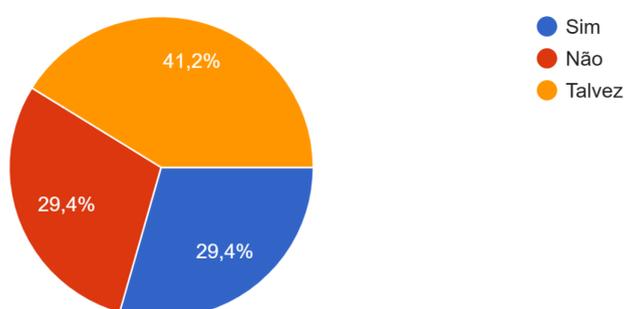
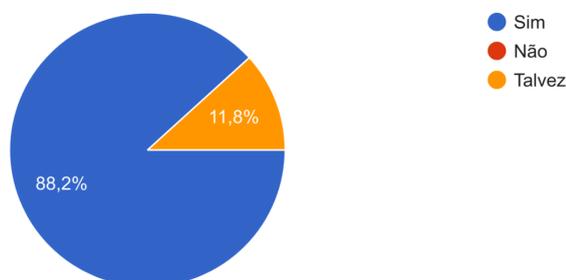


Figura 3 - Gráfico de respostas de recomendação do produto

Você recomendaria esse produto para pessoas que pudessem usufruir de suas funcionalidades?

17 respostas



Apesar da pequena amostra alcançada, é possível observar tendências de comportamento dos potenciais compradores e interesse na tecnologia sendo desenvolvida. A última pergunta do questionário foi “Você conhece algum produto que tenha uma proposta semelhante ao nosso? Se sim, qual?”, para a qual todas as respostas foram variações de “não”. Isso reflete o que foi encontrado na segunda parte da pesquisa, sobre concorrentes.

Ao buscar concorrentes diretos, nenhum produto com a mesma proposta foi encontrado no mercado. Os produtos que mais se aproximam da ideia da MusTEM foram softwares e dispositivos usados para o ensino de música em escolas. Se destacou, dentre eles, o “MuSS-Bits++”, dispositivo de substituição sensorial desenvolvido pelo *Augmented Human Lab*, da Universidade Nacional de Singapura, que converte ritmo em estímulos visuais e vibrotáteis. Entretanto, nas fontes que encontramos esse e outros produtos eram usados apenas em pesquisas acadêmicas, ainda não comercializadas.

Além do projeto mencionado, Benites (2020) cita projetos como “Cromo TMusic” - que traduz visualmente o som tocado por um instrumentista visando o aumento da percepção musical de crianças surdas e musicoterapia -, “Sencity” - uma experiência imersiva com música, uma pista de dança que vibra com o grave, projeções de imagens, luz de LED e aromas associados a música - e o “Vest” - colete capaz de captar sons e traduzir em vibrações com o objetivo de sentir a música na pele, mas também podendo ser usado para ensinar o cérebro a transformar vibrações em percepções de qualquer som -, que já é comercializado com uma faixa de preço entre 1000 e 2000 dólares. Esses projetos evidenciam o crescente interesse por tecnologias sensoriais aplicadas à música, ainda que não existam soluções consolidadas no mercado com o mesmo foco da MusTEM.

4 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

A metodologia deste projeto foi desenhada para garantir flexibilidade, precisão e replicabilidade no desenvolvimento do sistema de tradução sensorial. O processo foi estruturado em etapas modulares, permitindo validação incremental e ajustes baseados em feedback experimental e de usuários finais. As escolhas técnicas foram fundamentadas em literatura especializada e nas melhores práticas de design universal, visando máxima acessibilidade e eficiência.

4.2 Arquitetura geral do sistema

O sistema será dividido em três módulos funcionais interligados:

1. Módulo de Entrada Sonora
 - a. Captação dos sinais via sensores piezo e eletreto.
 - b. Módulo de Processamento
2. Módulo de Processamento:
 - a. Aplicação de análise espectral (FFT), cálculo de intensidade (RMS) e geração de vetores de características. Implementação em Python.
 - b. Utilização de sistemas embarcados, sendo Raspberry Pi ou Arduino UNO.
3. Módulo de Saída Sensorial
 - a. Conversão dos parâmetros sonoros para:
 - i. Cor (frequência dominante → LED RGB)
 - ii. Vibração (intensidade sonora → motor vibratório)
 - iii. Forma visual (exibição gráfica → display/matriz)

A arquitetura modular facilita testes independentes de cada componente e futura integração total, seguindo recomendações de desenvolvimento incremental [Norman, 2013].

4.3 Pipeline de processamento computacional

O pipeline de funcionamento do sistema está a ser desenvolvido com base em técnicas consolidadas de pré-processamento de sinais e estratégias computacionais de tradução sensorial. Ainda que o projeto tenha um viés artístico e emocional, sua fundação é científica:

cada som captado é decomposto, interpretado e traduzido por meio de parâmetros extraídos computacionalmente e convertidos em respostas visuais e táteis. A seguir, são descritas as etapas do processo, da captação ao estímulo. Esse pipeline é projetado não apenas para análises *offline*, mas com vistas à execução embarcada em tempo real no protótipo físico.

4.3.1 Princípios do pré-processamento do sinal

- **Aquisição do Som**

O som será captado por microfones eletreto e piezoelétrico. Estes sensores permitem captar sons ambientais com boa sensibilidade.

- **Amostragem**

O sinal analógico será convertido em digital com uma taxa de amostragem adequada (≥ 44100 Hz) para preservar os detalhes relevantes.

- **Filtragem Inicial**

Será realizada uma filtragem passa-baixa ou passa-banda para atenuar ruídos de alta frequência, especialmente importantes devido à sensibilidade dos microfones.

- **Segmentação**

O sinal é dividido em janelas temporais (ex: 25 ms com 10 ms de sobreposição), possibilitando a extração local de características.

- **Extração de Características do Sinal**

A extração de características do sinal é uma etapa fundamental no processamento de áudio digital, pois permite representar informações relevantes do som em formatos adequados para análise computacional e modelagem. No projeto, são utilizadas as seguintes técnicas clássicas e amplamente validadas na literatura:

○ **FFT (*Fast Fourier Transform*):**

A FFT é um algoritmo eficiente para calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT), permitindo decompor um sinal no domínio do tempo em suas componentes de frequência. Essa técnica é essencial para identificar as frequências dominantes presentes em um sinal sonoro, sendo amplamente empregada em análise espectral, reconhecimento de padrões e síntese de áudio (Oppenheim; Schaffer, 2010; Smith, 2007).

○ **MFCC (Coeficientes Cepstrais de Frequência Mel):**

Os MFCCs são extraídos a partir do espectro do sinal, aplicando

uma escala perceptual (escala Mel) que simula a sensibilidade do ouvido humano a diferentes frequências. Essa técnica é largamente utilizada em reconhecimento de fala e música, pois captura características perceptuais relevantes para a audição (Rabiner; Schafer, 2011; Logan, 2000).

- **Transformada Wavelet:**

A Transformada Wavelet permite analisar simultaneamente informações no tempo e na frequência, sendo especialmente útil para sinais não estacionários, como sons ambientais e música. Essa abordagem fornece uma representação multirresolução do sinal, facilitando a detecção de eventos transitórios e padrões locais (Mallat, 1999).

- **Takens Embedding:**

O método de Takens Embedding é utilizado para reconstruir o espaço de fases de sistemas dinâmicos a partir de séries temporais, permitindo a análise topológica das dinâmicas do sinal. Essa técnica é particularmente relevante para identificar padrões complexos e recorrências em sinais biológicos e ambientais (Takens, 1981; Abarbanel, 1996).

4.3.2 Pré-processamento e preparação dos dados

O pré-processamento e a preparação dos dados constituem uma etapa fundamental no pipeline computacional do sistema, sendo responsáveis por transformar as características extraídas dos sinais sonoros em representações numéricas adequadas para análise, modelagem e geração de estímulos sensoriais. Esta fase assegura que os dados estejam organizados, limpos, normalizados e prontos para alimentar os modelos computacionais com consistência e eficiência. Abaixo, detalham-se os principais procedimentos adotados:

- **Vetorização e Normalização:** Conversão dos parâmetros extraídos em vetores de características. Todos os vetores são normalizados (ex: z-score) para uniformidade entre as amostras.

- **Análise de Redundância e Compressão:** Utilização de PCA (Análise de Componentes Principais) para reduzir dimensionalidade e eliminar variáveis redundantes.
- **Padronização e Balanceamento:** Caso existam categorias ou parâmetros definidos, aplica-se técnicas de balanceamento (SMOTE, undersampling) para evitar viés.
- **Geração do Dataset:** Formação de datasets rotulados ou parametrizados conforme as características extraídas e os objetivos de mapeamento sensorial.

4.3.3 Modelagem computacional (Machine Learning)

A modelagem é responsável por definir como cada som se transforma em resposta sensorial. O sistema utilizará redes neurais clássicas para aprender ou definir regras de mapeamento entre as características do som e os estímulos sensoriais. As tarefas serão divididas em três submodelos especializados:

- **Modelo de Cor (MLP-Cor):**
 entrada = frequência dominante
 saída = RGB correspondente (inspirado em escalas cromáticas musicais).
- **Modelo de Vibração (MLP-Vibra):**
 entrada = volume médio (RMS) ou envoltória
 saída = intensidade da vibração (ex: *duty cycle* de um motor vibratório).
- **Modelo de Forma Visual (MLP-Forma):**
 entrada = espectros locais, wavelets ou embeddings
 saída = parâmetros para desenhos (ex: curvatura, simetria).

Cada modelo poderá ser **Treinado com base em estratégias não supervisionadas**, via agrupamento de padrões emergentes e projeção em espaços latentes (ex: t-SNE, SOM) ou **definido por regras heurísticas**, com associações matemáticas diretas entre parâmetros acústicos e estímulos sensoriais (ex: frequência → cor, volume → vibração). Essa abordagem permite adaptar o sistema ao contexto artístico sem depender de bases rotuladas a priori.

4.3.4 Fluxograma geral do sistema

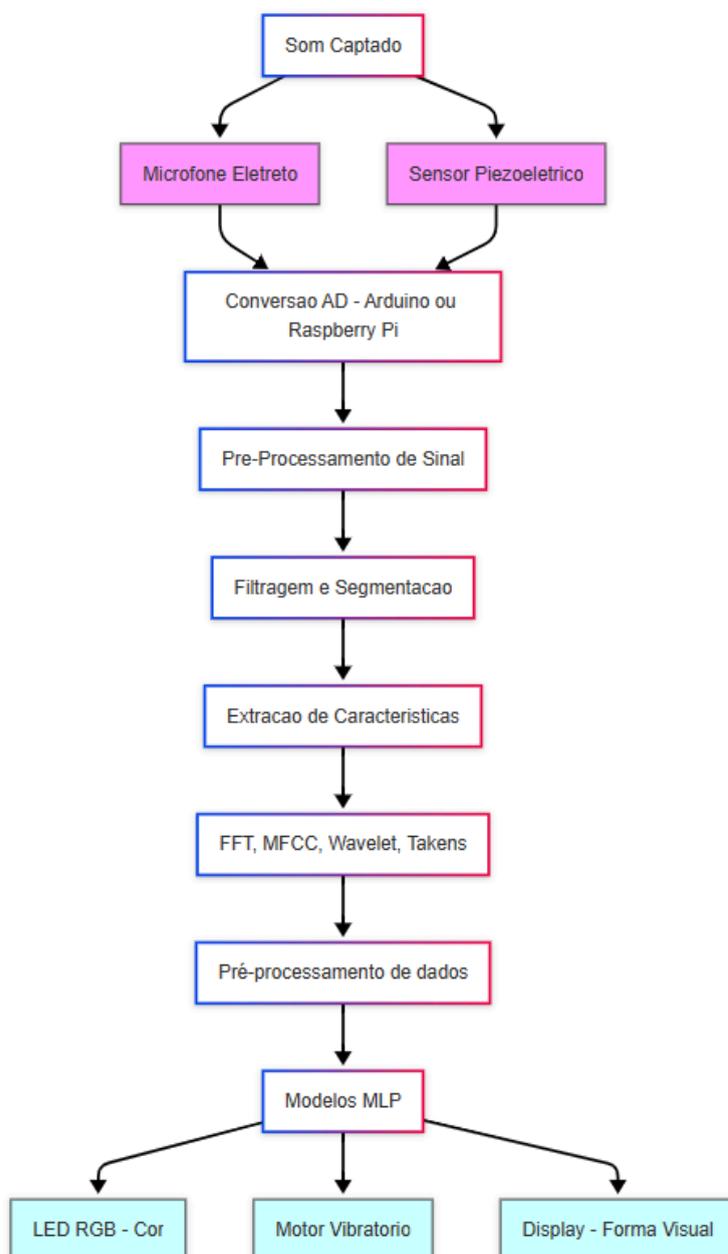
A Figura 2 apresenta uma visão esquemática do pipeline computacional do sistema MustEM, detalhando todas as etapas desde a captação do som até a geração das saídas

sensoriais. Esse fluxograma sintetiza a arquitetura modular proposta, destacando o fluxo de dados entre os sensores de entrada, os módulos de pré-processamento e extração de características, os modelos de machine learning e, por fim, os atuadores físicos responsáveis pela tradução sensorial.

O processo tem início com a captação simultânea de sons por microfone eletreto e sensor piezoelétrico, garantindo versatilidade na aquisição de diferentes tipos de sinais. Em seguida, os dados são submetidos a etapas de pré-processamento, segmentação e extração de características acústicas relevantes (FFT, MFCC, Wavelet, Takens Embedding).

Posteriormente, os vetores gerados são normalizados, analisados e comprimidos, culminando na alimentação de modelos MLP especializados. Cada modelo é responsável por mapear uma dimensão do som (frequência, volume, estrutura) para uma saída sensorial específica: cor, vibração ou forma visual. A separação modular facilita testes isolados, ajustes heurísticos e futuras expansões do sistema. Esse fluxograma serve, portanto, como guia técnico e conceitual do funcionamento interno do protótipo, além de reforçar a lógica sistemática adotada na construção do pipeline de tradução sensorial.

Figura 2 - Fluxograma geral do sistema



5. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Esta seção apresenta o escopo inicial de desenvolvimento do sistema MusTEM, com foco no planejamento da implementação física e lógica do protótipo. Embora ainda em fase de prototipagem computacional e simulações em Python, o projeto já possui uma arquitetura definida para integração futura de sensores, atuadores e unidades de processamento. As etapas descritas aqui refletem o que será implementado e testado nas próximas fases.

5.1 Especificações de hardware

A seleção dos componentes foi baseada em critérios de acessibilidade, compatibilidade com plataformas embarcadas e adequação às necessidades do sistema de tradução sensorial. Os principais itens previstos são:

- Sensores de Entrada:
 - Sensor piezoelétrico, para captação de vibrações por contato (sons corporais, objetos), escolhido por sua sensibilidade e baixo custo (SMITH et al., 2019).
 - Microfone eletreto com amplificador (MAX9814), para captação de sons ambientais (voz, música), devido à alta relação sinal-ruído.
- Unidade de Processamento:
 - Arduino Uno ou Raspberry Pi Zero/4, responsável pelo processamento em tempo real, controle de periféricos e execução do pipeline de conversão. O Arduino é suficiente para prototipagem inicial, mas o Raspberry Pi pode ser necessário para processamento mais intensivo.
- Saídas Sensoriais:
 - Faixa de LEDs RGB WS2812 (NeoPixel), para tradução de frequência em cor, escolhida pela facilidade de controle e intensidade luminosa.
 - Motor vibratório (coin-type), para representação da intensidade do som por meio de vibração tátil.
 - Display OLED 128x64 (I2C) ou matriz de LEDs, para exibição visual de padrões ou formas derivadas do som.
- Outros componentes
 - Protoboard, jumpers, resistores, fonte 5V, caixa de acrílico/MDF para montagem física.

Limitação: O Arduino Uno pode apresentar restrições de processamento para aplicações mais complexas, sendo recomendada a migração para Raspberry Pi em versões futuras.

Quadro 1 - Componentes Eletrônicos

Componente	Função	Justificativa Técnica
------------	--------	-----------------------

Sensor piezoelétrico	Captação de vibrações por contato	Alta sensibilidade a variações físicas internas
Microfone eletreto (MAX9814)	Captação de som ambiente	Baixo ruído e excelente resposta dinâmica
Arduino Uno ou Raspberry Pi	Processamento embarcado em tempo real	Popularidade, flexibilidade e compatibilidade com periféricos
LEDs RGB WS2812 (NeoPixel)	Representação de frequência por cores	Controláveis individualmente, permitem paleta contínua
Motor vibratório (coin-type)	Representação de intensidade sonora	Feedback tátil responsivo
Display OLED ou matriz de LEDs	Representação visual	Exibição de padrões derivados de sons
Protoboard, jumpers, etc.	Montagem física do protótipo	Facilita prototipagem e modificações

5.2 Especificações de software

Para a implementação das etapas computacionais do pipeline, são consideradas as seguintes bibliotecas e ferramentas:

- Python 3.10+: linguagem principal para o desenvolvimento dos algoritmos, reconhecida por sua sintaxe acessível e vasta comunidade de suporte (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024);
- Librosa: extração de características de sinais sonoros (FFT, MFCC, envelope, etc.), amplamente utilizada em pesquisa de áudio digital (MCFEE et al., 2015);
- NumPy / SciPy: operações matemáticas e manipulação de arrays, essenciais para processamento eficiente de dados científicos (HARRIS et al., 2020; VIRTANEN et al., 2020);
- Scikit-learn: pré-processamento (PCA, normalização), modelagem com MLP e avaliação de performance, referência em machine learning em Python (PEDREGOSA et al., 2011);

- Matplotlib / Seaborn: visualização de espectros e formas, facilitando a análise gráfica dos resultados (HUNTER, 2007; WASKOM, 2023);
- PySerial: comunicação entre microcontrolador (Arduino) e o ambiente Python, permitindo integração eficiente de hardware e software (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024);

Essas ferramentas foram escolhidas por sua ampla documentação, suporte à prototipagem e compatibilidade com projetos embarcados e de ciência aplicada.

5.3 Mapeamento som → estímulos sensoriais

(código efetivo de tradução)

Esta subseção será dedicada à implementação prática do código responsável pela conversão dos parâmetros sonoros extraídos em estímulos sensoriais. Trata-se do componente central de tradução, no qual as saídas do pipeline de processamento (como frequência dominante, intensidade RMS, espectros ou embeddings) serão mapeadas para cor, vibração ou forma visual.

Embora o código definitivo ainda esteja em desenvolvimento, sua lógica será baseada nos modelos conceituais definidos na Seção 4.3.3 (Modelagem Computacional), utilizando redes MLP ou regras heurísticas simples. A versão final do relatório apresentará os scripts completos, trechos comentados e exemplos de entradas e saídas para cada tipo de estímulo gerado.

5.4 Montagem e integração dos módulos

(prototipagem e testes físicos)

Esta seção descreve a montagem física do protótipo, detalhando o processo de conexão entre sensores, unidades de processamento e atuadores. Também será apresentada a lógica de integração entre hardware e software, incluindo o fluxo de dados entre os blocos funcionais do sistema.

Até o momento, a montagem encontra-se em fase de planejamento e testes preliminares de compatibilidade. A versão final do relatório trará diagramas de ligação

(esquemáticos), fotos do protótipo, e a descrição dos testes realizados para validar a comunicação entre os módulos embarcados e o ambiente Python.

5.5 Estratégia de prototipagem e testes

A etapa de prototipagem será conduzida em fases incrementais, visando a validação gradual do pipeline de tradução sensorial. A proposta segue um modelo de desenvolvimento iterativo, onde cada subsistema (aquisição, processamento, estímulo) será testado isoladamente antes da integração total. As etapas são:

5.5.1 FASE 1 – Validação computacional do pipeline

- Implementação em ambiente de simulação (Python/Colab/Jupyter) das etapas de pré-processamento, extração de características e geração de estímulos simulados.
- Uso de arquivos `.wav` com diferentes tipos de sons (musicais e ambientais) para verificar a solidez do pipeline.
- Geração de respostas visuais e táteis simuladas (ex: gráficos de cores, intensidade vibratória em valores numéricos, formas).
- Avaliação qualitativa dos mapeamentos: correspondência entre o som e a percepção gerada.

5.5.2 FASE 2 – Prototipagem física inicial

- Montagem de um circuito básico contendo microfone eletreto, microcontrolador (ex: Arduino ou ESP32), e atuadores simples (LED RGB, motor vibratório, matriz de LEDs).
- Testes com sons em tempo real para verificar se o sinal captado é suficientemente limpo e responsivo para os módulos de entrada.
- Envio do sinal bruto ou parcialmente processado ao computador para teste das etapas posteriores.

5.5.3 FASE 3 – Integração parcial e testes sensoriais

- Integração das saídas dos modelos de ML com os atuadores físicos.

- Mapeamento em tempo real das frequências dominantes em cores, intensidades de vibração e formas.
- Avaliação com usuários (fase exploratória) para observar a coerência sensorial percebida.

5.5.4 FASE 4 – Ajustes heurísticos e expansão modular

- Ajustes finos nos parâmetros de sensibilidade (janela, limiares, filtros).
- Reconfiguração do mapeamento entre som e estímulo com base em feedback.

Crterios de avaliao: Latência do sistema (captação → resposta), precisão do mapeamento (ex: frequência sonora x cor percebida), usabilidade (questionário Likert com usuários).

6. FUNCIONAMENTO DO PRODUTO

Esta seção descreve, de forma preliminar, como o sistema MustEM se comporta na prática, desde a entrada do sinal sonoro até a resposta sensorial final. Embora a implementação física ainda esteja em construção, já é possível delinear o fluxo de funcionamento com base na arquitetura proposta.

6.1 Fluxo de entrada e saída

(o que entra como som, o que sai como estímulo)

O sistema operará com base em um fluxo contínuo de entrada sonora e resposta sensorial. O som será captado por sensores (microfone eletreto ou piezoelétrico) e convertido em sinal digital via Arduino ou Raspberry Pi. Esse sinal passará por etapas de pré-processamento, segmentação e extração de características.

As saídas previstas incluem:

- Cor (via LED RGB), definida pela frequência dominante do som;
- Vibração (motor *coin-type*), mapeada pela intensidade sonora (RMS ou envelope);
- Forma visual (display OLED ou matriz de LEDs), derivada de padrões espectrais ou embeddings

Esse fluxo será ajustado e validado nas fases de teste, conforme detalhado na seção 5.5.

6.2 Exemplo de uso

(caso prático, simulação ou cenário)

Na versão final deste relatório, serão incluídos exemplos reais de uso e interação com o sistema, como:

- **Cenário 1:** Tradução sensorial de música ambiente em tempo real durante uma sessão terapêutica;
- **Cenário 2:** Captação de batimentos cardíacos com sensor piezoelétrico e representação vibratória;
- **Cenário 3:** Experiência multissensorial para pessoas com deficiência auditiva, integrando cor e forma a partir de sons cotidianos.

No momento, esses cenários estão sendo simulados em ambiente computacional (Python) com arquivos `.wav` e visualizações em gráficos. A implementação embarcada será documentada na versão definitiva com fotos, vídeos e métricas de usabilidade.

7. PLANO DE MARKETING E INSERÇÃO NO MERCADO

A estratégia de inserção do sistema MusTEM no mercado visa combinar impacto social, acessibilidade e inovação tecnológica. As ações foram estruturadas para promover tanto a validação com usuários reais quanto o engajamento de instituições, com potencial de escalabilidade e sustentabilidade a longo prazo.

Inicialmente, serão realizados testes com pessoas portadoras de deficiência auditiva e instituições especializadas em inclusão e reabilitação auditiva. O objetivo é avaliar a usabilidade, o impacto social e a receptividade do dispositivo, gerando dados reais para iteração do design.

Para construção de uma base de usuários engajados, prevê-se a distribuição gratuita ou subsidiada de unidades para escolas públicas, ONGs e centros de reabilitação auditiva, assim promovendo a integração social do produto e gerando autoridade.

Para financiar o projeto planeja-se lançar uma campanha de financiamento coletivo (*crowdfunding*) que terá, também, o intuito de validar o interesse do público. As recompensas

aos apoiadores da campanha terão foco no propósito social do projeto com transparência no uso das verbas arrecadadas. Além disso, a busca por investimento com empresários, marcas e instituições parceiras que queiram se envolver em projetos inovadores, seja colaborando financeiramente ou parcerias de fornecimento de materiais, é uma estratégia que pode viabilizar o aprimoramento e ampliação da MusTEM e seu impacto social.

O projeto também buscará apoio de órgãos públicos e instituições de ensino para integrar o MusTEM em programas de inclusão, tecnologia assistiva e inovação educacional. Editais e políticas públicas serão monitorados como fontes potenciais de fomento.

A participação em feiras, mostras universitárias e eventos de inovação e inclusão, também é prevista com o objetivo de apresentar o protótipo, visando ampliar a visibilidade e coletar feedbacks de potenciais usuários e uma oportunidade de alcançar parceiros.

Para atingir os clientes, a presença nas redes sociais é uma estratégia essencial. Uma conta institucional com conteúdos informativos sobre a funcionalidade, o acesso e a missão da MusTEM é imprescindível. Além disso, estratégias de marketing digital, como tráfego pago, podem ajudar a alcançar o público-alvo de forma mais eficiente, assim como parcerias com criadores de conteúdo e marcas que trabalhem com o mesmo público.

Utilizando o modelo AIDA (Atenção, Interesse, Desejo, Ação) destacamos a apresentação do produto através de anúncios chamativos nas redes sociais e outras plataformas digitais, destacando os diferenciais do mesmo e levando o potencial consumidor a página oficial da MusTEM. Essa oferecerá informações mais detalhadas sobre a experiência única oferecida pelo produto e com depoimentos e demonstrações alcançará o desejo do cliente. O acesso ao e-commerce da MusTEM, facilmente acessado pela página de divulgação, fechará o ciclo com a ação da compra.

7.1 Estratégia de divulgação

A comunicação do MusTEM será pautada por um viés sensível, educativo e humano, destacando a transformação que a tecnologia pode trazer para pessoas com deficiência auditiva.

- Programa Embaixador MusTEM

Envolvimento de usuários reais como representantes da marca, promovendo

divulgação orgânica, com foco em empatia e autenticidade.

- Conteúdo para mídias sociais

Criação de vídeos explicativos, infográficos acessíveis e materiais educativos que demonstrem de forma clara como ocorre a tradução sensorial do som em estímulos visuais e táteis.

- Storytelling e impacto social

Elaboração de campanhas baseadas em histórias reais, destacando o efeito positivo do dispositivo na vida de pessoas com deficiência auditiva, com ênfase no valor emocional, social e educacional da tecnologia.

7.2 Faixa de preço estimado

O preço atribuído ao produto da MusTEM, considerando a estimativa de custo de produção adicionada a mão de obra, ficaria em uma faixa de R\$770 a R\$1000. Essa faixa ainda não considera, no entanto, custos adicionais como embalagem, transporte, impostos, manutenção e comissões, porque estimar custos como esses exige uma pesquisa de mercado e distribuição maior do que o possível no presente momento.

Levando em conta o valor associado ao produto, sendo um item diferenciado no mercado e com potencial de atingir socialmente parte da população com uma experiência sensorial única e criativa, uma nova pesquisa também pode ser feita a respeito da valoração do mesmo pelos potenciais consumidores. Idealmente, essa pesquisa seria realizada após a apresentação do protótipo, de modo a captar impressões mais realistas sobre seu uso e benefícios.

7.3 Canais de distribuição

A distribuição do MusTEM poderá ser orientada por uma estratégia multicanal, que visa atingir públicos diversos por meio de parcerias institucionais, plataformas digitais e inserção em ambientes educacionais e assistivos. Os principais canais previstos podem incluir:

- Escolas e instituições de ensino inclusivo: distribuição de unidades para instituições públicas e privadas com projetos de acessibilidade, por meio de programas educacionais voltados à inclusão de alunos com deficiência auditiva.
- Centros de reabilitação auditiva e ONGs: parcerias com centros terapêuticos, clínicas de reabilitação e organizações do terceiro setor permitirão que o MusTEM seja utilizado em ambientes clínicos e sociais, com foco em experimentação e adaptação sensorial.
- Plataformas de financiamento coletivo: durante a fase inicial, campanhas em sites como Catarse e Benfeitoria poderão incluir recompensas que envolvam o envio de unidades do produto diretamente para apoiadores, instituições parceiras ou usuários voluntários.
- Eventos, mostras e feiras de tecnologia assistiva: O produto poderá ser distribuído ou licenciado diretamente em eventos como Reatech (Feira Internacional de Inclusão, Acessibilidade e Reabilitação - organizada e promovida pela Fiera Milano Brasil), Campus Party (festival de tecnologia, empreendedorismo, ciência e disruptividade que acontece ao redor do mundo) e mostras universitárias, gerando visibilidade e parcerias estratégicas.
- Plataformas online e e-commerce acessível: Após validação técnica e social, prevê-se a disponibilização do MusTEM em plataformas digitais com foco em acessibilidade e impacto social, como lojas virtuais especializadas em dispositivos assistivos.

Essa estratégia híbrida visa garantir capilaridade, impacto e coerência com os valores do projeto, promovendo não apenas a venda do produto, mas principalmente sua adoção em contextos transformadores.

8. RISCOS, LIMITAÇÕES E POTENCIAIS MELHORIAS

A implementação de tecnologias sensoriais alternativas como o MusTEM traz benefícios inovadores, mas também exige atenção a riscos técnicos, limitações práticas e oportunidades de aprimoramento contínuo. Dentre os potenciais riscos técnicos se destacam:

- Latência na resposta sensorial: atrasos na conversão do som em estímulos visuais ou táteis podem comprometer a sincronia com a música, especialmente em contextos interativos ou performáticos.

- Conforto e usabilidade do dispositivo: caso o design físico seja intrusivo, pesado ou de difícil adaptação, pode haver rejeição por parte dos usuários. A ergonomia e a portabilidade são pontos de atenção críticos na fase de prototipagem.
- Percepção subjetiva do valor sensorial: algumas pessoas podem não reconhecer a equivalência entre a experiência sensorial alternativa (visual/tátil) e a audição convencional, o que pode gerar resistência ou críticas à proposta do sistema.

Como potenciais melhorias futuras menciona-se a resolução de problemas técnicos que podem ocorrer como os mencionados, e outras a partir de estratégias como:

- Otimização de tempo de resposta: a implementação de algoritmos mais eficientes e uso de microcontroladores com maior poder de processamento pode reduzir significativamente a latência do sistema.
- Personalização de estímulos: a ampliação da experiência e do controle dos usuários a partir de possibilidades de ajuste de cores, intensidades e formas de resposta conforme preferências individuais, potencialmente aumentará o engajamento e a satisfação dos clientes.
- Avaliação contínua com usuários reais: o uso de feedback sistemático (questionários, entrevistas e testes de usabilidade) permitirá identificar pontos de atrito e promover ajustes iterativos orientados por dados.

CONCLUSÃO

Esta primeira versão do relatório do projeto MusTEM apresenta os fundamentos conceituais, técnicos e metodológicos para o desenvolvimento de um sistema de tradução sensorial voltado para pessoas com deficiência auditiva. Mesmo em fase inicial, o projeto já demonstra viabilidade técnica e relevância social, articulando tecnologias de processamento de sinais, machine learning e dispositivos sensoriais acessíveis.

As etapas desenvolvidas até o momento incluem a definição do pipeline computacional, a seleção criteriosa dos componentes de hardware e software, bem como o planejamento detalhado da estratégia de prototipagem e testes. A proposta metodológica modular permite uma construção progressiva, garantindo flexibilidade para adaptações futuras e possíveis extensões do escopo, como aplicações educacionais, artísticas ou terapêuticas.

O foco agora se volta para a implementação prática dos módulos descritos, com início da prototipagem física, testes em tempo real e integração dos modelos computacionais com os atuadores sensoriais. Espera-se que, nas próximas etapas, seja possível validar empiricamente os benefícios do sistema junto ao público-alvo e explorar novas possibilidades de inclusão e expressão sensorial através da tecnologia assistiva. A versão final deste relatório trará os resultados práticos, refinamentos no sistema e os aprendizados obtidos ao longo do processo de desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Saúde auditiva – OPAS/OMS**. [S. l.]: PAHO, [s. d.]. Disponível em: <<https://www.paho.org/pt/topicos/saude-auditiva>>. Acesso em: 4 maio 2025.
- OLIVEIRA, Tiago de. **Ensino de música para surdos: a prática educativa desenvolvida na ONG Instituto Inclusivo Sons do Silêncio**. 190 f. Dissertação (Mestrado em Música) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/19043/1/TiagoDeOliveiraNascimentoDissert.pdf>>. Acesso em: 7 maio 2025.
- World Health Organization (WHO). **World report on hearing**. 2021. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-hearing>>. Acesso em: 05 de Maio, 2025
- VALDEZ, P.; MEHRABIAN, A. **Effects of color on emotions**. *Journal of Experimental Psychology: General*, v. 123, n. 4, p. 394–409, 1994.
- NORMAN, D. A. (2013). **The Design of Everyday Things**. Basic Books.
- SMITH, J. O., et al. **Microphone Arrays and Signal Processing**. Springer, 2019.
- ABARBANEL, H. D. I. **Analysis of Observed Chaotic Data**. New York: Springer, 1996.
- LOGAN, B. **Mel Frequency Cepstral Coefficients for Music Modeling**. In: International Symposium on Music Information Retrieval (ISMIR), 2000.
- MALLAT, S. **A Wavelet Tour of Signal Processing**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1999.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.
- RABINER, L. R.; SCHAFER, R. W. **Theory and Applications of Digital Speech Processing**. Upper Saddle River: Pearson, 2011.
- SMITH, J. O. **Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT): with Audio Applications**. 2. ed. W3K Publishing, 2007.
- TAKENS, F. **Detecting strange attractors in turbulence**. In: DYNAMICAL SYSTEMS AND TURBULENCE, Warwick 1980. Lecture Notes in Mathematics, v. 898. Berlin: Springer, 1981. p. 366–381.
- HARRIS, C. R. et al. **Array programming with NumPy**. *Nature*, v. 585, p. 357–362, 2020.
- HUNTER, J. D. **Matplotlib: A 2D graphics environment**. *Computing in Science & Engineering*, v. 9, n. 3, p. 90-95, 2007.

KLUYVER, T. et al. **Jupyter Notebooks – a publishing format for reproducible computational workflows**. In: Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas. IOS Press, p. 87–90, 2016.

MCFEE, B. et al. **librosa: Audio and music signal analysis in python**. Proceedings of the 14th Python in Science Conference, p. 18-25, 2015.

PEDREGOSA, F. et al. **Scikit-learn: Machine Learning in Python**. Journal of Machine Learning Research, v. 12, p. 2825-2830, 2011.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Reference**, version 3.10. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 05 maio 2025.

VIRTANEN, P. et al. **SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python**. Nature Methods, v. 17, p. 261–272, 2020.

WASKOM, M. L. **Seaborn: statistical data visualization**. Journal of Open Source Software, v. 6, n. 60, p. 3021, 2021.

MuSS-Bits – Augmented Human Lab. Disponível em: <<https://ahlab.org/project/muss-bits/>>. Acesso em: 6 maio. 2025.

PETRY, B. et al. **Supporting Rhythm Activities of Deaf Children using Music-Sensory-Substitution Systems**. 21 abr. 2018.

BENITES, Cristiano da Silva. **Ensino de música para crianças surdas utilizando tecnologia assistiva e robótica**. 2020. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

SEBRAE. **4 Ps do marketing: entenda o que são e qual a sua importância**. 2024. <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/pe/artigos/4-ps-do-marketing-entenda-o-que-sao-e-qual-a-sua-importancia,3869c47a332ae710VgnVCM100000d701210aRCRD#:~:text=Tamb%C3%A9m%20chamado%20composto%20de%20marketing,%2C%20pra%C3%A7a%2C%20produto%20e%20promo%C3%A7%C3%A3o>> Acesso em: 07/05/2025.