

Projeto de Interface Assistiva para Brinquedo de Programar

Claudio L. Rhenns¹, André L. A. Raabe¹

¹Mestrado em Computação Aplicada –

Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI)– Itajaí – SC – Brazil

rhenns@edu.univali.br , raabe@univali.br

Abstract. Programmable toys enable the exploration of Computing concepts with children in Early Childhood Education and the early years of Elementary School. However, the inclusion of students with motor disabilities still limits their adoption. This paper presents the development and evaluation of an assistive interface for a programmable toy, consisting of an application with enlarged buttons and a physical module that mechanically actuates the robot. The process involved three design-based research cycles, allowing for a deeper understanding of the user and iterative refinement of the prototypes. As a result, the interface reduced motor barriers and increased user autonomy while preserving the toy's playful and educational nature. The study highlights the importance of inclusion in the design of educational artifacts.

Resumo. Brinquedos de programar permitem trabalhar conceitos de Computação com crianças da Educação Infantil e dos Anos Iniciais. Contudo, a inclusão de estudantes com deficiência motora ainda limita sua adoção. Este artigo apresenta o desenvolvimento e a avaliação de uma interface assistiva para um brinquedo programável, composta por um aplicativo com botões ampliados e um módulo físico que aciona o robô. O processo envolveu três ciclos de pesquisa baseada em design, permitindo compreender o usuário e refinar os protótipos. Como resultado, a interface reduziu barreiras motoras e ampliou a autonomia, mantendo o caráter lúdico e educacional. A pesquisa reforça a importância da inclusão no design de artefatos educacionais.

1. Introdução

O ensino de Computação na Educação Básica no Brasil tornou-se realidade após a homologação da Norma de Computação para a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) em 2022 [Brasil, 2022]. A norma detalha os conceitos e habilidades a serem desenvolvidos pelos estudantes, abrangendo desde a Educação Infantil até o Ensino Médio. Neste contexto, diversas redes educacionais iniciaram a implementação dos conteúdos e práticas de Computação e em paralelo muitos materiais e ferramentas de apoio passaram a ser concebidos e disponibilizados para educadores.

Em especial na Educação Infantil e nos Anos iniciais do Ensino Fundamental, abordagens de ensino que se apoiam na utilização de materiais concretos como a Computação desplugada e o uso de brinquedos robóticos tem se tornado alternativas viáveis para trabalhar os conceitos e práticas de Computação de forma lúdica e mais próxima da prática pedagógica dos docentes. A pesquisa sobre o uso de brinquedos de programar como Bee-Bot, Cubetto e RoPE evidencia que estes auxiliam crianças a desenvolverem diversas aprendizagens conectadas ao desenvolvimento da lógica e do Pensamento Computacional como a criação de algoritmos, a segmentação de problemas (decomposição), a realização de estimativas, trabalhar com trajetórias e formas

geométricas, desenvolvimento da lateralidade e etc. [Bers, 2018]. Contudo, tais recursos pressupõem habilidades motoras específicas para que as crianças possam interagir com a interface dos brinquedos, o que pode limitar a participação de estudantes com deficiência motora.

A literatura em tecnologias assistivas descreve fatores que impactam diretamente interações baseadas em botões pequenos ou ações sequenciais, como força, precisão manual e estabilidade postural [Cook & Polgar, 2014]. Crianças com tremores, espasticidade ou dificuldades de motricidade fina podem enfrentar barreiras para a interação com esses brinquedos, reforçando a importância de interfaces ampliadas ou mecanismos alternativos de acionamento.

Uma revisão conduzida por (Rhenns et. al, 2025) identificou que, dentre cinquenta e seis brinquedos de programar analisados, nenhum possuía mecanismos nativos de acessibilidade motora, indicando um descompasso entre avanços educacionais e princípios de inclusão previstos pela Lei Brasileira de Inclusão [Brasil, 2015]. Essa lacuna se torna ainda mais preocupante quando se considera o crescente papel dos brinquedos de programar na introdução de conceitos de Computação nas redes escolares. A inexistência de recursos assistivos projetados especificamente para esses dispositivos condiciona a participação de crianças com deficiência motora a improvisações ou mediações humanas constantes, o que reduz autonomia e participação ativa. A lacuna compromete princípios de equidade e dificulta a adoção de práticas de Computação que considerem a diversidade dos estudantes.

Diante desse cenário, este artigo apresenta um recurso educacional assistivo híbrido composto por: um módulo físico capaz de acionar remotamente os botões de um brinquedo de programar e uma interface digital acessível com botões ampliados, espaçamento adequado e estabilidade de uso. O projeto foi orientado por fundamentos de tecnologias assistivas [Cook & Polgar, 2014], princípios de acessibilidade motora [Lancioni et al., 2020] e diretrizes de design centrado no usuário, com base em observações realizadas em cenário real com um estudante classificado nos níveis II–III do Manual Ability Classification System (MACS II–III), faixas que descrevem dificuldades relevantes de preensão, estabilidade e coordenação fina durante atividades manuais. A abordagem adotada permitiu identificar barreiras concretas e realizar ajustes iterativos sem alterar a lógica de utilização do brinquedo, preservando seu caráter lúdico. A solução busca ampliar a participação de estudantes com deficiência motora em atividades de programação tangível, fortalecendo práticas inclusivas no ensino de Computação.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a metodologia adotada, fundamentada na pesquisa baseada em design, e descreve o brinquedo educacional RoPE; a Seção 3 reúne trabalhos relacionados; a Seção 4 detalha os três ciclos de desenvolvimento e as aprendizagens com o usuário; a Seção 5 discute as descobertas; e a Seção 6 apresenta conclusões e trabalhos futuros.

2. Método

O desenvolvimento do recurso assistivo apresentado neste trabalho foi orientado pelos princípios da Pesquisa baseada em design, ou Design-Based Research (DBR),

abordagem metodológica voltada à investigação de soluções educacionais em contextos reais. A DBR caracteriza-se pela realização de ciclos iterativos de análise, design, implementação e avaliação, nos quais o refinamento progressivo da solução emerge da interação entre teoria, prática e evidências coletadas durante o uso do artefato [DBR Collective, 2023].

No presente estudo, a DBR foi utilizada para orientar o processo de identificação de barreiras motoras, concepção do recurso assistivo e validação preliminar de sua aplicabilidade. A metodologia foi adotada não apenas como estratégia de teste, mas como estrutura de raciocínio projetual, onde cada ciclo permitiu observar dificuldades concretas de interação, gerar hipóteses de redesign e testar adaptações do recurso, aproximando o desenvolvimento tecnológico das necessidades reais dos usuários.

Nesta pesquisa, a abordagem de Design-Based Research (DBR) foi organizada em três ciclos iterativos, cada um composto por três fases complementares (Figura 1): (i) uma fase de design, na qual eram formuladas conjecturas e propostas soluções preliminares; (ii) uma fase de teste, dedicada à aplicação controlada do protótipo com o participante; e (iii) uma fase de reflexão, em que os dados coletados eram analisados para revisar a teoria de design e orientar o ciclo seguinte. A aplicação da DBR neste estudo garante que o recurso apresentado não é apenas um artefato tecnológico, mas o resultado de um processo sistemático de investigação situado, fundamentado em interações reais e orientado por princípios teóricos e pedagógicos.



Figura 1. Etapas de pesquisa em DBR utilizadas nesse trabalho

O brinquedo de programar selecionado para desenvolvimento da pesquisa é denominado RoPE (Robô Programável Educacional), desenvolvido no Laboratório de Inovação Tecnológica na Educação (LITE) da Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI) [Raabe et. al, 2027]. O RoPE é um brinquedo robótico feito de madeira que possui botões no topo (Figura 2) que permitem a inserção de comandos direcionais. A criança programa o robô diretamente pressionando os botões que representam ações como andar para frente ou para trás, girar à direita, girar à esquerda e executar. Após pressionar o botão executar, o robô se desloca executando a trajetória programada pela criança.



Figura 2. O brinquedo de programar RoPE

O uso educacional é potencializado com a utilização de tapetes temáticos representando micromundos onde as crianças podem explorar temas como letras, formas, números, histórias infantis, mapas, puzzles e outros que podem ser criados por professores, pais e terapeutas.[Angerami, Raabe & Rosário, 2022].

O RoPE foi selecionado por integrar um conjunto de brinquedos que utilizam botões físicos como principal forma de interação e por ter sido desenvolvido no contexto brasileiro [Viana, Santana & Raabe, 2018; Freitas & Fontoura, 2019]. Entretanto, o módulo acionador apresenta botões de dimensões reduzidas e posicionados próximos entre si, o que pode representar barreira para estudantes que apresentam tremores, espasticidade ou baixa precisão manual. Tal limitação contrasta com as diretrizes inclusivas estabelecidas na Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência [Brasil, 2015], que assegura o direito à acessibilidade em contextos educacionais.

3. Trabalhos Relacionados

Tecnologias Assistivas incluem dispositivos que ampliam o acesso de pessoas com deficiência motora a sistemas digitais, organizando-se em categorias como acesso direto, acionadores alternativos, varredura e mediações físicas ou digitais [Cook & Polgar, 2014]. A revisão realizada neste estudo serviu menos para identificar soluções aplicáveis diretamente a brinquedos programáveis e mais para extrair princípios de design que orientaram as conjecturas de cada ciclo da DBR.

Entre as tecnologias baseadas em acesso indireto, o PcEye [Tobii Dynavox, 2022] demonstra alta precisão por rastreamento ocular, mas custo e sensibilidade ambiental limitam sua adoção. Sistemas de comando de voz, como o XULIA [Losada González & Instituto Novo Ser, 2022], ampliam autonomia, embora dependam da clareza da fala e de ambientes silenciosos. Interfaces minimalistas como o MicroFênix [Borges & Mazzillo, 2004] mostram como a varredura pode permitir controle completo com um único acionamento, enquanto soluções de entrada física, como o Maltron Head/Mouth Stick Keyboard [Maltron Ltd., 2024], reduzem esforço de digitação, mas apresentam custos elevados e curva de adaptação. Tecnologias vestíveis como o Colibri

[TiX Tecnologia Assistiva, 2025] oferecem controle por micromovimentos da cabeça, porém não servem a usuários com instabilidade cervical.

Recursos ampliados, como o Teclado Inteligente TiX [UFMG & TiX, 2025], ilustram como grandes áreas de toque e combinações reduzidas podem beneficiar usuários com paralisia cerebral ou tremor essencial, ainda que com desafios de custo e aprendizagem. Soluções personalizáveis, como os interruptores têxteis de Cochrane et al. (2023), mostram caminhos de baixo custo e alta adaptabilidade. Já a plataforma modular de Proença et al. (2014) evidencia que acessadores intermediários podem mediar interações lúdicas com brinquedos físicos, mesmo sem terem sido projetados para dispositivos de programação sequencial.

No conjunto, os estudos analisados revelam princípios valiosos, como a ampliação de área de toque, redução da demanda de precisão fina, acionamento remoto, feedback multimodal e diferentes formas de mediação. Contudo, nenhuma das tecnologias revisadas foi concebida especificamente para mediar a interação com brinquedos programáveis tangíveis. Assim, mais do que soluções prontas, essas tecnologias funcionam como referências conceituais que orientam caminhos de adaptação. Nesse espaço ainda pouco explorado se posiciona a solução proposta neste artigo: uma interface assistiva híbrida (digital + mecânica) projetada para permitir que crianças com limitação de motricidade fina participem da programação do RoPE de forma autônoma, preservando sua lógica pedagógica e o caráter lúdico do brinquedo.

4. Resultados

4.1 Visão geral do processo de desenvolvimento

O recurso assistivo foi desenvolvido em três ciclos de DBR, cada um composto por fases de design, teste e reflexão. O primeiro ciclo identificou barreiras motoras na interação direta com os botões do RoPE. O segundo testou uma solução híbrida composta por um aplicativo com botões ampliados e um módulo remoto. O terceiro ciclo refinou esses elementos, resultando em uma interface estável, acessível e compatível com a experiência lúdica do brinquedo.

4.2 Ciclo 1 – Diagnóstico em Contexto

O primeiro ciclo teve como objetivo compreender, no ambiente real do usuário, quais barreiras motoras dificultavam a interação direta com o brinquedo RoPE em sua forma original. A observação ocorreu na residência do participante, um menino de 12 anos com paralisia cerebral do tipo diplegia espástica, condição que afeta especialmente a coordenação fina dos membros superiores. A participação foi autorizada pelos responsáveis mediante assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, garantindo a condução ética dos procedimentos.

O planejamento do Ciclo 1 concentrou-se na definição do protocolo de observação necessário para identificar, em uso real, as barreiras motoras impostas pela interface original do RoPE. Elaborou-se um mapa de conjectura inicial que pressupunha que a exigência de precisão manual do brinquedo restringia sua acessibilidade para usuários nos níveis II–III do MACS e que modalidades alternativas de entrada, como

áreas de toque ampliadas, mecanismos remotos de acionamento ou interfaces digitais, poderiam reduzir erros e ampliar autonomia. A partir dessa conjectura, estruturaram-se os instrumentos de coleta, tais como, cinco desafios graduais envolvendo deslocamentos e giros no tapete pedagógico (repetidos 2 vezes), uma planilha digital para registrar acertos, erros e ocorrências de acessibilidade, e uma ficha observacional em escala Likert destinada a captar conforto, engajamento e necessidade de apoio.

O protocolo definiu também as condições de aplicação, em que todos os desafios deveriam partir sempre da mesma casa do tapete, sendo a de número 18 escolhida por estar posicionada na base central do tapete (Figura 3), utilizando sequências entre três e seis comandos para permitir a observação tanto de erros espontâneos quanto de dificuldades estruturadas. Esse arranjo metodológico buscou isolar as demandas motoras do ato de programar, distinguindo as falhas decorrentes da interface física das relacionadas à compreensão da tarefa, fornecendo, assim, a base empírica que orientaria os ciclos subsequentes da DBR.



Figura 3. Demonstração de alguns dos desafios propostos durante os ciclos

O período de testes envolveu exploração livre, desafios dirigidos e uma dinâmica por comando de voz. A exploração permitiu observar dificuldades espontâneas, enquanto os ensaios de desafio evidenciaram dois padrões recorrentes de erro: cliques involuntários produzidos ao tentar centralizar o dedo em botões pequenos e deslocamento do RoPE causado pela força aplicada durante o toque. Esses problemas surgiram desde o início e se acentuaram em tarefas mais longas, o que motivou ajustes na planilha de registro. Apenas quatro tentativas chegaram ao destino correto, contudo, a maioria dos insucessos estava ligada às barreiras motoras geradas pela interface física e não à compreensão da lógica da atividade.

O teste por voz mostrou execução tecnicamente possível, mas o participante perdeu interesse rapidamente quando o contato tátil foi retirado, o que reduziu o apelo lúdico da experiência. A ficha observacional final registrou aspectos de motivação, conforto e esforço percebido, oferecendo subsídios para revisar a conjectura e orientar as decisões de design no ciclo seguinte.

A análise do Ciclo 1 indicou que as dificuldades observadas derivavam sobretudo de limitações biomecânicas, e não de compreensão da lógica do brinquedo. Embora o RoPE apresente elementos pedagógicos eficazes para apoiar a noção de sequência, sua interface física exige precisão fina incompatível com o perfil motor do participante, resultando em cliques involuntários e deslocamentos do robô. O teste por

voz reduziu rapidamente o interesse, em acordo com estudos que evidenciam que interfaces tangíveis tendem a manter a atenção infantil por mais tempo [Marshall, 2007; Price & Rogers, 2004; Antle & Wise, 2013].

Com base nessas evidências, a conjectura inicial foi revisada. Estudos sobre acessibilidade indicam que alvos maiores e mecanismos de rejeição de toques rápidos reduzem erros em usuários com tremor [Apple, 2024; Google, 2024; Irwin & Sesto, 2012], o que reforça a necessidade de ampliar a área de entrada e eliminar a transferência de força ao robô. A teoria de design derivada propõe manter o caráter tátil da interação, mas mediado por um dispositivo que redistribua o esforço físico, reduza a demanda de precisão e preserve os reforços sensoriais essenciais para o envolvimento com a tarefa. Espera-se, com isso, que crianças classificadas nos níveis II–III do MACS possam executar sequências completas com maior autonomia e menor frustração.

4.3 Ciclo 2 – Protótipo de Mediação Digital

O Ciclo 2 estruturou uma solução de acessibilidade em duas camadas, sendo elas, um aplicativo com botões virtuais ampliados e um módulo mecânico capaz de acionar fisicamente os botões do RoPE. Essa arquitetura respondeu diretamente às barreiras identificadas no Ciclo 1. O app, desenvolvido no MIT App Inventor, reproduziu as cores e funções dos comandos originais (Figura 4) e incorporou debounce de cerca de dois segundos, prevenindo repetições decorrentes de tremor. A sequência de comandos passou a ser armazenada internamente e enviada ao módulo remoto por Bluetooth Low Energy (BLE) apenas quando o botão verde é acionado. Em telas de tablet de 10 polegadas, os botões virtuais alcançaram aproximadamente 50 mm, ampliando a área de toque e atendendo às limitações motoras observadas no ciclo anterior.

O módulo físico batizado de B232, que faz referência ao nome e data de nascimento do usuário, foi construído inicialmente com LEGO Technic para permitir prototipagem ágil, integrou uma ESP32 com BLE e cinco servomotores MG90S, cada um dedicado ao acionamento de um botão do RoPE (Figura 4). Leve e montado por encaixe, o dispositivo não adicionou interferências mecânicas no funcionamento do brinquedo. Testes mostraram que peso, tração e giros permaneceram estáveis, garantindo que o protótipo não introduzisse novas barreiras. A combinação app+B232 redistribuiu o esforço motor para uma superfície fixa e ampliada, eliminou a transferência de força para o robô e reduziu erros de toque, configurando a primeira mediação físico-digital capaz de mitigar as limitações diagnosticadas no Ciclo 1 sem comprometer a experiência lúdica do brinquedo.

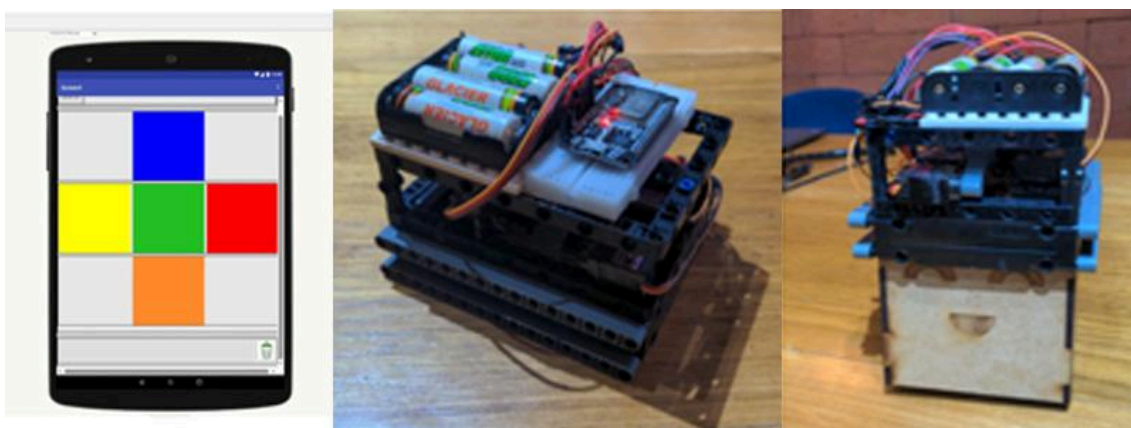


Figura 4. App e módulo remoto de acionamento desenvolvidos no ciclo 2

A aplicação do sistema tablet + B232 foi realizada no mesmo ambiente do Ciclo 1 e evidenciou alguns avanços. A taxa de acertos subiu de 40% para 70%, os cliques involuntários caíram de três para um caso isolado e os deslocamentos do robô desapareceram, confirmando que ampliar a área de toque e desacoplar o esforço motor elimina as principais barreiras identificadas inicialmente (Tabela 1). O único erro registrado decorreu de um toque simultâneo na tela, indicando que o espaçamento reduzido entre os botões virtuais ainda exige ajustes. A cobertura dos botões físicos pelo B232 também suprimiu pistas visuais importantes referentes aos botões coloridos no topo do brinquedo, gerando hesitações pontuais na orientação espacial. Apesar dessas limitações, o participante demonstrou alta adaptação ao novo sistema e preferência clara pela interface digital, consolidando o potencial da mediação físico-digital para superar barreiras motoras e orientando refinamentos incorporados no ciclo seguinte.

Tabela 1. Comparação de desempenho entre Ciclo 1 e Ciclo 2.

Métrica	Ciclo 1	Ciclo 2	Diferença
Execuções (n)	10	10	–
Acertos	4	7	+3
Cliques Involuntários	3	1	-2
Deslocamentos	4	0	-4

O ciclo 2 revelou duas limitações: o espaçamento entre os botões virtuais é insuficiente e o módulo B232 introduziu a perda das pistas visuais originais do RoPE devido à cobertura dos botões pelo módulo acoplado. Esses achados permitiram reorganizar o entendimento sobre o que precisava ser ajustado no recurso, indicando a necessidade de uma interface com botões mais espaçados, com manutenção do feedback multimodal e recuperação das indicações visuais de orientação do robô. A partir desse aprendizado, o ciclo seguinte passou a considerar que, ao consolidar um sistema físico

com área de toque ampliada e *debounce* preservado, os erros observados tenderiam a refletir apenas demandas cognitivas, e não mais limitações motoras.

4.4 Ciclo 3 – Protótipo Físico Aprimorado

No terceiro ciclo, o aplicativo recebeu maior espaçamento entre os botões virtuais, mantendo a aparência mais alinhada com a representada no corpo do brinquedo (Figura 5). Paralelamente, o módulo B232 foi redesenhado em software 3D e impresso em resina, substituindo a estrutura em *LEGO* por uma carcaça rígida, leve e protetiva. A nova tampa recebeu adesivos com as cores e posições dos botões originais, recuperando pistas visuais essenciais que haviam sido suprimidas no ciclo 2. O formato inspirado em um boné (Figura 5) introduziu um componente afetivo ao dispositivo, aumentando a identificação lúdica do participante e reforçando seu engajamento. O resultado é um módulo mais estável, visualmente claro e ergonomicamente adequado às necessidades motoras identificadas nos ciclos anteriores.



Figura 5. Nova interface do app e do módulo B2323

A apresentação do novo B232, agora com estética de “boné”, gerou interesse imediato no participante, que explorou o sistema de forma espontânea e motivada. Durante os desafios formais, não ocorreram cliques involuntários nem deslocamentos do robô, confirmando a eficácia do espaçamento ampliado no aplicativo e da estabilidade mecânica do módulo.

Embora o desempenho em sequências corretas tenha sido levemente inferior ao do ciclo anterior, essa variação refletiu a preferência do participante por interações mais livres e lúdicas, e não limitações de acessibilidade (Figura 6). A sessão transcorreu sem frustração ou fadiga, sugerindo que, com as barreiras motoras eliminadas, a atividade passa a enfatizar dimensões de exploração e expressão, consolidando a maturidade funcional e afetiva do protótipo.

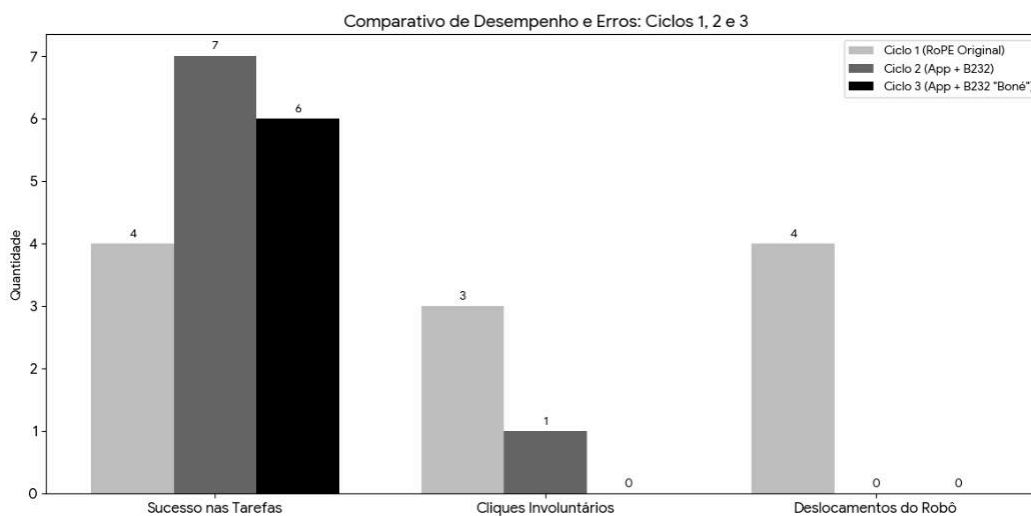


Figura 6. Comparativo de desempenho e erros motores entre os ciclos 1, 2 e 3.

Os resultados do terceiro ciclo confirmaram a consolidação de uma mediação físico-digital estável, capaz de eliminar completamente as barreiras motoras identificadas anteriormente. O espaçamento ampliado no aplicativo suprimiu toques involuntários, e a nova carcaça do B232 manteve a estabilidade mecânica enquanto restabelecia pistas visuais importantes para orientar o usuário. Com a ausência de deslocamentos, acionamentos duplicados e perdas de referência, o desempenho passou a refletir principalmente aspectos cognitivos, como atenção e planejamento, mostrando que as limitações remanescentes não estavam mais relacionadas à interface, mas ao próprio processo de construção da sequência.

O ciclo também destacou a relevância da dimensão afetiva. O formato de boné produziu identificação imediata e reforçou o engajamento espontâneo, mesmo fora dos desafios formais. A conjectura final resultante deste processo afirma que, quando uma interface assistiva combina estabilidade técnica, correspondência visual e elementos de identificação afetiva, a criança tende a interagir de forma mais autônoma e fluida, ainda que seu desempenho lógico-sequencial varie conforme suas capacidades cognitivas. Nessa perspectiva, o sucesso da mediação se expressa não somente pela precisão das sequências, mas pela continuidade do envolvimento, pela ausência de frustração e pela possibilidade real de participação plena na atividade de programação.

5. Discussão

Os três ciclos de desenvolvimento evidenciaram que as principais barreiras enfrentadas pelo participante não eram de natureza cognitiva, mas sim biomecânica, conforme sugerem estudos sobre interação tangível por crianças com limitações motoras [Cook & Polgar, 2014; Lancioni et al., 2020]. A análise longitudinal dos ciclos mostrou que o RoPE, embora pedagógico e lúdico, demanda um nível de precisão manual incompatível com os níveis II–III do MACS. A mediação físico-digital introduzida no Ciclo 2 e refinada no Ciclo 3 deu sustentação empírica à hipótese de que ampliar a área de toque, desacoplar o esforço físico e estabilizar o acionamento permite que a lógica da

programação emergisse sem ser obscurecida por erros motores. Dessa forma, o protótipo reposiciona o foco da atividade no raciocínio sequencial, aproximando a experiência do participante daquilo que brinquedos tangíveis originalmente pretendem oferecer.

Os resultados também sugerem que o caráter lúdico e a identificação afetiva interferem diretamente na qualidade da participação, fato já observado por pesquisas em computação tangível que destacam o papel do engajamento sensorial e emocional na aprendizagem [Marshall, 2007; Price & Rogers, 2004; Antle & Wise, 2013]. A introdução do formato de boné no Ciclo 3, embora sem modificar funcionalmente o dispositivo, ampliou motivação e interesse espontâneo, indicando que a acessibilidade não depende apenas de critérios técnicos, mas também de elementos de estética, familiaridade e pertencimento. Esse aspecto reforça perspectivas construcionistas que defendem que a aprendizagem se fortalece quando a criança se reconhece no artefato, o que contribui para a autonomia e para a continuidade da atividade. A forte adesão ao módulo reformulado sugere que soluções assistivas para brinquedos devem considerar não apenas a eliminação de barreiras, mas o reforço da identidade lúdica que sustenta o valor pedagógico do recurso.

Por fim, a consolidação do protótipo no Ciclo 3 evidencia que a mediação físico-digital pode se tornar um caminho viável para aproximar tecnologias assistivas do campo dos brinquedos programáveis, área em que ainda há poucas soluções específicas. A eliminação completa dos erros motores e o deslocamento da dificuldade para dimensões cognitivas mostram que o dispositivo não apenas restaurou condições mínimas de acesso, mas criou um ambiente de interação funcionalmente estável e emocionalmente atraente. Esses resultados sugerem que interfaces assistivas para brinquedos programáveis devem articular estabilidade técnica, coerência visual e elementos de engajamento, permitindo que crianças com deficiência motora participem da programação tangível de modo mais fluido. Nesse sentido, o estudo contribui para o debate sobre inclusão na aprendizagem de Computação ao demonstrar que adaptações bem desenhadas podem transformar uma prática originalmente excludente em uma oportunidade significativa de expressão, autonomia e participação plena.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou um recurso educacional assistivo híbrido que permite a participação de usuários com limitação de motricidade fina em atividades de programação tangível com o brinquedo de programar RoPE. A solução combina uma interface digital acessível, com botões ampliados e debounce, e um módulo físico capaz de acionar mecanicamente os comandos do brinquedo, eliminando a necessidade de precisão manual. A prova de conceito mostrou que o dispositivo supera barreiras motoras, aumenta a autonomia e torna a interação mais fluida, indicando que princípios de Tecnologias Assistivas podem ser aplicados de forma eficaz ao contexto dos brinquedos programáveis.

Do ponto de vista educacional, o recurso contribui para uma perspectiva inclusiva de Computação ao permitir que usuários com deficiência motora possam programar, experimentar e participar de atividades em condições mais equitativas. A arquitetura

modular e de baixo custo também favorece a replicação do sistema em contextos escolares que já utilizam brinquedos de programação.

Como o estudo foi conduzido com um único participante, com características e em contexto específicos e utilizou um único modelo de brinquedo programável, os resultados não permitem generalizações, configurando assim uma ameaça à validade externa da pesquisa. Cumpre salientar que se buscou adotar a Pesquisa Baseada em Design, pois esta lida com cenários naturalistas e com isso fortalece a validade interna do processo investigativo. Em síntese, o recurso proposto contribui para o avanço da Educação em Computação ao abrir caminho para a inclusão motora em ambientes tangíveis de aprendizagem e fornecer bases para o desenvolvimento de soluções inclusivas nas escolas brasileiras.

Uso de Inteligência Artificial Generativa

Ferramentas de Inteligência Artificial Generativa foram utilizadas exclusivamente para apoio à escrita e revisão textual deste artigo. Todo o conteúdo técnico, conceitual, empírico e metodológico apresentado neste artigo foi produzido pelos autores. As ferramentas de IA não foram usadas para gerar dados, análises, resultados ou referências, tampouco para substituir o julgamento acadêmico. Os autores permanecem integralmente responsáveis pela precisão e originalidade do trabalho.

Referências

- Antle, A. N., Wise, A. F. (2013). Getting down to details: Using theories of cognition and learning to inform tangible user interface design. *Interacting with Computers*, v. 25, n. 1, p. 1–20, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1093/iwc/iws007>.
- Angerami, P. , Raabe, A., Rosário. (2022). As aprendizagens desenvolvidas por crianças com o uso de brinquedos de programar. *Revista DIALOGIA*, N.40, p. 1-20, 2022.
- Apple. (2024). iOS accessibility for motor and touch interactions. Cupertino: Apple Inc., . Disponível em: <https://developer.apple.com/accessibility/>. Acesso em: 18 out. 2024.
- Bers, M. U. (2018). *Coding as a Playground: Programming and Computational Thinking in the Early Childhood Classroom*. Cambridge, MA: MIT Press, 2018.
- Borges, J. A., Mazzillo, T. A. (2004). *MicroFênix: um sistema de varredura para acesso ao computador*. Rio de Janeiro: NCE/UFRJ, 2004. Disponível em: <https://intervox.nce.ufrj.br/microfenix/>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- Brasil (2015). *Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015)*. Brasília, DF: Presidência da República, 2015.
- Brasil (2022). Conselho Nacional de Educação. Resolução CNE/CP nº 1, de 4 de outubro de 2022. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, p. 43–44, 5 out. 2022.
- Cochrane, K. A. et al. (2023). Adaptive soft switches: co-designing fabric adaptive switches with occupational therapists for children and adolescents with acquired brain injury. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON TANGIBLE, EMBEDDED, AND EMBODIED INTERACTION*, 17., 2023. *Proceedings... ACM*, 2023.
- Cook, A. M., Polgar, J. M. (2014). *Assistive Technologies: Principles and Practice*. 4. ed. St. Louis: Elsevier, 2014.
- Design-based Research Collective (2003). Design-based research: an emerging paradigm for educational inquiry. *Educational Researcher*, v. 32, n. 1, p. 5–8, 2003. DOI: <https://doi.org/10.3102/0013189X032001005>.
- Freitas, M. L., Fontoura, L. M. S. (2019). O uso do brinquedo programável RoPE como apoio ao pensamento computacional nos anos iniciais. In: *WORKSHOP DE INFORMÁTICA NA ESCOLA (WIE)*, 2019, Porto Alegre. *Anais [...]*. Porto Alegre: SBC, 2019.
- Google(2024). Accessibility guidelines for motor and touch impairments. Mountain View: Google, 2024. Disponível em: <https://developer.android.com/guide/topics/ui/accessibility/>. Acesso em: 05 abr. 2025.
- Irwin, C. B., Sesto, M. E., Chen, K. B., Chourasia, A. O., Wiegmann, D. A. (2012). Effect of touch screen button size and spacing on touch characteristics in individuals with and without motor control disabilities. *Human Factors*, v. 54, n. 3, p. 425–436, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1177/0018720811425249>.

- Lancioni, G. E., Sigafos, J., O'reilly, M. F.; Singh, N. N. (2020). *Technology-Based Assistive Tools for People with Disabilities*. Cham: Springer, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40612-0>.
- Losada González, A. (2022). *XULIA: comprehensive control system for Windows devices designed for people with tetraplegia*. Vigo: Universidade de Vigo, 2022.
- Maltron Ltd. (2025). *Head/Mouth Stick Keyboard*. Lancing: Maltron, 2024. Disponível em: <https://www.maltron.com/>. Acesso em: 15 mar. 2025.
- Marshall, P. (2007). Do tangible interfaces enhance learning? In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON TANGIBLE AND EMBEDDED INTERACTION (TEI '07)*, 1., 2007, Baton Rouge. Proceedings [...]. New York: ACM, 2007. p. 163–170. DOI: <https://doi.org/10.1145/1226969.1227004>.
- Price, S., Rogers, Y. (2004). Let's get physical: The learning benefits of interacting in digitally augmented physical spaces. *Computers & Education*, v. 43, n. 1–2, p. 137–151, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2003.12.009>.
- Proença, M. et al. (2014). Plataforma modular para adaptação de brinquedos com acesso alternativo. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA*, 24., 2014, Uberlândia. Anais [...]. Uberlândia: CBEB, 2014.
- Raabe, A., Rosário, T., Martins, R. (2017). *RoPE - Brinquedo de Programar e Plataforma de Aprender*. In: *XXIII Workshop de Informática na Escola*, 2017.
- Rhenns, C. L., Viana, C. P., Raabe, A. L. A. (2025). *Toward Smart Programmable Toys: A Comprehensive Analysis of Programmable Toy Interfaces*. *International Journal of Child-Computer Interaction*, no prelo, 2025.
- Tix Tecnologia Assistiva. (2023). *Colibri: mouse de cabeça por micromovimentos*. São Paulo: TiX, 2025. Disponível em: <https://tix.life/tecnologia-assistiva/colibri-mouse-de-cabeca/>. Acesso em: 15 mar. 2025.
- Tix Tecnologia Assistiva. (2025). *Teclado Inteligente TiX*. São Paulo: TiX, 2025. Disponível em: https://tix.life/categoria_aplicacoes/tix/. Acesso em: 15 mar. 2025.
- Tobii Dynavox. (2022). *PcEye: eye-tracking assistive device*. Danderyd: Tobii Dynavox, 2022. Disponível em: <https://www.tobiidynavox.com/>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- Viana, C. P.; Santana, A. L. M.; Raabe, A. L. A. (2018). Interface híbrida para brinquedos de programar RoPE. In: *COMPUTER ON THE BEACH*, 9., 2018, Itajaí. Anais [...]. Itajaí: UNIVALI, 2018. p. 967–969.