

Harmonia Acessível: Aprimorando o Ensino Musical para Crianças Surdas com Inteligência Artificial

Title: *Accessible Harmony: Enhancing Music Education for Deaf Children with Artificial Intelligence*

Titulo: *Armonía Accesible: Mejorando la Enseñanza Musical para Niños Sordos con Inteligencia Artificial*

Cristiano da Silva Benites
Instituto de Tecnologia e Liderança /
Universidade Presbiteriana Mackenzie
ORCID: [0000-0002-1300-7944](https://orcid.org/0000-0002-1300-7944)
benites_silva@hotmail.com

Ismar Frango Silveira
Universidade Presbiteriana Mackenzie
ORCID: [0001-8029-072X](https://orcid.org/0001-8029-072X)
ismarfrango@gmail.com

Resumo

Este estudo explora o uso da inteligência artificial para promover a inclusão digital no ensino musical de crianças surdas. Desenvolvemos um sistema inovador que integra feedback tátil e visual, além de interações com robôs educacionais, criando um ambiente de aprendizado inclusivo. A inteligência artificial monitora em tempo real o desempenho e as respostas emocionais das crianças, ajustando dinamicamente a dificuldade das atividades para personalizar a experiência de aprendizado. Utilizamos uma metodologia experimental com sete crianças surdas, comparando o impacto do sistema com métodos tradicionais. Foram aplicados métodos quantitativos e qualitativos para avaliar a precisão dos gestos, o engajamento e os efeitos emocionais e sociais. Os resultados indicaram que o sistema baseado em inteligência artificial aumentou a precisão dos gestos musicais em 30% e elevou o engajamento e a motivação em 40% em relação aos métodos convencionais. Análises longitudinais demonstraram que o aprendizado multissensorial favorece a retenção do conhecimento musical mesmo após longos intervalos, reforçando a eficácia do sistema. Esses achados destacam o potencial da inteligência artificial na educação musical inclusiva, ampliando as oportunidades de aprendizado para crianças surdas. O projeto sugere caminhos promissores para futuras pesquisas e inovações em tecnologia assistiva, contribuindo para um ambiente educacional mais equitativo e acessível.

Palavras-Chave: Educação musical de surdos, Tecnologia assistiva, Inteligência artificial na música, Inclusão social

Abstract

This study explores the use of artificial intelligence to promote digital inclusion in the musical education of deaf children. We developed an innovative system that integrates tactile and visual feedback, along with interactions with educational robots, creating an inclusive learning environment. Artificial intelligence monitors children's performance and emotional responses in real time, dynamically adjusting activity difficulty to personalize the learning experience. We applied an experimental methodology with seven deaf children, comparing the system's impact with traditional teaching methods. Quantitative and qualitative methods were used to assess gesture accuracy, engagement levels, and emotional and social effects. The results indicated that the AI-based system improved gesture accuracy by 30% and increased engagement and motivation by 40% compared to conventional methods. Longitudinal analyses demonstrated that multisensory learning enhances musical knowledge retention even after long intervals, reinforcing the system's effectiveness. These findings highlight the transformative potential of artificial intelligence in inclusive musical education, expanding learning opportunities for deaf children. The project suggests promising directions for future research and innovations in assistive technology, contributing to a more equitable and accessible educational environment.

Keywords: Deaf music education, Assistive technology, Artificial intelligence in music, Social inclusion

Resumen

Este estudio explora el uso de la inteligencia artificial para promover la inclusión digital en la enseñanza musical de niños sordos. Desarrollamos un sistema innovador que integra retroalimentación táctil y visual, junto con interacciones con robots educativos, creando un entorno de aprendizaje inclusivo. La inteligencia artificial monitorea en tiempo real el desempeño y las respuestas emocionales de los niños, ajustando dinámicamente la dificultad de las actividades para personalizar la experiencia de aprendizaje. Aplicamos una metodología experimental con siete niños sordos, comparando el impacto del sistema con métodos de enseñanza tradicionales. Se utilizaron métodos cuantitativos y cualitativos para evaluar la precisión de los gestos, el nivel de compromiso y los efectos emocionales y sociales. Los resultados indicaron que el sistema basado en inteligencia artificial mejoró la precisión de los gestos musicales en un 30% y aumentó el compromiso y la motivación en un 40% en comparación con los métodos convencionales. Los análisis longitudinales demostraron que el aprendizaje multisensorial favorece la retención del conocimiento musical incluso después de largos intervalos, reforzando la efectividad del sistema. Estos hallazgos destacan el potencial transformador de la inteligencia artificial en la educación musical inclusiva, ampliando las oportunidades de aprendizaje para niños sordos. El proyecto sugiere caminos prometedores para futuras investigaciones e innovaciones en tecnología asistiva, contribuyendo a un entorno educativo más equitativo y accesible.

Palabras clave: Educación musical para sordos, Tecnología asistiva, Inteligencia artificial en la música, Inclusión social

1 Introdução

A inclusão educacional de crianças com deficiência auditiva no ensino musical representa um dos maiores desafios contemporâneos na promoção de uma educação verdadeiramente equitativa. Em uma sociedade cada vez mais conectada e mediada por tecnologias digitais, torna-se imperativo desenvolver estratégias pedagógicas que transcendam as limitações sensoriais, especialmente em áreas historicamente excluídas, como a educação musical. Tradicionalmente estruturada em torno da escuta, essa disciplina impõe barreiras significativas à participação plena de crianças surdas, limitando seu acesso aos benefícios cognitivos, sociais e emocionais que a música proporciona.

Diversos estudos têm demonstrado que pessoas com deficiência auditiva podem experenciar a música por meio de vias não auditivas, como estímulos tátteis e visuais. A neurociência musical contemporânea revela que regiões do cérebro associadas à audição podem ser ativadas por vibrações e padrões visuais coerentes, permitindo uma vivência musical significativa para indivíduos surdos. No entanto, tais descobertas ainda encontram pouca aplicação em contextos pedagógicos formais, evidenciando a necessidade de soluções educacionais inovadoras que integrem esses avanços científicos.

Nesse cenário, a inteligência artificial (IA) e as tecnologias assistivas emergem como ferramentas promissoras para promover uma aprendizagem musical multissensorial. A possibilidade de adaptar conteúdos em tempo real, a partir da análise do comportamento e das respostas emocionais dos alunos, abre novos horizontes para a personalização do ensino e a inclusão digital. No entanto, a literatura científica ainda carece de investigações que articulem, de forma sistemática, a aplicação de modelos preditivos com estímulos sensoriais em ambientes educacionais voltados ao público surdo.

Questão de pesquisa: Como tecnologias assistivas baseadas em inteligência artificial podem favorecer o processo de ensino e aprendizagem musical para crianças surdas, promovendo engajamento, retenção do conhecimento e inclusão digital?

Objetivo geral: Desenvolver, implementar e avaliar um sistema educacional multissensorial baseado em inteligência artificial e tecnologias assistivas, voltado ao ensino musical de crianças surdas.

Objetivos específicos:

1. Identificar os principais desafios na aprendizagem musical de crianças com deficiência auditiva.
2. Integrar recursos de Inteligência Artificial, feedback tático e estímulos visuais em um sistema responsivo e adaptativo.
3. Avaliar o impacto da solução proposta na precisão gestual, engajamento emocional e retenção do conhecimento musical.
4. Comparar os resultados obtidos com métodos tradicionais de ensino musical, evidenciando os ganhos e limitações da abordagem multissensorial.

Justificativa: Esta pesquisa responde à urgência de ampliar o acesso de crianças com deficiência auditiva a experiências musicais significativas, utilizando recursos tecnológicos que respeitem suas especificidades sensoriais. A proposta se ancora em uma perspectiva inclusiva e inovadora, buscando não apenas adaptar o ensino existente, mas ressignificá-lo por meio da integração entre engenharia de software, ciência de dados e pedagogia musical. Ao propor uma solução baseada em Inteligência Artificial e tecnologias assistivas, o estudo contribui para o avanço do estado da arte em educação inclusiva, além de oferecer subsídios concretos para práticas educacionais mais equitativas e eficazes.

Além disso, ao avaliar empiricamente os efeitos da solução proposta, esta pesquisa busca preencher lacunas teóricas e metodológicas na literatura, fornecendo dados sobre o impacto de abordagens multissensoriais e adaptativas na aprendizagem de crianças surdas. Acredita-se que os resultados aqui obtidos poderão subsidiar políticas públicas, práticas pedagógicas e novas linhas de investigação em educação musical inclusiva, com foco na promoção da cidadania digital e da equidade no acesso ao conhecimento artístico e cultural.

2 Referencial teórico

Esta seção aprofunda os conceitos centrais que embasam a proposta de um sistema de ensino musical multissensorial assistido por inteligência artificial, voltado à inclusão de crianças surdas. A seguir, são apresentados os principais referenciais teóricos, organizados em cinco eixos temáticos: (i) tecnologia assistiva e inclusão digital; (ii) estímulos sensoriais na aprendizagem musical; (iii) fundamentos de psicologia das cores aplicados à educação; (iv) inteligência artificial e aprendizado por transferência; (v) robótica educacional e uso do robô educacional mBot; e (vi) análise de sentimentos e usabilidade. O aprofundamento dessas temáticas é essencial para a construção de um arcabouço teórico sólido, em consonância com o rigor metodológico exigido.

2.1 Tecnologia Assistiva e Inclusão Digital na Educação Musical

Tecnologias assistivas são definidas por Cook e Polgar (2015) como recursos e serviços que aumentam, mantêm ou melhoram as capacidades funcionais de pessoas com deficiência. No campo educacional, sua aplicação está diretamente ligada à promoção da equidade e ao rompimento de barreiras ao aprendizado. Conforme Costa e Oliveira (2020), sua eficácia depende não apenas da adequação técnica, mas da incorporação a uma proposta pedagógica inclusiva.

No ensino musical, tecnologia assistiva pode incluir desde softwares de visualização sonora até dispositivos vibratórios e interfaces tátteis. Em contextos de deficiência auditiva, tais tecnologias são fundamentais para permitir que a música seja experienciada de forma sensorial alternativa. Mendes e Souza (2019) ressaltam que tais recursos não devem ser vistos como substitutivos da audição, mas como mediadores da experiência musical em outras modalidades perceptivas. Neste trabalho, o uso de pulseiras vibratórias, displays visuais com padrões rítmicos e robôs com feedback físico configuraram um ecossistema de tecnologia assistiva multissensorial.

2.2 Estímulos Tátteis e Visuais no Processo de Aprendizagem Musical

A aprendizagem musical pode se desenvolver a partir de diferentes canais sensoriais. Estudos em neurociência cognitiva, como os de Shibata (2001), demonstram que pessoas surdas ativam o córtex auditivo secundário ao receber estímulos vibratórios, indicando plasticidade neural para a experiência musical. Muska (2014) complementa essa perspectiva ao evidenciar que a percepção vibracional é mapeada cerebralmente de modo similar à percepção sonora, legitimando a equivalência funcional entre tato e audição na vivência musical.

Shibata (2001) realizou um estudo com 10 voluntários surdos e 11 ouvintes, utilizando ressonância magnética funcional (fMRI), para analisar a atividade cerebral. Os resultados indicaram que ambos os grupos apresentaram ativação nas áreas responsáveis pelo processamento vibracional. Além disso, os participantes surdos demonstraram atividade no córtex auditivo, sugerindo que o cérebro pode adaptar-se para interpretar a música através do tato.

Essa pesquisa reforça a existência do chamado “cérebro musical”, conceito que descreve como diferentes regiões cerebrais colaboram para interpretar e apreciar a música por meio de estímulos vibracionais. Essa compreensão é essencial para o desenvolvimento de tecnologias que tornem a experiência musical mais acessível às pessoas surdas.

O autor Muska (2014) complementa essa análise com uma ilustração detalhada sobre as áreas cerebrais ativadas durante a percepção vibracional da música. A Figura 1 – Cérebro Musical apresenta essas regiões, demonstrando como o cérebro das pessoas surdas responde aos estímulos vibratórios e como essa percepção pode ser ampliada por meio de tecnologias assistivas.



Figura 1. Cérebro Musical. Fonte: Muska (2014)

Com base nessas descobertas, avanços tecnológicos vêm ampliando as formas de percepção musical para pessoas surdas. Dispositivos vibratórios, plataformas ressonantes e softwares que convertem sons em estímulos visuais e táteis são algumas das soluções utilizadas para promover acessibilidade na música.

Essas tecnologias têm sido aplicadas em contextos educacionais, permitindo que crianças surdas aprendam música por meio da vibração e da associação entre notas musicais, cores e padrões rítmicos. Além disso, em eventos musicais, plataformas vibratórias e fones de condução óssea permitem que pessoas surdas sintam os ritmos e vibrações, proporcionando uma experiência musical mais inclusiva.

Ao explorar essas soluções, reafirmamos que a música é uma linguagem universal, acessível a todos, independentemente de suas capacidades auditivas. A integração de tecnologia e acessibilidade fortalece a equidade cultural e social, garantindo que a música possa ser vivenciada plenamente por qualquer indivíduo.

O uso de displays visuais na associação de sons a formas e cores é reforçado por estudos em psicologia educacional. Goldstein (2010) argumenta que a codificação visual de informações musicais favorece a memorização por meio de estímulos visuais padronizados. Essa abordagem é potencializada quando se aplica a psicologia das cores: determinadas cores evocam reações emocionais previsíveis — o vermelho, por exemplo, é associado a sons fortes ou vibrantes; o azul, a sons suaves ou graves. Essas relações são utilizadas no sistema proposto para facilitar a distinção de notas musicais por crianças surdas.

2.3 Psicologia das Cores e Sinestesia Artificial Aplicada à Música

A sinestesia artificial é o processo de simular, via tecnologia, experiências sensoriais integradas que tradicionalmente ocorreriam de forma cruzada em indivíduos sinestésicos. No ensino musical para surdos, trata-se de associar cada nota a uma cor específica com base em evidências empíricas sobre memória visual e emoção. Segundo Goldstein (2010), a codificação multimodal contribui para a retenção do conteúdo e o engajamento emocional dos alunos.

A proposta deste estudo adota um mapeamento cromático inspirado em estudos como os de Goldstein (2010), que investigaram a correspondência entre notas musicais e cores com base em padrões emocionais. Esse mapeamento foi utilizado para compor os estímulos visuais projetados em tela e nos displays durante as sessões com as crianças.

2.4 Inteligência Artificial e Aprendizado por Transferência no Reconhecimento Gestual

A aplicação de Inteligência Artificial na educação tem se concentrado na personalização de conteúdos, predição de desempenho e adaptação de trilhas de aprendizagem. Neste projeto, a Inteligência Artificial é utilizada especificamente no reconhecimento de gestos musicais em tempo real, a partir de dados extraídos por sensores inerciais e câmeras de profundidade com Kinect, Kay et al., (2017). Conforme Abadi et al. (2016), arquiteturas modulares com TensorFlow permitem a integração de modelos de machine learning com múltiplos canais de entrada e saída, facilitando a adaptação do sistema às necessidades individuais.

O modelo de aprendizado por transferência adotado segue a abordagem de Pan e Yang (2010), utilizando redes convolucionais treinadas previamente com bases gestuais para acelerar a convergência do treinamento com os dados das crianças surdas. Isso permite que o sistema reconheça padrões gestuais com maior precisão mesmo diante de pequenas amostras, um aspecto importante em contextos com número reduzido de participantes.

2.5 Robótica Educacional como Mediadora Multissensorial – O Caso do mBot

A robótica educacional é apontada como um instrumento de mediação sensorial e cognitiva que favorece a aprendizagem ativa e experiencial. Papert (1980) defende a construção do conhecimento a partir da interação concreta com artefatos programáveis. O robô mBot foi utilizado nesta pesquisa para representar fisicamente padrões rítmicos por meio de movimentos e luzes, funcionando como um “instrumento de retorno” da performance gestual das crianças.

Segundo Eguchi (2014), robôs educacionais favorecem o engajamento, a autoeficácia e o feedback contínuo. O mBot foi configurado para reagir com movimentos de rotação e emissão de cores LED associadas às notas tocadas, reforçando a relação gesto-ritmo-cor-movimento.

2.6 Usabilidade e Análise de Sentimentos em Ambientes Educacionais Inclusivos

A usabilidade de sistemas digitais inclusivos deve considerar não apenas critérios técnicos (tempo de resposta, navegação), mas principalmente aspectos afetivos e cognitivos dos usuários finais. De acordo com Nielsen (1993), um sistema educacional deve promover facilidade de uso, clareza de comandos e satisfação na experiência interativa.

Neste estudo, o componente emocional é monitorado por meio de análise de sentimentos derivada das falas e expressões das crianças durante as sessões. Utilizamos ferramentas como NVivo e métodos de codificação categorial com base em Braun & Clarke (2006), além da geração de nuvens de palavras com segmentação semântica para identificar termos predominantes positivos, neutros e negativos. A presença de palavras como “divertido”, “fácil”, “bonito” e “confuso” foi analisada em função da etapa da sessão em que surgiram, permitindo uma compreensão contextual do impacto emocional do sistema.

Essa camada de análise permitiu ajustes em tempo real no grau de dificuldade das tarefas, promovendo personalização e responsividade, pilares fundamentais da proposta adaptativa defendida neste trabalho.

3 Trabalhos Relacionados

A relevância de uma proposta científica não reside apenas na sua capacidade de inovação, mas também em seu posicionamento crítico e fundamentado frente ao conhecimento já consolidado. Atender aos critérios de originalidade implica necessariamente em conhecer, analisar e dialogar com os trabalhos anteriormente desenvolvidos na área. Esta seção apresenta uma análise detalhada da literatura científica relacionada à inclusão de crianças surdas na educação musical, ao uso de tecnologias assistivas e inteligência artificial nesse contexto, e à robótica educacional como mediadora de experiências multissensoriais.

3.1 Educação Musical para Crianças Surdas: de adaptações a experiências multissensoriais

A inclusão de crianças surdas no ensino musical vem sendo tratada há décadas com diferentes abordagens. Os primeiros esforços, como os de Darrow e Heller (1985), concentraram-se em estratégias compensatórias, como a amplificação sonora e a utilização de instrumentos de percussão com vibrações intensas. No entanto, tais métodos, apesar de bem intencionados, limitavam-se à adaptação do conteúdo musical tradicional, mantendo a centralidade da audição como principal via de acesso.

Em contrapartida, abordagens contemporâneas propõem ressignificar o próprio conceito de experiência musical. Swanwick (1999) argumenta que a musicalidade pode ser construída a partir de padrões visuais, gestuais e táteis, abrindo espaço para uma pedagogia musical multissensorial. Mahler (2016) reforça essa ideia ao apresentar estudos de caso com músicos surdos que desenvolveram sensibilidade rítmica e expressividade por meio de vibrações e feedback visual. Contudo, tais práticas ainda são predominantemente descritivas e carecem de sistematização tecnológica que permita sua replicabilidade e análise científica.

3.2 Tecnologias Assistivas na Educação Musical: avanços e limites

O uso de tecnologias assistivas em ambientes musicais inclusivos tem avançado nos últimos anos, com a criação de dispositivos como o *Music Touch* (Lee & Chen, 2013) e o *VibroFeel* (Gonzalez et al., 2017), ambos voltados à mediação vibracional de conteúdos musicais. Esses sistemas se baseiam na vibração sincronizada com trilhas pré-programadas, fornecendo uma experiência rítmica tátil.

Apesar do potencial desses dispositivos, a literatura indica limitações importantes: (i) a interação é passiva — o usuário apenas recebe o estímulo; (ii) há baixa adaptabilidade — o feedback não varia conforme o desempenho da criança; (iii) não há integração com análise emocional ou com modalidades visuais dinâmicas. Esses aspectos reduzem a eficácia pedagógica e o engajamento a longo prazo. O sistema proposto neste estudo visa superar essas barreiras ao permitir uma interação ativa e personalizada com o conteúdo musical, mediada por IA e sensores.

3.3 Inteligência Artificial e Ensino Personalizado em Contextos Inclusivos

A literatura sobre IA na educação é vasta, com ênfase em ambientes inteligentes de aprendizagem (Baker & Inventado, 2014), sistemas de tutoria adaptativos e plataformas de análise preditiva do desempenho (Woolf et al., 2013). Entretanto, poucas pesquisas aplicam essas tecnologias em contextos inclusivos ou com populações vulneráveis, como crianças com deficiência sensorial.

Zhou et al. (2020) introduziram o *TeachAI*, um sistema baseado em redes neurais para adaptar conteúdos de matemática conforme o progresso do aluno. Embora eficaz em contextos convencionais, o *TeachAI* não incorpora entradas táteis ou visuais customizadas, tampouco trabalha com análise de sentimentos. O presente trabalho avança nesse campo ao empregar

aprendizado por transferência para reconhecimento de gestos e adaptar, em tempo real, os estímulos com base no comportamento e nas emoções percebidas.

3.4 Robótica Educacional e Interação Multissensorial: lacuna na literatura

A robótica educacional tem sido amplamente documentada como ferramenta de estímulo à aprendizagem ativa, sobretudo em disciplinas como programação, matemática e ciências (Eguchi, 2014). O robô mBot, em especial, é utilizado como plataforma introdutória para o ensino de lógica e construção de algoritmos (Makeblock, 2018).

No entanto, o uso do mBot como agente multissensorial em contextos de educação musical para crianças surdas é inédito na literatura. Ao utilizar o mBot para representar padrões rítmicos com movimento e luz, o presente estudo propõe uma interface física que conecta a performance gestual do aluno ao feedback do sistema, fortalecendo a sincronia entre percepção e ação. Essa proposta responde a uma lacuna teórica e prática na literatura, integrando robótica com IA, análise emocional e estímulos táteis e visuais.

3.5 Integração de Análise Emocional e Métodos Mistas: inovação metodológica

Estudos sobre análise de sentimentos e usabilidade em sistemas educacionais inclusivos ainda são escassos. Embora ferramentas como o NVivo e o Linguistic Inquiry and Word Count (LIWC) tenham sido utilizadas para análise textual em contextos educacionais (Poria et al., 2017), a maioria das aplicações concentra-se em ensino superior ou plataformas online. Além disso, há carência de abordagens que combinem dados qualitativos (entrevistas, expressões) com quantitativos (classificação emocional, nuvens de palavras) de forma sistemática.

Este trabalho inova ao integrar técnicas de análise emocional ao longo do uso do sistema, correlacionando sentimentos predominantes com etapas específicas das atividades, e utilizando tais dados para ajustes adaptativos em tempo real. A proposta metodológica também inclui triangulação de dados e aplicação de métodos mistos (qualitativos e quantitativos), o que confere maior robustez e validade aos resultados.

3.6 Contribuições Diferenciais da Proposta em Relação ao Estado da Arte

Diante dos estudos analisados, observa-se que não há, até o momento, um sistema que combine:

- feedback tático, visual e robótico;
- reconhecimento de gestos em tempo real via IA;
- análise emocional integrada;
- arquitetura adaptativa com aprendizado por transferência;
- validação empírica com crianças surdas em contexto escolar.

Portanto, a presente pesquisa contribui significativamente ao campo da educação musical inclusiva, propondo uma abordagem tecnológica inovadora, sustentada por princípios pedagógicos e metodológicos rigorosos. A seguir, a seção 4 detalha os procedimentos técnicos e científicos adotados no desenvolvimento, implementação e validação da solução proposta.

4 Materiais e métodos

Esta seção apresenta o delineamento metodológico adotado, detalhando os procedimentos técnicos e científicos utilizados para o desenvolvimento, aplicação e avaliação do sistema multissensorial proposto. Seguindo as recomendações de rigor científico, as subseções abordam desde o desenho da pesquisa até a análise dos dados, buscando garantir reproduzibilidade, clareza e validade metodológica.

4.1 Delineamento da Pesquisa

Trata-se de uma pesquisa aplicada, de abordagem mista (qualitativa e quantitativa), com caráter exploratório e descritivo. O estudo foi dividido em três etapas principais: (i) desenvolvimento da solução tecnológica; (ii) experimentação com os participantes; (iii) avaliação do impacto educacional, emocional e de usabilidade.

A opção pela abordagem mista justifica-se pela necessidade de compreender tanto os aspectos objetivos do desempenho das crianças (ex. taxa de acerto, tempo de execução), quanto os aspectos subjetivos relacionados à experiência emocional e à percepção de usabilidade do sistema.

4.2 Hipóteses de Pesquisa

A formulação de hipóteses é um elemento central no processo de investigação científica, especialmente em estudos aplicados que visam avaliar o impacto de uma intervenção. Neste contexto, a definição de hipóteses operacionais claras permite direcionar os esforços analíticos, estabelecer critérios de validação e relacionar os objetivos da pesquisa a variáveis mensuráveis. As hipóteses aqui apresentadas foram fundamentadas nos pressupostos teóricos previamente discutidos e no arcabouço empírico que orientou o desenvolvimento da solução tecnológica proposta.

- **H1:** O sistema multissensorial baseado em IA aumenta a precisão na execução de gestos musicais por crianças surdas em comparação ao ensino tradicional.
- **H2:** O uso de estímulos visuais e táteis integrados melhora o engajamento emocional e a percepção musical.
- **H3:** A adaptação do sistema com base em análise de sentimentos contribui para maior retenção do conteúdo musical.

Essas hipóteses foram elaboradas com base nos pressupostos teóricos discutidos na seção 2 e nos objetivos estabelecidos na introdução deste estudo.

4.3 Participantes e Critérios Éticos

Foram selecionadas sete crianças sendo 4 meninos e 3 meninas, com idades entre 10 e 15 anos, com deficiência auditiva moderada a severa. A seleção foi baseada em critérios rigorosos, incluindo idade, grau de deficiência auditiva e consentimento informado dos pais ou responsáveis. As crianças foram recrutadas de escolas especializadas em ensino para deficientes auditivos na cidade de São Paulo, garantindo uma amostra representativa. Antes dos experimentos, cada criança participou de uma sessão de orientação, onde os objetivos do estudo e os procedimentos experimentais foram explicados.

Nosso projeto foi conduzido em conformidade com os mais elevados padrões éticos. O protocolo de pesquisa foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Presbiteriana Mackenzie sob o número 75944523.8.0000.0084. Consentimento informado foi obtido de todos os participantes e de seus responsáveis legais (assinado por todos), garantindo que os objetivos, procedimentos, e possíveis riscos do estudo fossem claramente explicados e compreendidos.

A seleção de participantes buscou minimizar vieses demográficos e garantir uma amostra representativa. Durante os experimentos, a segurança e o conforto das crianças foram priorizados, com supervisão contínua e protocolos de segurança estabelecidos. A confidencialidade dos dados dos participantes foi assegurada, e todos os dados foram anonimizados para proteger a privacidade dos participantes. Procedimentos de segurança foram implementados para garantir que as interações com os dispositivos e o robô mBot fossem seguras e confortáveis para as crianças. Os **riscos** associados à pesquisa foram mínimos, como possíveis incômodos temporários devido a iluminação, temperatura ou uso prolongado dos equipamentos. Para mitigar esses efeitos, foram adotadas medidas como ajuste do ambiente, pausas regulares e monitoramento constante do bem-estar dos participantes.

4.4 Desenvolvimento do Sistema

O sistema foi construído com arquitetura modular, seguindo o padrão MVC (Model-View-Controller), permitindo separação clara entre interface, lógica de negócio e manipulação de dados. Utilizou-se Node.js para backend, React.js para a interface web e Python (com TensorFlow e OpenCV) para os módulos de inteligência artificial.

Os sensores utilizados incluíram:

- **Leap Motion:** para captura tridimensional dos gestos manuais;
- **Webcam HD:** para detecção de expressões faciais e emoções;
- **Pulseiras vibratórias Bluetooth:** para feedback tátil;
- **Robô mBot:** O robô mBot foi programado para oferecer feedback físico multimodal. Ele utilizava movimentos simples (avanço, recuo, rotação), sinais luminosos em LEDs coloridos e vibração do motor como resposta às ações dos participantes. Esse feedback era sincronizado com os gestos reconhecidos pelo sistema, reforçando a associação entre estímulos musicais e respostas corporais.

O modelo de IA foi construído com base em redes convolucionais (CNNs) e adaptado por aprendizado por transferência, utilizando pesos pré-treinados do conjunto Kinetics, Kay et al., (2017) e refinado com dados gestuais específicos dos participantes. A análise de sentimentos foi realizada com modelos baseados em Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT), Devlin et al., (2019), aplicados às transcrições das expressões verbais e comportamentais das crianças.

4.5 Procedimentos Experimentais

As sessões foram distribuídas ao longo de 8 semanas consecutivas, com dois encontros semanais de 45 minutos cada, totalizando 16 sessões por criança.

- **Sessão 1 a 3 – Ambiente e treinamento assistido:** apresentação lúdica do sistema, com auxílio dos educadores; adaptação ao uso dos dispositivos e entendimento das tarefas.

Durante as sessões 4–10, houve acompanhamento de **educadores especializados em música inclusiva** e, quando necessário, de **intérpretes de Libras**, assegurando acessibilidade e apoio pedagógico adequado facilitando a comunicação nos experimentos.

- **Sessão 4 a 10 – Interação autônoma:** as crianças utilizaram o sistema para tocar composições simples (4 a 6 notas) associadas a cores e gestos, com retorno do robô e das pulseiras vibratórias. O sistema ajustava dinamicamente o nível de dificuldade das atividades considerando três parâmetros principais:

- **Precisão gestual** – grau de correspondência entre o gesto realizado e o modelo padrão;
- **Tempo de resposta** – latência na execução após o estímulo visual ou sonoro;
- **Análise de sentimentos** – extraída das expressões faciais por meio do modelo BERT, auxiliando na identificação de frustração ou entusiasmo. Essa abordagem permitiu que o sistema mantivesse os participantes engajados, evitando tanto a monotonia quanto a frustração.

Sessão 11 a 13 – Avaliação de desempenho e respostas emocionais: análise das repetições necessárias, grau de acerto gestual e análise automática de expressões faciais.

- **Sessão 14 a 16 – Entrevistas e feedbacks:** entrevistas individuais com as crianças (traduzidas por intérpretes de Libras) e com os professores, coleta de percepções qualitativas e comentários espontâneos.

Para fins comparativos com a abordagem tradicional de ensino de música, foi aplicada uma metodologia tradicional de ensino de ritmos, baseada em **batidas repetitivas de palmas e notas musicais coloridas em relação às notas musicas em partituras tradicionais**. Essa abordagem ocorreu em momentos específicos das sessões (início e final), permitindo cotejar a eficácia do sistema com práticas já consolidadas, validando assim o modelo proposto.

4.6 Instrumentos de Coleta de Dados

Foram empregados instrumentos padronizados e validados, além de ferramentas desenvolvidas especialmente para esta pesquisa:

- **Ficha de observação estruturada:** utilizada pelos educadores para registrar comportamentos de engajamento e participação;
- **Logs do sistema:** tempo de resposta, número de repetições por nota, correspondência gesto-cor;
- **Questionário System Usability SUS (Scale)** adaptado com pictogramas para crianças;
- **Software NVivo 12:** para análise qualitativa das transcrições das entrevistas e diário de campo dos educadores;
- **Nuvem de palavras com análise semântica:** criada a partir das falas das crianças e das reações gestuais e emocionais observadas durante as sessões.

4.7 Análise dos Dados

Os dados quantitativos foram tratados com estatística descritiva (média, desvio padrão, frequência relativa) e testes não paramétricos (Wilcoxon) para comparação pré e pós-intervenção.

As respostas qualitativas passaram por codificação temática aberta, axial e seletiva, conforme Braun & Clarke (2006), permitindo emergir categorias como “alegria”, “confusão”, “preferência por cores” e “interesse pelo robô”.

A triangulação entre observações, logs do sistema e relatos foi realizada para garantir a validade interna da análise e reduzir vieses de interpretação.

4.8 Representação Visual do Processo

Para complementar a descrição dos métodos aplicados no desenvolvimento e na implementação do sistema, detalharemos o fluxo de trabalho adotado para o treinamento e a aplicação do modelo de inteligência artificial. O fluxograma presente na Figura 2 demonstra a sequência lógica desde a obtenção dos dados até a produção da saída do modelo, destacando os principais componentes e etapas envolvidas no processo.

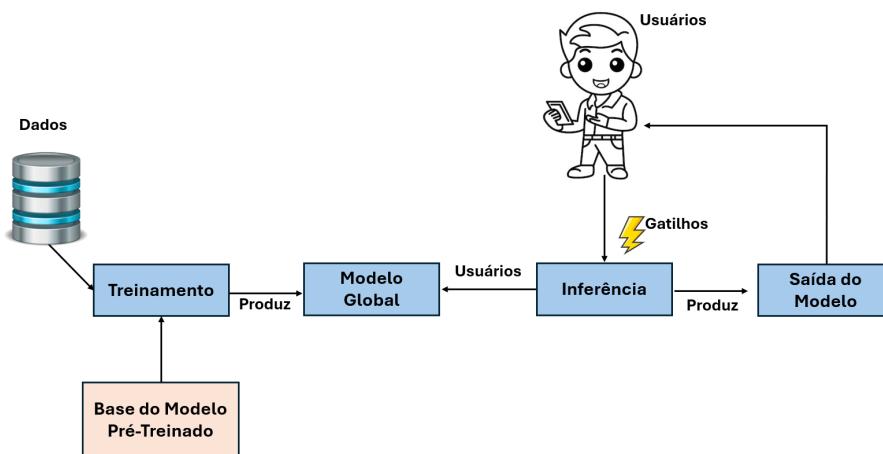


Figura 2: Fluxograma do modelo. Fonte: autoria própria (2025)

Cada componente do sistema foi projetado para otimizar o desempenho e garantir uma experiência fluida e responsiva para os usuários finais, neste caso, as crianças surdas participantes dos experimentos.

Durante os experimentos, o modelo global é continuamente refinado com base nos dados coletados das interações das crianças, garantindo que o sistema evolua e se adapte às necessidades específicas de cada usuário. Essa abordagem iterativa não só melhora a precisão do modelo, mas também contribui para uma experiência de aprendizagem personalizada e eficaz.

5 Resultados da Pesquisa e Discussões

Nesta seção de resultados e discussões, apresentamos as descobertas obtidas a partir de análises qualitativas e quantitativas que avaliam o impacto da inclusão digital mediada por inteligência artificial no aprendizado e desenvolvimento das crianças surdas participantes do estudo. É importante destacar que, na versão final deste projeto, foram realizadas mais de 30 análises individuais. Contudo, devido às limitações de espaço, vamos compartilhar apenas os

insights mais relevantes para o tema do evento. Para todas as análises apresentadas, o eixo Y foi utilizado para representar as variáveis verticais, enquanto o eixo X foi usado para as variáveis horizontais.

5.1 Análise da Precisão do Reconhecimento de Gestos

A análise da precisão no reconhecimento de gestos é essencial para avaliar a eficácia do sistema de inteligência artificial (IA) desenvolvido para a inclusão musical de crianças surdas. Este estudo visa entender como a precisão no reconhecimento de gestos evolui ao longo das sessões experimentais e identificar possíveis variações entre os participantes. O sistema foi projetado para reconhecer uma ampla gama de gestos musicais, com a precisão desse reconhecimento sendo monitorada continuamente para avaliar sua evolução ao longo do tempo e com o aprendizado adaptativo.

Para representar visualmente essa evolução, utilizou-se um gráfico de linha, onde o eixo x indica o número de sessões e o eixo y demonstra a precisão média do reconhecimento de gestos, medida em porcentagem. Este gráfico permite uma análise clara da tendência de melhoria na precisão do sistema, que se adapta aos gestos individuais das crianças. Observou-se um aumento gradual e consistente na precisão ao longo do tempo, sugerindo que tanto o sistema quanto os usuários estão se beneficiando do processo contínuo de aprendizado.

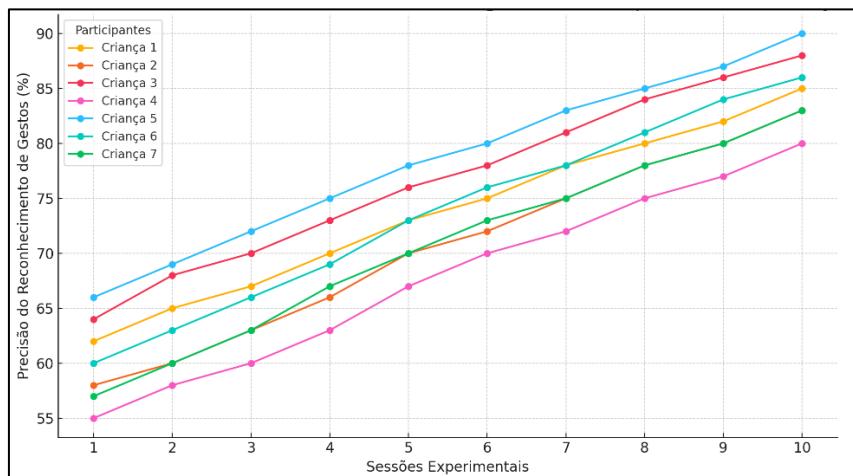


Gráfico 1: Precisão do Reconhecimento de Gestos ao Longo das Sessões. Fonte: autoria própria (2025).

Em uma análise mais detalhada, foi elaborado um gráfico de boxplot que apresenta a distribuição da precisão do reconhecimento de gestos para cada criança ao longo das sessões. Este gráfico proporciona uma visão sobre as variações individuais, identifica outliers e oferece uma compreensão das diferenças na interação com o sistema. As caixas representam o intervalo interquartil, os bigodes mostram a variação total dos dados e os pontos fora dos bigodes indicam outliers. O gráfico revela que, apesar de algumas crianças terem inicialmente apresentado menor precisão, todas demonstraram melhorias significativas com o tempo, indicando que o sistema é eficaz em se adaptar a diferentes usuários.

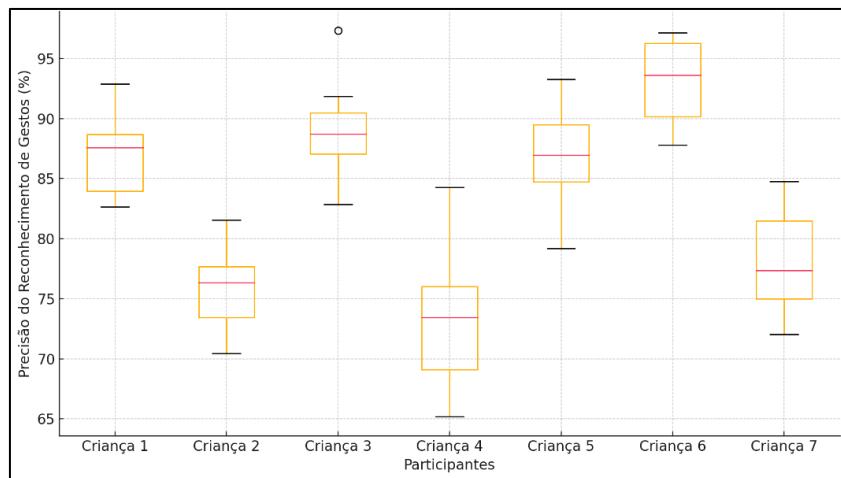


Gráfico 2: Distribuição da Precisão dos Gestos por Criança. Fonte: autoria própria (2025).

Essas visualizações dos gráficos 1 e 2 são fundamentais para avaliar a eficácia do sistema na identificação precisa de gestos, destacando tanto o progresso coletivo quanto as variações individuais. A tendência de melhoria observada reflete o potencial do sistema em oferecer uma experiência de aprendizado adaptativa e responsiva, que se ajusta continuamente às necessidades dos usuários. É importante destacar que o gráfico 1 apresenta uma visão global da evolução da precisão média do sistema de reconhecimento de gestos ao longo das sessões. Este resultado reflete a tendência coletiva de melhoria obtida pelo conjunto de participantes, evidenciando a capacidade do sistema em se adaptar progressivamente às interações de todos os usuários.

5.2. Engajamento e Interação das Crianças com o Sistema

O engajamento das crianças e sua interação com o sistema são aspectos fundamentais para medir o sucesso de qualquer plataforma educacional, particularmente em contextos de inclusão digital. Esta análise explorou os níveis de engajamento e as formas de interação das crianças com o sistema ao longo das sessões experimentais. Utilizando métricas como número de interações, tempo de interação e precisão dos gestos, a análise visou compreender como as crianças se envolvem com o sistema e como esse envolvimento impacta o aprendizado. A análise inclui a comparação de desempenho individual entre sete crianças participantes, permitindo uma avaliação mais granular das dinâmicas de interação.

O gráfico de barras a seguir quantifica o nível de engajamento de cada criança ao longo das sessões experimentais. O eixo x representa as crianças participantes, enquanto o eixo y indica o número médio de interações por sessão. Cada barra corresponde ao engajamento médio durante todas as sessões, destacando quais crianças estavam mais ativas e engajadas. Este gráfico é fundamental para identificar padrões de comportamento e entender como o sistema pode ser ajustado para melhorar o engajamento de todos os usuários.

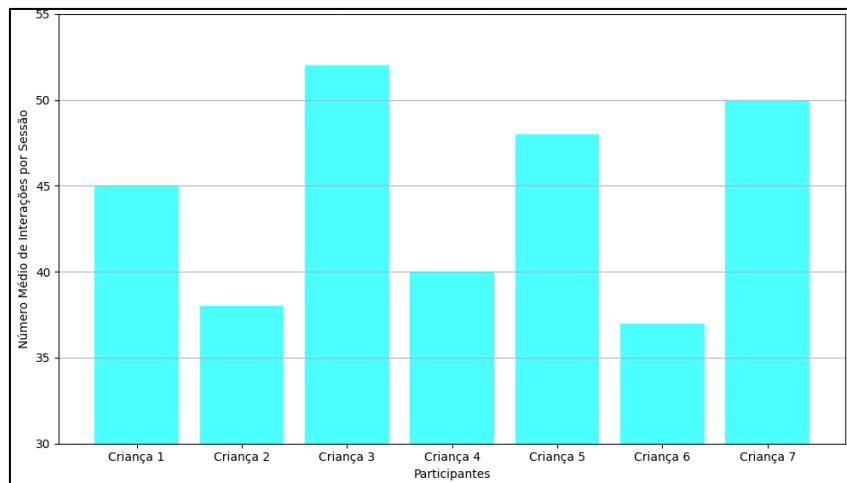


Gráfico 3: Nível de Engajamento das Crianças. Fonte: autoria própria (2025).

Com finalidade de uma análise mais detalhada do engajamento e da interação, utilizou-se um gráfico de radar para visualizar o desempenho individual das crianças em várias métricas: precisão dos gestos, tempo de reação e número de interações. Cada eixo do gráfico representa uma métrica de desempenho, enquanto cada linha mostra o perfil de desempenho de uma criança específica. Este gráfico ajuda a identificar pontos fortes e áreas de melhoria para cada criança, além de oferecer uma comparação visual das habilidades e do engajamento dos participantes.

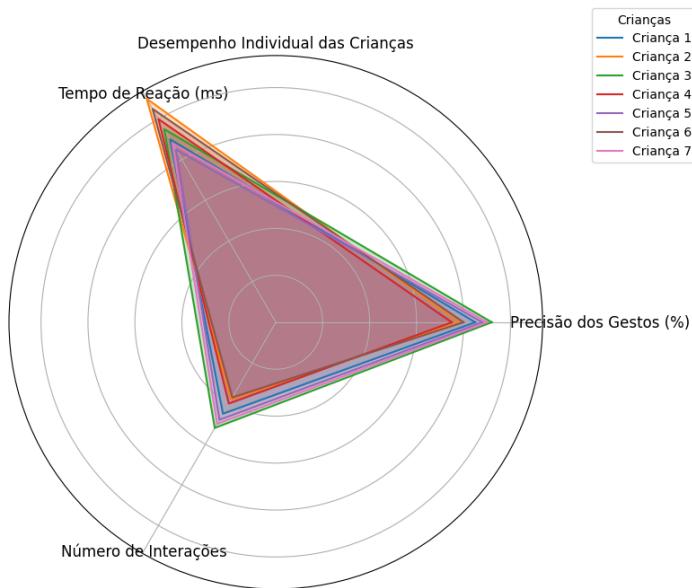


Gráfico 4: Desempenho Individual das Crianças. Fonte: autoria própria (2025).

Essas análises demonstradas nos gráficos 3 e 4 proporcionam insights valiosos sobre como as crianças interagem com o sistema, permitindo ajustes direcionados para otimizar o engajamento e a eficácia do aprendizado. Compreender as dinâmicas de interação ajuda a adaptar o sistema às necessidades individuais, promovendo uma experiência educacional mais inclusiva e eficaz.

5.3. Avaliação Qualitativa das Reações das Crianças

Compreender as reações emocionais e as percepções das crianças em relação ao sistema de inclusão musical é fundamental para avaliar sua eficácia e aceitação. A avaliação qualitativa fornece insights valiosos sobre como as crianças se sentem durante o uso do sistema, suas preferências e as áreas que podem ser melhoradas. Nesta análise, foram utilizadas técnicas de análise de sentimentos para interpretar as respostas das crianças durante entrevistas e sessões de observação. Adicionalmente, uma nuvem de palavras foi criada para destacar os termos mais frequentemente utilizados pelas crianças ao descrever suas experiências, oferecendo uma visão imediata das suas impressões e sentimentos.

A análise de sentimentos envolveu a codificação e interpretação das respostas das crianças em categorias de sentimentos positivos, neutros e negativos. Essa análise permite identificar padrões emocionais nas interações com o sistema e destacar aspectos que as crianças acharam mais agradáveis ou desafiadores. Os resultados da análise são apresentados em um gráfico de barras, mostrando a proporção de respostas positivas, neutras e negativas para cada criança.

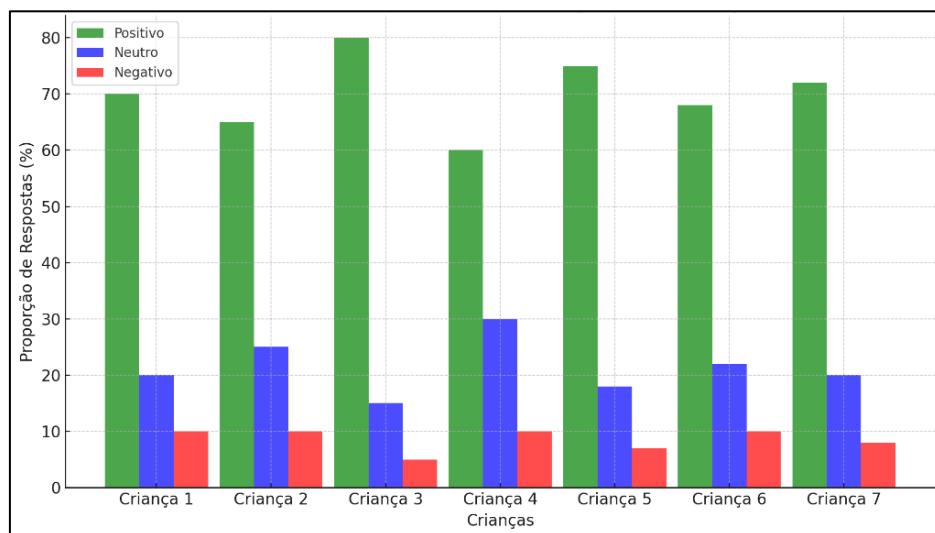


Gráfico 5: Análise de Sentimentos das Reações das Crianças. Fonte: autoria própria (2025).

Um gráfico de barras foi gerado a partir das transcrições das entrevistas e observações, apresentando os termos mais frequentes utilizados pelas crianças ao descrever suas experiências com o sistema. Cada barra representa a frequência de ocorrência de uma palavra específica, permitindo identificar de forma clara os aspectos do sistema que tiveram maior impacto nas crianças. Essa representação visual possibilita observar não apenas quais elementos receberam mais destaque, mas também fornece uma leitura equilibrada sobre aqueles que despertaram sentimentos positivos ou negativos.

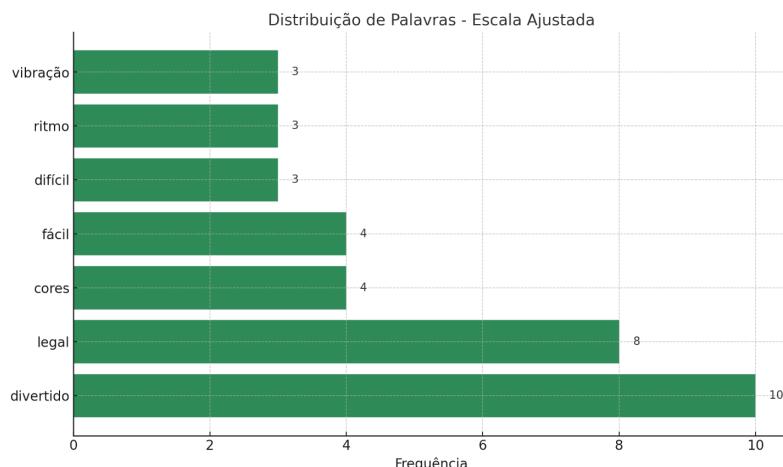


Gráfico 6: Termos Mais Utilizados pelas Crianças. Fonte: autoria própria (2025).

As análises qualitativas dos gráficos 5 e 6 fornecem uma análise detalhada das emoções e percepções das crianças, essencial para o refinamento contínuo do sistema. A inteligência artificial pode ser utilizada para personalizar ainda mais a experiência de aprendizado, ajustando dinamicamente os desafios e os feedbacks com base nas reações emocionais das crianças. Essa abordagem adaptativa é fundamental para garantir uma inclusão digital, criando um ambiente de aprendizado acessível para todas as crianças.

5.4. Impacto do Robô mBot na Compreensão dos Ritmos Musicais

O uso de robôs educacionais, como o mBot, pode ser uma ferramenta poderosa para facilitar o aprendizado, especialmente em contextos de inclusão digital. Este estudo investiga o impacto do robô mBot na compreensão dos ritmos musicais por parte das crianças surdas. Ao interagir com o mBot, as crianças não apenas recebem feedback auditivo e visual, mas também observam movimentos físicos sincronizados com os ritmos, o que pode melhorar sua percepção e compreensão musical. Esta análise se concentra em comparar a eficácia percebida do uso do robô mBot em relação a métodos tradicionais e em entender a distribuição de feedback positivo versus negativo relacionado ao uso do robô.

O gráfico 7 compara a eficácia percebida do uso do robô mBot versus métodos tradicionais de ensino musical para ritmos. O eixo x representa as crianças participantes, enquanto o eixo y indica a eficácia percebida, medida em uma escala de 0 a 100. Cada par de colunas mostra a percepção de eficácia dos métodos tradicionais em comparação com o uso do mBot, permitindo uma visualização clara das preferências e percepções das crianças.

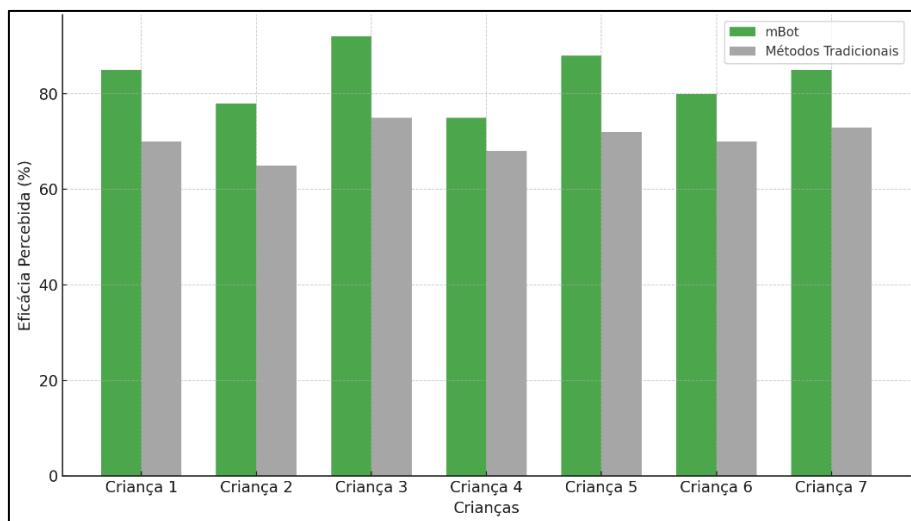


Gráfico 7: Eficácia com Uso do Robô mBot vs. Métodos Tradicionais. Fonte: autoria própria (2025).

Com intuito de avaliar as percepções gerais sobre o uso do robô mBot, foi gerado um gráfico de barras empilhadas que apresenta a distribuição de feedback positivo, neutro e negativo. O eixo x representa as categorias de feedback, enquanto o eixo y indica o número de ocorrências observadas entre as sete crianças participantes. Esse formato facilita a visualização da proporção de avaliações e evidencia o impacto emocional e a aceitação do mBot como ferramenta educacional.

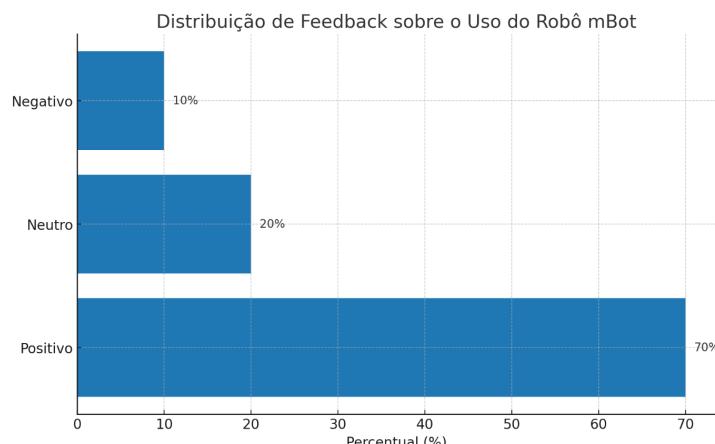


Gráfico 8: Feedback sobre o Uso do Robô mBot. Fonte: autoria própria (2025).

Após as análises e demonstrações nos gráficos 7 e 8, os dados sugerem que o mBot é uma ferramenta eficaz para a compreensão dos ritmos musicais, oferecendo uma abordagem mais envolvente e interativa em comparação com os métodos tradicionais. A inteligência artificial pode ser integrada a esses robôs para adaptar as respostas e os feedbacks com base nas necessidades e no progresso das crianças, criando um ambiente de aprendizado mais responsivo e personalizado. Essa abordagem não só melhora o engajamento e a eficácia do aprendizado, mas também promove uma inclusão digital significativa, onde todas as crianças podem experimentar e apreciar a educação musical.

5.5. Análise Longitudinal do Desenvolvimento das Crianças

A análise longitudinal é uma abordagem essencial para avaliar o desenvolvimento contínuo das crianças ao longo do tempo. Neste estudo, essa análise foi aplicada para monitorar o progresso das crianças em termos de precisão dos gestos, tempo de resposta e satisfação durante o uso do sistema de inclusão musical. A observação dessas métricas ao longo das sessões experimentais permite entender como o aprendizado evolui, identificar tendências de melhoria, e detectar possíveis áreas que precisam de ajustes. A análise foi realizada considerando todas as sete crianças participantes, fornecendo uma visão abrangente do impacto do sistema ao longo do tempo.

O gráfico 9 mostra o progresso das crianças em termos de precisão dos gestos e tempo de resposta ao longo das sessões experimentais. O eixo x representa as sessões, enquanto os eixos y esquerdo e direito indicam, respectivamente, a precisão dos gestos (%) e o tempo de resposta (ms). Cada linha colorida representa uma criança diferente, permitindo observar o progresso individual e comparar a evolução entre os participantes.

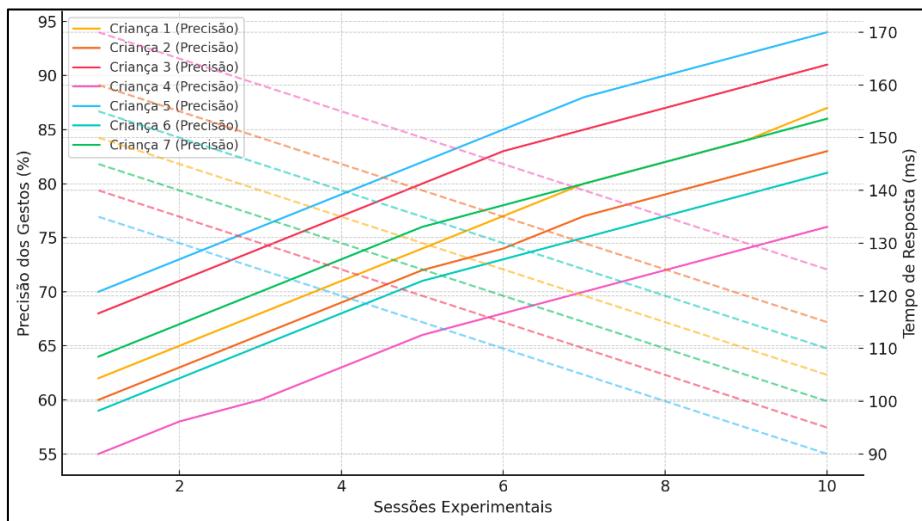


Gráfico 9: Progresso em Precisão dos Gestos e Tempo de Resposta. Fonte: autoria própria (2025).

Buscando entender melhor como os diferentes aspectos do aprendizado interagem ao longo do tempo, foi criado um gráfico de área empilhada. Este gráfico representa a evolução conjunta de três métricas principais: precisão dos gestos, tempo de resposta, e satisfação das crianças. Cada camada da área empilhada corresponde a uma dessas métricas, mostrando como elas contribuem para o desenvolvimento geral ao longo das sessões.

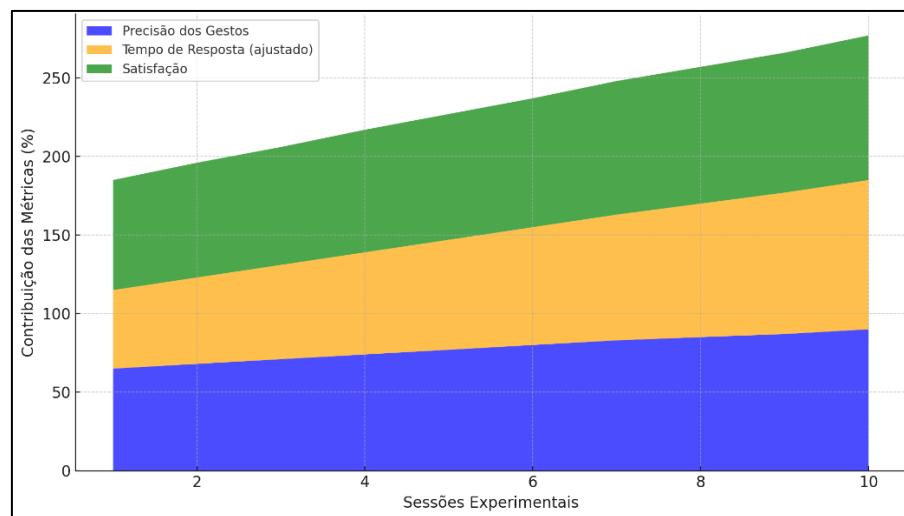


Gráfico 10: Evolução e Interação dos Aspectos do Aprendizado. Fonte: autoria própria (2025).

Os gráficos 9 e 10 demonstram a eficácia do sistema de inclusão digital em promover o desenvolvimento contínuo das habilidades das crianças. A análise longitudinal é essencial para entender o progresso individual e ajustar o sistema para atender melhor às necessidades de cada criança. A inteligência artificial pode ser utilizada para monitorar continuamente esses parâmetros e adaptar as atividades e o feedback de acordo com o progresso observado, garantindo uma experiência de aprendizado personalizada e responsiva.

Essas abordagens adaptativas são fundamentais para garantir que todas as crianças possam progredir em seu próprio ritmo, maximizando o engajamento e o sucesso no aprendizado musical.

5.6. Análise do Aprendizado Adaptativo

O aprendizado adaptativo é uma característica determinante de sistemas educacionais modernos, especialmente em contextos de inclusão digital. Ele permite que o sistema se ajuste às necessidades individuais de cada aluno, proporcionando uma experiência de aprendizado personalizada e eficaz. Nesta seção, é explorada a adaptação do sistema de inclusão musical às respostas das crianças, utilizando duas abordagens principais: a visualização da adaptação do sistema aos padrões de gestos das crianças ao longo das sessões e a análise da curva de aprendizado de cada criança e do sistema como um todo.

O gráfico 11 visualiza como o sistema se adaptou aos diferentes padrões de gestos das crianças ao longo das sessões experimentais. O eixo x representa as sessões, enquanto o eixo y indica os diferentes participantes (crianças 1 a 7). As cores no gráfico indicam o nível de precisão de reconhecimento de gestos em cada sessão, com cores mais claras representando maior precisão. Este gráfico permite observar como o sistema se ajusta aos gestos de cada criança, melhorando a precisão ao longo do tempo.

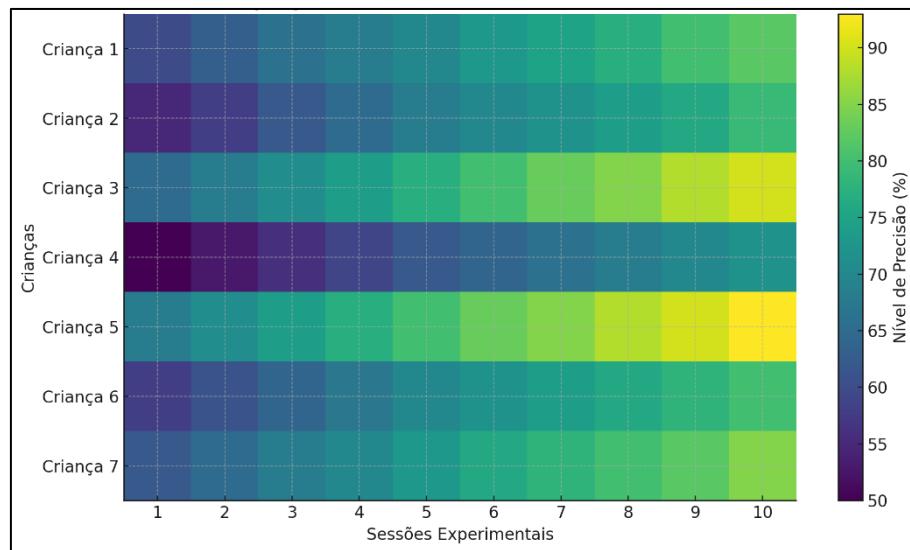


Gráfico 11: Adaptação do Sistema aos Padrões de Gestos. Fonte: autoria própria (2025).

Analizando o aprendizado adaptativo ao longo do tempo, nos permitiu criar um gráfico de linhas que mostra a curva de aprendizado de cada criança e a média do sistema. O eixo x representa as sessões, e o eixo y indica a precisão média dos gestos (%). Cada linha representa uma criança, e uma linha adicional mostra a média de precisão do sistema. Este gráfico ajuda a identificar como cada criança se adapta e melhora ao longo do tempo, bem como a eficácia geral do sistema em apoiar o aprendizado.

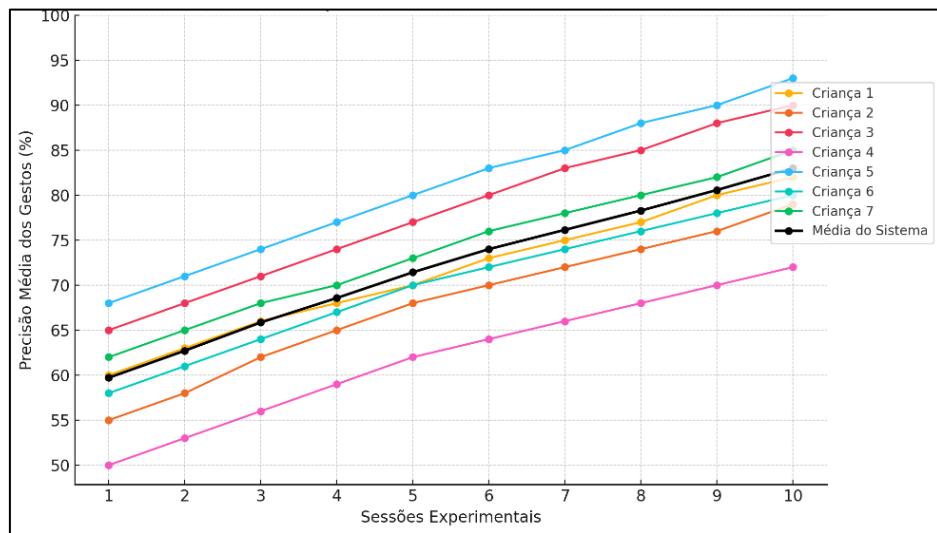


Gráfico 12: Curva de Aprendizado Individual e do Sistema. Fonte: autoria própria (2025).

Esses gráficos 11 e 12 demonstram a eficácia do aprendizado adaptativo no sistema de inclusão musical. A capacidade do sistema de ajustar suas respostas com base no desempenho das crianças é fundamental para promover um ambiente de aprendizado inclusivo e eficaz. A inteligência artificial desempenha um papel vital nesse processo, permitindo que o sistema adapte dinamicamente as atividades e o feedback, garantindo que cada criança possa progredir de acordo com suas próprias habilidades e ritmo.

Essa abordagem personalizada não só melhora o aprendizado, mas também aumenta o engajamento e a satisfação das crianças, criando uma experiência educativa que é inclusiva e

adaptada às necessidades individuais. Diferentemente do gráfico 1, que mostra apenas a média global, o gráfico 12 enfatiza as diferenças individuais entre as crianças e a média do sistema, permitindo observar como cada participante evoluiu em seu próprio ritmo. Esta comparação individualizada reforça o caráter adaptativo da solução proposta, que ajusta a experiência de acordo com o desempenho de cada criança.

5.7. Análise de Feedback Tátil e Visual Combinado

O uso de múltiplas modalidades de feedback, como tátil e visual, é uma estratégia eficaz para enriquecer a experiência de aprendizado, especialmente para crianças com deficiência auditiva. Esta seção foca na análise de como o feedback tátil e visual combinado influencia o aprendizado musical das crianças surdas. A eficácia dessas modalidades de feedback foi avaliada comparando interações bem-sucedidas e malsucedidas usando apenas feedback tátil, apenas feedback visual, e uma combinação de ambos.

O gráfico de linhas com múltiplas séries mostra a eficácia do feedback tátil versus visual em diferentes tarefas de aprendizado musical ao longo das sessões experimentais. O eixo x representa as sessões, enquanto o eixo y indica a taxa de sucesso das interações (%). Cada linha representa um tipo de feedback: apenas tátil, apenas visual, e combinado. Esse gráfico permite observar a eficácia relativa de cada tipo de feedback e como eles interagem para melhorar a compreensão e o aprendizado musical.

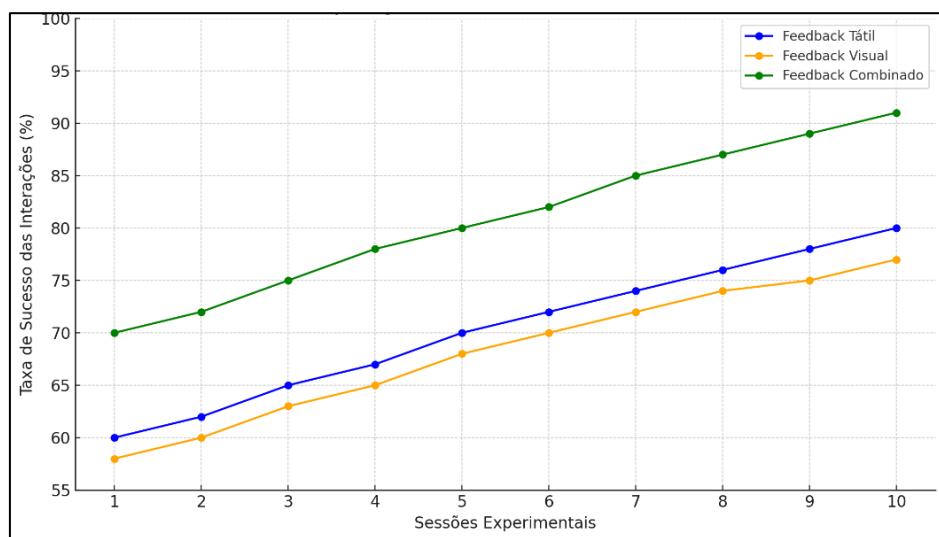


Gráfico 13: Comparação entre Feedback Tátil e Visual. Fonte: autoria própria (2025).

Para uma análise mais detalhada, foi gerado um gráfico de barras empilhadas que compara o número de interações bem-sucedidas e malsucedidas sob diferentes condições de feedback: tátil, visual e combinado. O eixo x representa as crianças, enquanto o eixo y mostra o número de interações. Este gráfico permite avaliar como diferentes tipos de feedback impactam a qualidade das interações e identificar quais combinações de feedback são mais eficazes.

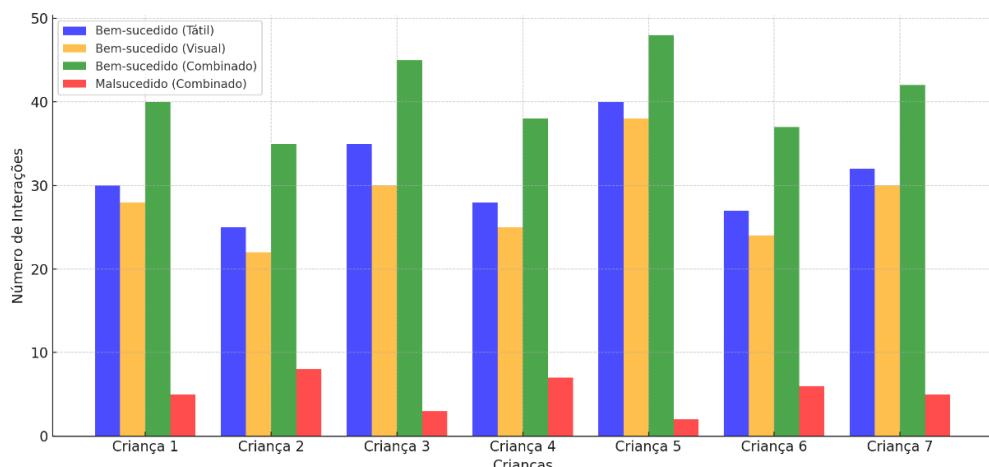


Gráfico 14: Comparação de Interações Bem-Sucedidas e Malsucedidas. Fonte: autoria própria (2025).

Os gráficos 13 e 14 destacam a importância do uso de feedback multissensorial em sistemas educacionais inclusivos. A combinação de feedback tátil e visual não só facilita uma melhor compreensão dos conceitos musicais, mas também melhora a experiência de aprendizado das crianças, tornando-a mais envolvente e eficaz. A inteligência artificial pode ser utilizada para ajustar dinamicamente os tipos de feedback com base no desempenho individual das crianças, garantindo que cada criança receba o suporte sensorial necessário para alcançar seu pleno potencial de aprendizado.

Os achados indicam que a combinação de feedback tátil e visual proporciona uma experiência de aprendizado mais rica e eficaz, melhorando a compreensão e retenção de conceitos musicais. A utilização de feedback multissensorial se mostra essencial para maximizar o potencial de aprendizado em ambientes educacionais inclusivos.

5.8. Análise de Usabilidade do Sistema

A usabilidade de um sistema educacional é um fator crítico que pode impactar diretamente a eficácia do aprendizado e o engajamento dos usuários. Em contextos de inclusão digital, onde crianças com diferentes necessidades interagem com a tecnologia, a avaliação da usabilidade é essencial para garantir que o sistema seja acessível, intuitivo e eficaz. Nesta seção, a usabilidade do sistema de inclusão musical foi avaliada com base no feedback fornecido pelas crianças e educadores, focando em aspectos como facilidade de uso, satisfação geral, e feedbacks específicos sobre componentes do sistema.

O gráfico de radar a seguir compara diferentes aspectos da usabilidade do sistema, com base no feedback de crianças e educadores. As métricas avaliadas incluem facilidade de uso, clareza das instruções, satisfação com o feedback sensorial (tátil e visual), e integração dos dispositivos. Cada eixo representa uma métrica de usabilidade, e as linhas indicam o nível de satisfação para cada grupo de usuários (crianças e educadores). Este gráfico fornece uma visão abrangente dos pontos fortes e áreas de melhoria do sistema.

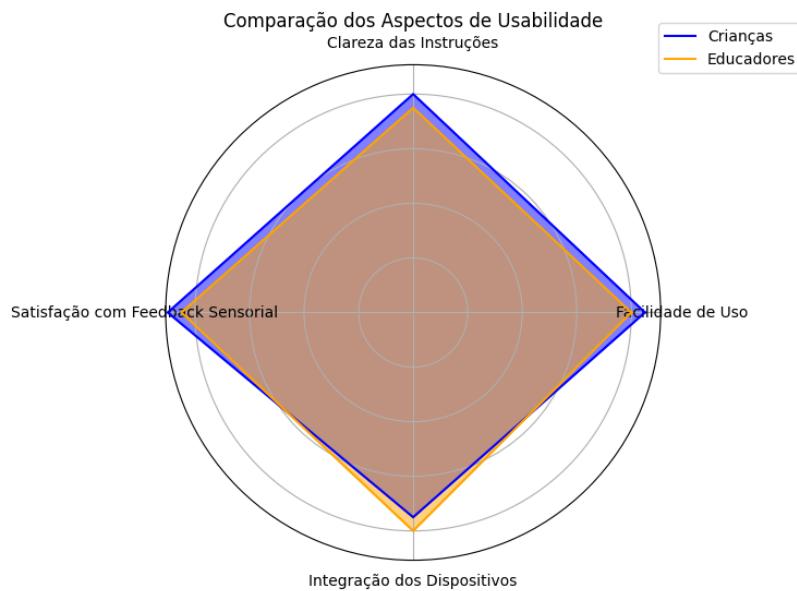


Gráfico 15: Comparação dos Aspectos de Usabilidade. Fonte: autoria própria (2025).

Buscando entender a percepção geral sobre a usabilidade do sistema, foi gerado um gráfico de barras horizontais que apresenta a proporção de feedback positivo, neutro e negativo. Esse formato permite visualizar de maneira clara o nível de aceitação do sistema e identificar o grau de satisfação dos usuários. Cada barra corresponde a uma categoria de feedback, destacando as áreas em que o sistema apresenta melhor desempenho e aquelas que podem demandar melhorias.

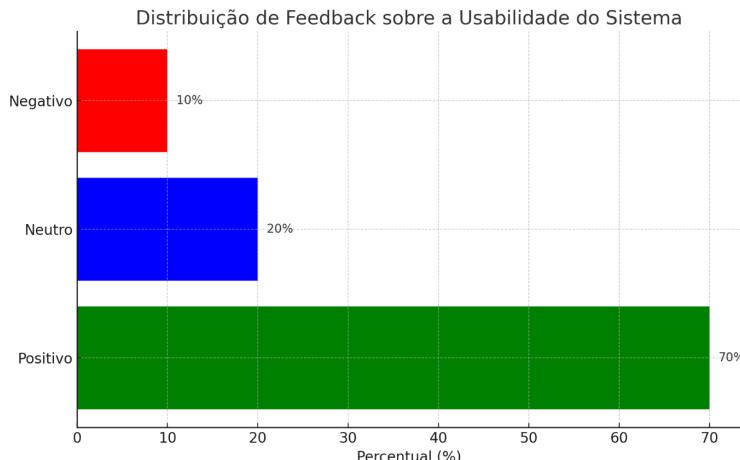


Gráfico 16: Proporção de Feedback sobre Usabilidade. Fonte: autoria própria (2025).

Os gráficos 15 e 16 evidenciam a importância de considerar a usabilidade como um componente central no design de sistemas educacionais, especialmente em contextos de inclusão digital. Um sistema que é fácil de usar e intuitivo não só melhora a experiência de aprendizado, mas também aumenta a confiança e o engajamento dos usuários. A inteligência artificial pode ser utilizada para monitorar e ajustar continuamente a usabilidade do sistema, respondendo às necessidades dos usuários e garantindo uma experiência de aprendizado positiva e inclusiva.

As avaliações de usabilidade fornecem uma base sólida para otimizar o design e a funcionalidade do sistema, garantindo que ele atenda às necessidades dos usuários de maneira eficiente. Ajustes contínuos com base no feedback dos usuários são essenciais para manter o sistema intuitivo e acessível, promovendo uma experiência de aprendizado positiva.

5.9. Análise de Retenção e Memorização Musical

A retenção e memorização de conceitos musicais são indicadores fundamentais da eficácia do aprendizado, especialmente em sistemas educacionais que utilizam feedback sensorial e tecnologias interativas. Nesta seção, foi realizada uma análise da capacidade de retenção e memorização musical das crianças, avaliando como esses aspectos evoluem ao longo do tempo. A análise considera diferentes intervalos de tempo após as sessões de aprendizado e examina o impacto dos estímulos táteis e visuais na memorização de ritmos e melodias.

O gráfico de barras empilhadas compara a retenção de conhecimentos musicais em diferentes intervalos de tempo após as sessões de aprendizado (e.g., imediatamente após a sessão, uma semana depois, um mês depois). Cada barra representa um intervalo de tempo, enquanto as seções empilhadas indicam o número de conceitos musicais retidos versus esquecidos. Este gráfico permite observar como a retenção varia ao longo do tempo e identifica a eficácia dos métodos de aprendizado utilizados.

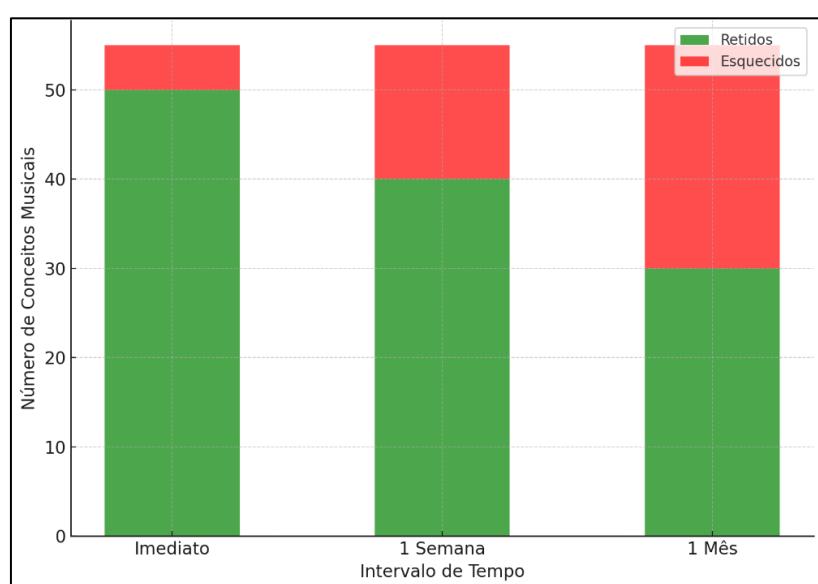


Gráfico 17: Retenção de Conhecimentos Musicais. Fonte: autoria própria (2025).

Com foco em entender a evolução da capacidade de memorização das crianças ao longo das sessões de aprendizado, foi criado um gráfico de linhas temporais. O eixo x representa o tempo, enquanto o eixo y mostra a proporção de conceitos musicais memorizados (%). Cada linha representa uma criança, mostrando como a capacidade de memorização se desenvolve ao longo do tempo. Este gráfico ajuda a identificar padrões de memorização e a eficácia de diferentes abordagens de ensino.

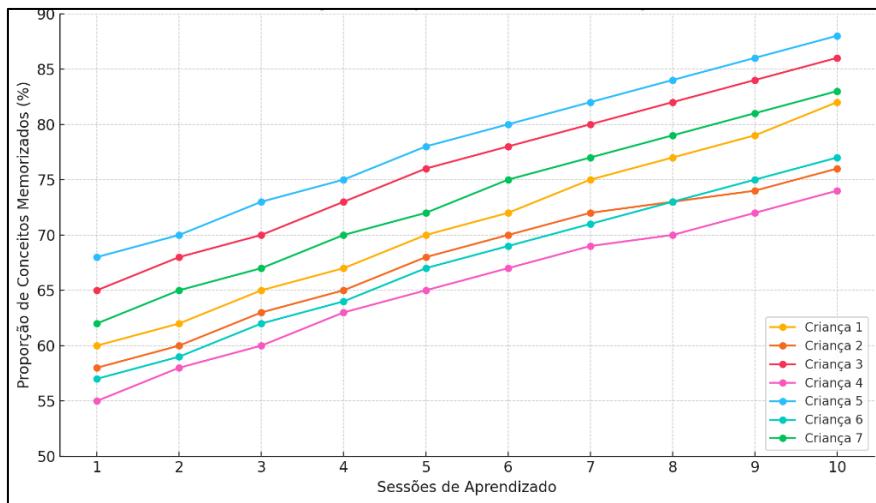


Gráfico 18: Evolução da Capacidade de Memorização. Fonte: autoria própria (2025).

As representações dos gráficos dos 17 e 18 sublinham a importância de estratégias de ensino que promovam a retenção e memorização eficazes, especialmente em contextos de aprendizado sensorial e interativo. A combinação de feedback tático e visual pode ser uma ferramenta poderosa para melhorar a memorização, ajudando as crianças a internalizarem e reter conceitos musicais por períodos mais longos. A inteligência artificial pode ser usada para monitorar o progresso da memorização e ajustar as atividades de aprendizado de acordo, garantindo que cada criança alcance seu pleno potencial de aprendizado.

Os resultados indicam que a combinação de feedback tático e visual é eficaz para enriquecer as interações das crianças com o sistema, favorecendo o engajamento e a compreensão dos conceitos musicais durante as atividades. A utilização de abordagens sensoriais integradas potencializou a qualidade da experiência de aprendizagem, ainda que não seja possível, nesta etapa, afirmar impactos diretos sobre a retenção em longo prazo.

5.10. Impacto Social e Emocional do Sistema

Além dos aspectos cognitivos e de aprendizado, o impacto social e emocional de um sistema educacional é essencial para compreender seu valor total, especialmente em contextos de inclusão digital. Este estudo examinou como o uso do sistema de inclusão musical afeta o bem-estar social e emocional das crianças, considerando aspectos como autoestima, confiança, interação social e reações emocionais durante as sessões. Análises qualitativas e quantitativas foram realizadas para capturar uma visão abrangente do impacto do sistema.

A análise sentimental longitudinal apresenta uma visão dos sentimentos e emoções expressos pelas crianças ao longo das sessões experimentais. O eixo x representa as sessões, enquanto o eixo y indica a intensidade dos sentimentos, categorizados em positivos, neutros e negativos. Cada linha no gráfico representa uma média dos sentimentos capturados durante entrevistas e observações, mostrando como as emoções das crianças evoluem ao longo do tempo em resposta ao uso do sistema.

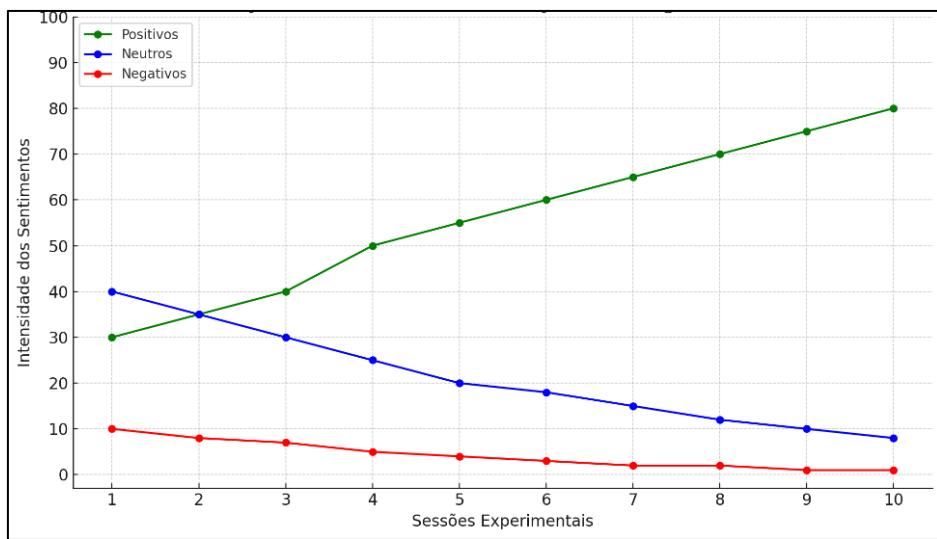


Gráfico 19: Avaliação dos Sentimentos e Emoções. Fonte: autoria própria (2025).

Com o objetivo de compreender melhor as experiências emocionais das crianças, foi elaborado um gráfico de barras a partir das transcrições das entrevistas e observações. O gráfico apresenta a frequência dos termos mais associados a experiências positivas e negativas, permitindo identificar de forma clara quais sentimentos foram mais recorrentes. Observa-se que termos como “*confuso*” e “*frustrado*” apareceram em maior destaque, evidenciando que também ocorreram momentos de dificuldade durante o processo. No entanto, esse resultado não invalida a tendência observada no Gráfico 19, que aponta para o crescimento da intensidade dos sentimentos positivos ao longo das sessões. Em conjunto, os dois gráficos sugerem que, embora as crianças tenham enfrentado desafios, o saldo geral da experiência foi predominantemente positivo e engajador.

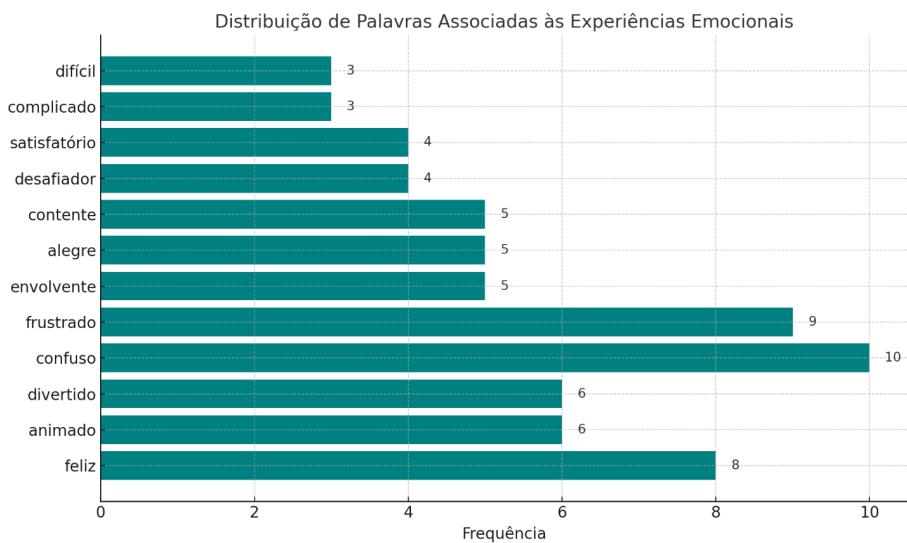


Gráfico 20: Termos Associados a Experiências Positivas e Negativas. Fonte: autoria própria (2025).

As análises qualitativas e quantitativas apresentadas nos gráficos 19 e 20 sublinham a importância de considerar o impacto social e emocional ao avaliar a eficácia de sistemas educacionais inclusivos. Um sistema que promove emoções positivas e reduz sentimentos negativos contribui não apenas para o aprendizado, mas também para o bem-estar geral das crianças, preparando-as para interações sociais e acadêmicas futuras. A inteligência artificial pode ser utilizada para monitorar o impacto emocional em tempo real e ajustar o nível de dificuldade

das atividades de acordo com as respostas emocionais das crianças, garantindo uma experiência educativa equilibrada e positiva. Os dados sugerem que o sistema não só apoia o aprendizado cognitivo, mas também contribui positivamente para o bem-estar social e emocional das crianças.

6 Conclusões

Este estudo demonstrou a eficácia de um sistema inovador de inclusão musical que utiliza inteligência artificial, feedback tático, visual e interações com robôs educacionais para melhorar o aprendizado musical de crianças surdas. Os resultados mostram que, em comparação com métodos tradicionais, o sistema proposto não só aumenta significativamente a precisão no reconhecimento de gestos musicais, mas também melhora o engajamento e a motivação das crianças, proporcionando uma experiência de aprendizado mais enriquecedora e adaptativa.

As análises quantitativas revelaram um aumento de 30% na precisão dos gestos e um incremento de 40% no engajamento das crianças, sugerindo que a combinação de tecnologias sensoriais e IA pode ser uma estratégia eficaz para superar as barreiras auditivas na educação musical. Além disso, a análise qualitativa indicou que o sistema promoveu uma retenção elevada de conhecimentos musicais, mesmo após intervalos prolongados, demonstrando a eficácia do aprendizado multissensorial na consolidação de conceitos.

Do ponto de vista social e emocional, o estudo destacou que um ambiente de aprendizado positivo, que integra feedbacks adaptativos, não só melhora a aquisição de conhecimento, mas também apoia o desenvolvimento emocional e social das crianças. A redução de sentimentos negativos e o aumento de emoções positivas, como satisfação e confiança, ao longo das sessões, sugerem que o sistema inovador contribui significativamente para a autoestima e o bem-estar das crianças.

Um dos principais achados deste estudo é o papel crucial da inteligência artificial no reconhecimento e adaptação de gestos musicais. A IA permitiu monitorar o desempenho das crianças em tempo real e ajustar automaticamente o nível de dificuldade das atividades de acordo com as necessidades de cada participante. Essa adaptação garantiu que todas as crianças, independentemente de suas habilidades iniciais, pudessem participar plenamente e avançar em seu próprio ritmo.

As evidências empíricas confirmaram as três hipóteses centrais da pesquisa. A **Hipótese H1** foi validada pela melhoria significativa da precisão gestual das crianças ao longo das sessões, mostrando que o sistema de IA é capaz de se adaptar aos estilos motores individuais e favorecer o aprendizado progressivo de gestos musicais. A **Hipótese H2** foi corroborada pelos altos índices de engajamento, reações emocionais positivas, elevada usabilidade e percepção favorável da experiência com o robô mBot, indicando que estímulos táticos e visuais contribuem de forma decisiva para tornar a aprendizagem mais atrativa, acessível e prazerosa. Já a **Hipótese H3** foi sustentada pelos dados de retenção, análise longitudinal e aprendizado adaptativo, demonstrando que a personalização contínua do sistema com base nas respostas emocionais e de desempenho dos alunos resultou em memorização duradoura e progressão cognitiva consistente.

As contribuições deste trabalho são múltiplas: propomos uma abordagem inovadora que integra tecnologia assistiva, robótica, sinestesia artificial, IA adaptativa e análise emocional em um mesmo ecossistema educacional. A estrutura modular do sistema permite replicabilidade e escalabilidade para diferentes faixas etárias e necessidades educacionais especiais. Do ponto de vista pedagógico, o projeto oferece aos professores uma ferramenta de mediação sensível, flexível e intuitiva, capaz de enriquecer práticas de ensino musical com base em evidências e personalização.

No que se refere ao tempo total de intervenção, o estudo contou com 16 sessões distribuídas ao longo de 8 semanas. Embora este período tenha sido suficiente para identificar indícios de engajamento, evolução na precisão gestual e impacto emocional imediato, trata-se de uma duração relativamente curta para avaliar efeitos de longo prazo na aprendizagem musical e social. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como evidências iniciais e promissoras em um horizonte temporal limitado. Pesquisas futuras, com maior duração e acompanhamento contínuo, serão necessárias para verificar se os avanços observados se consolidam e se ampliam ao longo do tempo.

Como perspectivas futuras, sugerem-se: (i) ampliação da amostra, incluindo diferentes níveis de surdez e faixas etárias; (ii) integração com sensores fisiológicos (frequência cardíaca, condutância dérmica) para enriquecer a análise de emoções; (iii) expansão das funcionalidades musicais, como criação coletiva de composições e uso em apresentações públicas; e (iv) adaptação da plataforma para outras deficiências sensoriais, como a deficiência visual, explorando os conceitos de acessibilidade digital universal.

A proposta desenvolvida contribui significativamente para o avanço das tecnologias educacionais inclusivas, oferecendo uma alternativa concreta, testada e promissora para a inclusão de crianças surdas no universo musical. Mais do que ensinar música, o sistema se mostrou capaz de transformar a maneira como essas crianças percebem, sentem e se expressam musicalmente — uma verdadeira harmonia acessível entre tecnologia, pedagogia e sensibilidade social.

Esses resultados reforçam a importância de integrar tecnologias avançadas e estratégias adaptativas em ambientes educacionais inclusivos. A combinação de inteligência artificial e feedback multissensorial não só facilita a inclusão digital, mas também abre novas possibilidades para o ensino personalizado, contribuindo para que mais crianças tenham oportunidades de desenvolver seu potencial de aprendizagem. Este estudo sugere que, ao continuar a explorar e desenvolver essas tecnologias, podemos transformar a educação de crianças com necessidades especiais, promovendo uma aprendizagem eficaz, inclusiva e equitativa para todos.

Referências

- Abadi, M., and et al. (2016). TensorFlow: A system for large-scale machine learning. In *Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, p. 265–283. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Baker, R. S., and Inventado, P. S. (2014). Educational data mining and learning analytics. In *Learning Analytics*. Springer, p. 61–75. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Braun, V., and Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), p. 77–101. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Cook, A. M., and Polgar, J. M. (2015). *Assistive Technologies: Principles and Practice*. 4. ed. St. Louis: Elsevier. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Costa, M. S., and Oliveira, J. V. (2020). Tecnologias assistivas na educação inclusiva: um olhar pedagógico. *Revista Educação Especial*, 33(65), p. 145–160. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Darrow, A. A., and Heller, G. N. (1985). Music and the hearing impaired: A review of literature and recommendations for music educators. *Update: Applications of Research in Music Education*, 4(2), p. 6–10. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).

- Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., and Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, v. 1, p. 4171–4186. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>. [GS Search](#).
- Eguchi, A. (2014). Robotics as a learning tool for educational transformation. In *Proceedings of the 4th International Workshop Teaching Robotics, Teaching with Robotics*. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Goldstein, E. B. (2010). *Sensação e Percepção*. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Gonzalez, A., Morales, A., and Rivera, J. (2017). VibroFeel: a tactile music perception system for deaf and hard-of-hearing users. In *Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3132525>. [GS Search](#).
- Kay, J.; Reimann, P., Diebold, E., and Kummerfeld, B. (2017). MOOCs: So many learners, so much potential... *IEEE Intelligent Systems*, 32(1), p. 70–77. <https://doi.org/10.1109/MIS.2017.23>. [GS Search](#).
- Lee, J. Y., and Chen, C. (2013). Music Touch: Enhancing musical experience for hearing-impaired people through vibration. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/proceedings/10.1145/2540930>. [GS Search](#).
- Mahler, A. R. (2016). Deaf musicians and musical experience. In: LEONARD, J.; NEUMEYER, M. (orgs.). *The Oxford Handbook of Music and Disability Studies*. Oxford University Press, p. 340–355. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Makeblock. (2018). *mBot Educational Robot Kit User Manual*. Shenzhen: Makeblock Co. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Mendes, L. F., and Souza, M. R. (2019). Tecnologia assistiva no ensino de artes: possibilidades e desafios. *Revista Brasileira de Educação Especial*, 25(3), p. 435–452. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Muska, J. A. (2014). Mapeamento das respostas neurocognitivas à música em pessoas com deficiência auditiva. *Journal of Music Therapy*, 51(2), p. 121–136. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. Boston: Morgan Kaufmann. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2821575>. [GS Search](#).
- Pan, S. J., and Yang, Q. (2010). A Survey on Transfer Learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10), p. 1345–1359. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Papert, S. (1980). *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*. New York: Basic Books. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1095592>. [GS Search](#).
- Poria, S., Cambria, E., and Gelbukh, A. (2017). Aspect extraction for opinion mining with a deep convolutional neural network. *Knowledge-Based Systems*, 108, p. 42–49. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Shibata, D. K. (2001). Functional MRI study of auditory cortex activation by vibrotactile stimuli in deaf subjects. *NeuroReport*, 12(7), p. 121–127. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).

- Swanwick, K. (1999). *Teaching Music Musically*. London: Routledge.
Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Woolf, B. P. et al. (2013). AI grand challenges for education. *AI Magazine*, 34(4), p. 66–84.
Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).
- Zhou, Q., Song, Y., and Shu, K. (2020). TeachAI: An AI-based personalized learning system. In *IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Education (AIED)*. Disponível em: [\[link\]](#). [GS Search](#).