



Avaliação Exploratória de uma Interface Tangível Multimodal para Atividades com Mapas de Karnaugh

Jhully Signorini, UFPel, jhullygabriele@gmail.com,

<https://orcid.org/0009-0001-1441-5528>

Ana Carolina Nörnberg Konradt, UFPel, carolkonradt41@gmail.com,

<https://orcid.org/0009-0005-0682-0354>

Leomar Soares da Rosa Júnior, UFPel, leomarjr@inf.ufpel.edu.br,

<https://orcid.org/0000-0002-7150-5685>

Laura Quevedo Jurgina, UFPel, lqjurgina@inf.ufpel.edu.br,

<https://orcid.org/0000-0002-3050-8855>

Resumo: Este artigo apresenta o K-Touch, uma interface tangível multimodal desenvolvida para apoiar atividades com mapas de Karnaugh. O estudo parte da necessidade de recursos educacionais capazes de representar um conceito tradicionalmente visual e espacial por meio de interação tátil, sonora e visual. A pesquisa seguiu a Design Science Research e envolveu identificação do problema, concepção do artefato, implementação do protótipo e avaliação exploratória de usabilidade. O protótipo foi avaliado por 26 estudantes, dos quais 25 forneceram respostas válidas ao questionário System Usability Scale (SUS), e por um participante com deficiência visual, cuja sessão foi analisada separadamente. A pontuação SUS média dos estudantes foi de 81,9, enquanto o participante com deficiência visual atribuiu 75 pontos ao sistema. Os resultados indicam percepção positiva de usabilidade e mostram que a interface se adequa a atividades educacionais com usuários de diferentes perfis de interação. A avaliação identificou necessidades de melhoria relacionadas ao design físico, ao retorno dos botões, à diferenciação tátil e ao controle de áudio.

Palavras-chave: interface tangível; mapas de Karnaugh; acessibilidade; interação multimodal; avaliação de usabilidade

Development and Exploratory Evaluation of a Multimodal Tangible Interface for Karnaugh Map Activities

Abstract: This paper presents K-Touch, a multimodal tangible interface developed to support activities with Karnaugh maps. The study addresses the need for educational resources capable of representing a traditionally visual and spatial concept through tactile, auditory, and visual interaction. The research followed Design Science Research and involved problem identification, artifact conception, prototype implementation, and exploratory usability evaluation. The prototype was evaluated by 26 students, of whom 25 provided valid responses to the System Usability Scale (SUS), and by one participant with visual impairment, whose session was analyzed separately. The students obtained an average SUS score of 81.9, while the participant with visual impairment assigned 75 points to the system. The results indicate positive usability perception and show that the interface is suitable for educational activities involving users with different interaction profiles. The evaluation identified improvement needs related to physical design, button feedback, tactile differentiation, and audio control.



Keywords: tangible user interface; Karnaugh maps; accessibility; multimodal interaction; usability evaluation

1. Introdução

Disciplinas de lógica digital e circuitos digitais compõem a formação inicial de estudantes de Computação, Engenharia e áreas STEM. Nesses componentes curriculares, os mapas de Karnaugh são utilizados para simplificação de funções booleanas e para apoiar o raciocínio sobre circuitos combinacionais (Karnaugh, 1953). Por se tratar de uma representação visual e espacial, sua aprendizagem pode impor barreiras a estudantes que dependem de outras formas de percepção e limitar possibilidades de exploração física do conteúdo por usuários com diferentes perfis sensoriais e cognitivos.

O ensino tradicional de mapas de Karnaugh costuma depender de quadros, tabelas bidimensionais e marcações visuais de agrupamentos. Essa forma de apresentação pode restringir a participação de estudantes com deficiência visual e reduzir oportunidades de manipulação concreta do conteúdo por estudantes que se beneficiam da combinação entre recursos táteis, sonoros e visuais (de Lima et al., 2023; Jafri et al., 2022; Buehler et al., 2019). Esse cenário justifica a investigação de artefatos educacionais capazes de representar células, mintermos e agrupamentos por meio de interação multimodal, sem substituir a mediação docente.

Interfaces tangíveis de usuário permitem associar conceitos abstratos a objetos manipuláveis, aproximando informações digitais de ações físicas realizadas pelo usuário (Ishii e Ullmer, 1997; Shaer e Hornecker, 2010). No contexto deste estudo, uma interface tangível pode apoiar atividades com mapas de Karnaugh ao permitir que elementos do mapa sejam percebidos e manipulados por diferentes canais de interação. Essa abordagem permite discutir como estudantes e usuários com distintos modos de acesso compreendem tarefas, navegam pelo artefato e interpretam retornos fornecidos durante a resolução.

Embora existam ferramentas para apoio ao ensino de circuitos digitais e síntese lógica, parte delas concentra-se em interfaces gráficas ou em outros tópicos de circuitos, sem tratar mapas de Karnaugh por meio de uma interface tangível multimodal. Propostas voltadas à acessibilidade nem sempre articulam, em um mesmo artefato, manipulação física, retorno sonoro, retorno visual e identificação tátil. Essa lacuna motiva a concepção do K-Touch, um artefato educacional orientado por princípios de acessibilidade para apoiar atividades com mapas de Karnaugh.

Este artigo apresenta a concepção, a implementação e a avaliação exploratória de usabilidade do K-Touch, uma interface tangível multimodal para atividades com mapas de Karnaugh. A questão que orienta o estudo consiste em compreender como estudantes e um participante com deficiência visual avaliam a usabilidade de uma interface tangível multimodal durante a manipulação de atividades com mapas de Karnaugh. A avaliação não busca medir aprendizagem



m nem validar o artefato para toda a população de pessoas com deficiência visual; seu foco está na usabilidade percebida, na compreensão das tarefas e na identificação de demandas de redesign.

O artigo articula três dimensões: a concepção de um artefato educacional multimodal para um conteúdo tradicionalmente visual, a organização de decisões de design orientadas por acessibilidade e a discussão de uma avaliação exploratória de usabilidade com participantes de diferentes perfis de interação. Essa delimitação permite tratar o papel educacional do artefato com cautela metodológica e oferece base para avaliações futuras em contextos educacionais mais amplos.

2. Fundamentação e Trabalhos Relacionados

Interfaces tangíveis de usuário exploram a manipulação de objetos físicos como meio de interação com informações digitais (Ishii e Ullmer, 1997; Shaer e Hornecker, 2010). Em contextos educacionais, essa abordagem permite representar conceitos abstratos por meio de ações concretas, envolvendo percepção tátil, visual e sonora. Essa característica aproxima as TUIs de propostas educacionais voltadas à ampliação do acesso ao conteúdo, sobretudo quando o objeto de aprendizagem depende de organização espacial ou representação gráfica (Marshall, 2007; Antle e Corness, 2009).

No ensino de lógica digital, os mapas de Karnaugh são utilizados para simplificação de funções booleanas e para apoio ao raciocínio sobre circuitos combinacionais (Karnaugh, 1953; Uyemura, 2002; Tocci et al., 2011). A resolução desses mapas envolve identificação de células, análise de adjacências, formação de agrupamentos e interpretação da expressão minimizada. Por essa razão, o conteúdo costuma ser apresentado por meio de quadros, tabelas e marcações visuais. Essa dependência visual dificulta a participação de estudantes que utilizam outros canais de percepção e restringe experiências de manipulação física do conteúdo.

Ferramentas computacionais para o ensino de lógica digital e circuitos têm sido propostas em diferentes formatos. Karma (Klock et al., 2010), LogicFlow (Jurgina et al., 2020) e SwitchCraft (Callegaro et al., 2010) exemplificam recursos voltados ao apoio de conteúdos como minimização de funções booleanas, circuitos digitais e projeto de redes lógicas. Essas propostas demonstram a presença de iniciativas computacionais para apoiar a aprendizagem na área, mas diferem do presente estudo quanto ao tipo de interação e ao foco em acessibilidade multimodal. Em geral, tais ferramentas se concentram em interfaces gráficas ou em tarefas de simulação e construção, sem priorizar a manipulação tangível de mapas de Karnaugh.

Trabalhos sobre interfaces tangíveis para estudantes com deficiência visual indicam caminhos para representar conteúdos abstratos por meio de objetos manipuláveis. De Lima et al. (2023) desenvolveram uma TUI para apoio a estudantes cegos em conteúdos de Computação, incorporando elementos físicos e retorno sonoro. Beal e García (2020) investigaram o uso de recursos tangi



veis para introdução de mapas conceituais a estudantes com cegueira. Pires e t al. (2022) discutiram uma interface tangível para aprendizagem de matemática com crianças com deficiência visual e educadores, evidenciando a necessidade de avaliar o artefato com o público-alvo e com mediadores do processo educacional.

Outros estudos exploram TUIs e recursos acessíveis em atividades educacionais. Jafri et al. (2022) propuseram uma solução tangível para ensino de conceitos de formas a crianças com deficiência visual. Lotlikar et al. (2020) apresentaram blocos tangíveis para apoiar o pensamento lógico de aprendizes com deficiência visual. Castaneda et al. (2022) discutiram uma proposta de blocos tangíveis para programação, enquanto Sandoval-Bringas et al. (2020) investigaram interfaces tangíveis para ensino de Braille. Esses trabalhos reforçam a adoção de múltiplos canais de interação, mas não tratam diretamente da manipulação de mapas de Karnaugh.

A literatura discutida indica uma lacuna na articulação entre mapas de Karnaugh, interface tangível, retorno multimodal e princípios de acessibilidade em um mesmo artefato educacional. O K-Touch se posiciona nesse espaço ao propor uma interface tangível multimodal para atividades com mapas de Karnaugh, contemplando manipulação física, retorno visual e sonoro e identificação tátil. Diferentemente de uma ferramenta voltada apenas à pessoa com deficiência visual, o artefato foi concebido para apoiar usuários com diferentes perfis de interação, mantendo o foco em acessibilidade e avaliação exploratória de usabilidade.

3. Método e Desenvolvimento do K-Touch

Este estudo foi conduzido como uma pesquisa baseada em Design Science Research, orientada à concepção, construção e avaliação de um artefato educacional (Hevner e Chatterjee, 2010; Peffers et al., 2007). O artefato desenvolvido foi o K-Touch, uma interface tangível multimodal para atividades com mapas de Karnaugh. A avaliação relatada neste artigo teve caráter exploratório e concentrou-se na usabilidade percebida do protótipo, sem mensurar a aprendizagem ou validar o artefato para toda a população de pessoas com deficiência visual.

A organização metodológica contemplou quatro etapas: identificação do problema, definição de requisitos de design, construção do artefato e avaliação exploratória de usabilidade. Na primeira etapa, foram analisadas barreiras associadas ao ensino visual de mapas de Karnaugh e trabalhos relacionados sobre lógica digital, interfaces tangíveis e acessibilidade. Na segunda etapa, foram definidos requisitos para orientar a concepção do K-Touch, considerando manipulação física, retorno multimodal e identificação tátil. Na terceira etapa, foi construído um protótipo funcional. Na quarta etapa, foram conduzidas sessões de uso com estudantes e uma sessão individual com um participante com deficiência visual.



A adoção da Design Science Research foi adequada ao objetivo do estudo porque a pesquisa envolve a criação de um artefato para responder a um problema educacional situado. Nesse tipo de investigação, o conhecimento é produzido pela construção da solução e pela análise de seu uso em contexto de finido. No presente estudo, o problema investigado refere-se à dificuldade de representar mapas de Karnaugh, tradicionalmente visuais e espaciais, por meio de formas de interação acessíveis a usuários com diferentes perfis de percepção.

O ciclo seguido no estudo envolveu a definição do problema, a formulação de requisitos, a implementação do protótipo, a avaliação exploratória e a identificação de demandas de redesign. A avaliação foi posicionada como etapa inicial do ciclo de desenvolvimento, não como validação final do artefato.

3.1. Concepção e funcionamento do artefato

Os requisitos de design do K-Touch foram definidos a partir da literatura sobre interfaces tangíveis, acessibilidade e ensino de lógica digital. O primeiro requisito foi representar fisicamente elementos do Mapa de Karnaugh, de modo que o usuário pudesse manipular células e agrupamentos por meio de ações concretas. O segundo requisito foi oferecer retorno multimodal, combinando recursos táteis, visuais e sonoros para apoiar diferentes formas de percepção durante a resolução das atividades.

Outro requisito foi incluir identificação tátil em pontos de navegação e referência, com o objetivo de reduzir a dependência de instruções visuais. Buscou-se preservar a estrutura conceitual do Mapa de Karnaugh, mantendo a relação entre células, adjacências, agrupamentos e expressão minimizada. O artefato foi concebido como protótipo educacional de baixo custo relativo, com possibilidade de ajustes em ciclos posteriores de desenvolvimento.

Em razão de o artefato estar vinculado a processo de proteção tecnológica, este artigo descreve sua concepção em nível suficiente para compreensão científica da proposta, sem detalhar aspectos internos de implementação que permitam a reprodução direta do dispositivo.

O K-Touch foi concebido como uma interface tangível multimodal para apoiar atividades com mapas de Karnaugh. O artefato permite que o usuário interaja fisicamente com a representação do mapa, indique elementos associados à resolução do exercício e receba retorno sobre sua ação por diferentes canais sensoriais.

A concepção do protótipo passou por iterações de design. As primeiras versões foram avaliadas quanto à ergonomia, à disposição dos elementos de interação, à clareza das referências táteis e à coerência com a estrutura do conteúdo trabalhado. Com base nessas análises, a organização física do artefato foi ajustada para favorecer a navegação manual, a identificação dos elementos do mapa e o acompanhamento das etapas de resolução. A Figura 1 apresenta uma visão geral externa do protótipo K-Touch. A imagem situa o leitor

quanto à forma física do artefato, sem detalhar aspectos internos de implementação.

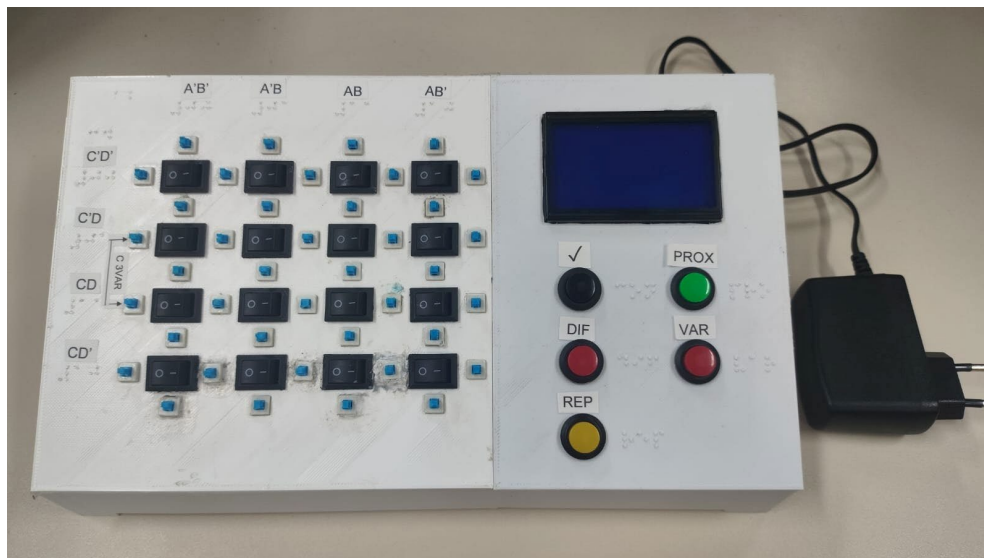


Figura 1 - Visão geral externa do protótipo K-Touch

O protótipo combina recursos físicos, sistema embarcado e retornos multimodais. A interface foi planejada para apoiar estudantes que utilizam retorno visual e usuários que dependem de referências táteis e sonoras. Essa decisão amplia as possibilidades de interação, sem caracterizar o artefato como solução já validada para todos os perfis de deficiência visual.

As atividades propostas no K-Touch mantêm a estrutura conceitual dos mapas de Karnaugh. O usuário recebe uma expressão ou exercício, identifica as células correspondentes, organiza os agrupamentos e solicita a conferência da resposta. Após a interação, o sistema apresenta retorno sobre a resolução e informa a expressão minimizada esperada.

Foram considerados exercícios com diferentes configurações de variáveis e níveis de dificuldade. Na avaliação relatada neste artigo, os participantes antes realizaram tarefas padronizadas para permitir comparação entre sessões. O foco da atividade não foi verificar desempenho acadêmico em lógica digital, mas observar se os participantes compreendiam a dinâmica de interação, conseguiam operar o protótipo e percebiam o retorno fornecido pelo sistema.

Durante a interação, o participante podia solicitar repetição das informações apresentadas, alterar parâmetros da atividade e retomar etapas da resolução. Esses recursos foram concebidos para reduzir a dependência de mediação externa e oferecer maior controle durante o uso do artefato.

3.2. Avaliação exploratória de usabilidade

A avaliação envolveu 26 estudantes da disciplina de Técnicas Digitais, organizados em 13 duplas de uso, e um participante com deficiência visual, egresso de curso da área de Computação. Entre os estudantes, 25 forneceram respostas válidas ao questionário SUS. Um estudante participou da sessão,



mas não preencheu o instrumento de avaliação, sendo desconsiderado nas análises quantitativas.

Os estudantes já haviam tido contato prévio com mapas de Karnaugh no mesmo semestre da avaliação. O participante com deficiência visual possuía formação em Computação e experiência anterior com recursos de acessibilidade, incluindo leitor de tela e representações digitais de apoio ao estudo. Por se tratar de uma única sessão individual, seus dados foram analisados separadamente dos estudantes.

As sessões com estudantes ocorreram em duplas, em ambiente reservado, com duração aproximada de dez minutos. Inicialmente, um membro da equipe apresentou o artefato, explicou sua relação com o Mapa de Karnaugh e demonstrou a correspondência entre os elementos físicos da interface e as etapas de resolução. Em seguida, cada dupla realizou dois exercícios padronizados, com possibilidade de exploração adicional após a tarefa obrigatória.

Ao final da sessão, os participantes responderam individualmente ao questionário System Usability Scale (SUS) e a uma questão aberta sobre críticas e sugestões (Brooke, 1995). A sessão com o participante com deficiência visual seguiu procedimento semelhante, com exploração guiada do artefato, realização de atividade e resposta ao instrumento de usabilidade. A análise desse caso foi conduzida de forma separada, em razão do caráter individual da avaliação.

A usabilidade percebida foi avaliada por meio da System Usability Scale, composta por dez itens em escala Likert de cinco pontos (Brooke, 1995). Para o cálculo do escore, nos itens positivos subtrai-se 1 da pontuação atribuída pelo respondente; nos itens negativos, subtrai-se a resposta de 5. A soma dos valores ajustados é multiplicada por 2,5, resultando em uma pontuação de 0 a 100.

Foram calculadas estatísticas descritivas para as respostas válidas dos estudantes, incluindo média, mediana, mínimo, máximo e desvio padrão. A distribuição das respostas por item foi analisada para identificar aspectos e específicos da interação com o protótipo. As respostas abertas foram agrupadas por proximidade temática, considerando comentários sobre design físico, retorno dos elementos de interação, controle de áudio e necessidade de adaptação inicial ao uso.

O escore do participante com deficiência visual foi analisado separadamente, acompanhado da interpretação qualitativa de sua sessão. Essa decisão evita generalizações indevidas a partir de um único participante e preserva o caráter exploratório da avaliação.

A participação ocorreu de forma voluntária, com apresentação prévia dos objetivos do estudo e das atividades previstas. Os participantes foram informados de que poderiam interromper sua participação a qualquer momento, sem prejuízo. Foram adotados cuidados de anonimização dos registros, preservação da confidencialidade das respostas e uso dos dados apenas para fins acadêmicos.



A avaliação não coletou dados sensíveis, exceto aqueles necessários à caracterização geral dos participantes e à análise de usabilidade. No caso do participante com deficiência

visual, sua identificação foi preservada e seus dados foram discutidos apenas de forma agregada ou descritiva, sem exposição nominal.

4. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados da avaliação exploratória de usabilidade do K-Touch. A discussão considera as respostas dos estudantes à System Usability Scale (SUS), as manifestações abertas registradas ao final das sessões e a avaliação individual realizada com o participante com deficiência visual. Os resultados são tratados como etapa inicial de avaliação do artefato, sem mensuração de aprendizagem.

4.1. Usabilidade percebida pelos estudantes

Entre os 26 estudantes que participaram das sessões de uso, 25 forneceram respostas válidas ao SUS. A pontuação média obtida foi de 81,9 pontos, com mediana de 85, desvio padrão de 13,87 e intervalo entre 42,5 e 100 pontos. De acordo com a interpretação proposta por Bangor et al. (2009), pontuações nessa faixa correspondem a uma avaliação positiva de usabilidade percebida.

No item relacionado à intenção de uso frequente, 80% dos estudantes assinalaram concordância parcial ou total. Houve concentração de respostas favoráveis em itens ligados à integração das funções e à confiança para uso do sistema. Esses dados indicam que, após a mediação inicial, a maior parte dos participantes compreendeu a lógica geral de interação com o artefato e conseguiu relacionar os elementos físicos da interface às etapas de resolução dos mapas de Karnaugh.

Apesar da média positiva, a dispersão dos escores indica que a experiência não foi homogênea entre todos os estudantes. O valor mínimo de 42,5 mostra que ao menos um participante avaliou o protótipo de forma mais restritiva. Esse resultado é coerente com as respostas abertas, nas quais foram relatadas dificuldades iniciais para compreender a marcação dos agrupamentos e para identificar o estado de determinados elementos físicos da interface.

As respostas abertas indicaram três demandas principais de redesign. A primeira envolve o retorno dos elementos usados na marcação dos agrupamentos. Alguns estudantes relataram dificuldade para distinguir estados ativados e desativados, o que aponta para a necessidade de maior diferenciação física ou visual. Essa demanda é compatível com a proposta multimodal do K-Touch, pois a manipulação física precisa oferecer retorno perceptível ao usuário.

A segunda demanda refere-se ao uso individual do áudio. A inclusão de suporte a fones de ouvido foi registrada como possibilidade para favorecer o

uso em ambientes compartilhados, como laboratórios e salas de aula. Como o retorno sonoro compõe a proposta de acessibilidade, seu controle pelo usuário deve ser tratado como requisito para versões futuras.

A terceira demanda diz respeito ao período inicial de adaptação. Alguns estudantes relataram dúvidas nas primeiras tentativas, mas indicaram compreensão progressiva após explorar o artefato. Esse resultado indica que o K-Touch deve ser acompanhado por uma etapa breve de orientação, na qual sejam explicadas as relações entre os elementos físicos da interface, as células do mapa, os agrupamentos e a expressão minimizada.

4.2. Avaliação individual com participante com deficiência visual

Na avaliação individual, o participante com deficiência visual atribuiu 75 pontos ao K-Touch no SUS. Esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois corresponde a uma única sessão e não permite generalização para pessoas com deficiência visual. O escore indica, no entanto, que o participante compreendeu a proposta geral do artefato e conseguiu interagir com suas funções principais.

A sessão individual permitiu identificar demandas específicas de acessibilidade. A principal delas foi a necessidade de maior diferenciação tátil entre estados ativados e desativados dos elementos físicos usados durante a resolução. Para usuários que dependem de exploração tátil, pequenas diferenças de altura, pressão ou retorno mecânico podem dificultar a identificação do estado atual da interface.

Outro ponto observado foi o controle da reprodução de áudio. O participante indicou a necessidade de pausar, retomar ou retroceder informações sonoras. Esse resultado mostra que o áudio não deve ser tratado apenas como transposição da informação visual, mas como canal de interação que precisa oferecer controle temporal ao usuário.

Foi registrada dificuldade no momento de reinicialização da atividade, sobretudo para confirmar se todos os elementos físicos haviam retornado ao estado esperado. Essa demanda indica a necessidade de um mecanismo de verificação do estado geral do artefato, capaz de informar ao usuário se a interface está pronta para uma nova resolução.

Os resultados indicam que o K-Touch recebeu avaliação positiva de usabilidade percebida entre os estudantes e escore favorável na sessão individual com o participante com deficiência visual. A média SUS de 81,9 mostra que os estudantes compreenderam a lógica geral de interação após mediação inicial. O escore 75 do participante com deficiência visual, analisado separadamente, registra compreensão da proposta em uma sessão individual, embora ainda sejam necessários ajustes de acessibilidade tátil e controle de áudio.

A avaliação reforça a pertinência de interfaces tangíveis multimodais para conteúdos tradicionalmente visuais, como os mapas de Karnaugh. Ao combinar manipulação física, retorno sonoro e retorno visual, o artefato amplia os modos de acesso à atividade. Os dados mostram, porém, que a presença de m



últiplos canais de interação não garante acessibilidade plena por si mesma. A qualidade do retorno tátil, a clareza dos estados físicos e o controle do áudio são condições decisivas para atender usuários com diferentes perfis de interação.

As demandas de redesign concentram-se em cinco pontos: maior diferenciação dos estados físicos da interface, melhoria do retorno dos elementos de agrupamento, controle mais refinado do áudio, possibilidade de uso individual com fones de ouvido e mecanismo de verificação do estado geral do artefato antes de nova atividade. Esses pontos orientam o próximo ciclo de desenvolvimento do K-Touch.

Os resultados precisam ser lidos dentro dos limites do estudo. A avaliação não mediu aprendizagem, não comparou o K-Touch com métodos tradicionais de ensino e envolveu apenas uma pessoa com deficiência visual. Desse modo, o estudo deve ser compreendido como avaliação exploratória de usabilidade, voltada à identificação de condições iniciais de uso e de demandas de redesign para versões futuras.

5. Conclusão

Este artigo apresentou o K-Touch, uma interface tangível multimodal desenvolvida para apoiar atividades com mapas de Karnaugh. A proposta foi concebida como artefato educacional orientado por princípios de acessibilidade, combinando manipulação física, retorno visual, retorno sonoro e identificação tátil para ampliar as formas de interação com um conteúdo tradicionalmente visual e espacial.

O desenvolvimento foi conduzido com base em Design Science Research, envolvendo identificação do problema, definição de requisitos de design, construção do protótipo e avaliação exploratória de usabilidade. A avaliação não teve como objetivo medir aprendizagem em lógica digital, nem validar o artefato para toda a população de pessoas com deficiência visual. Seu foco esteve na usabilidade percebida, na compreensão da dinâmica de interação e na identificação de demandas de redesign.

A avaliação com estudantes registrou percepção positiva de usabilidade. Entre os 26 estudantes participantes, 25 forneceram respostas válidas ao SUS, com média de 81,9 pontos, mediana de 85, desvio padrão de 13,87 e intervalo entre 42,5 e 100 pontos. Esses dados indicam que a maioria dos estudantes compreendeu a lógica geral de uso após mediação inicial e conseguiu relacionar os elementos físicos da interface às etapas de resolução dos mapas de Karnaugh.

A avaliação individual com o participante com deficiência visual resultou em escore SUS de 75 pontos. Esse resultado deve ser interpretado com cautela, por corresponder a uma única sessão. A interação permitiu identificar aspectos centrais para o aprimoramento do artefato, como maior diferenciação tátil entre estados ativados e desativados, controle mais refinado da r



eprodução de áudio e verificação do estado geral da interface antes do início de uma nova atividade.

O trabalho reúne a concepção de uma interface tangível multimodal para mapas de Karnaugh, a organização de decisões de design orientadas por acessibilidade e uma avaliação exploratória com usuários de diferentes perfis de interação. Essa combinação permite discutir o K-Touch como artefato educacional em estágio inicial de validação, sem extrapolar os limites dos dados coletados.

As limitações do estudo incluem o número reduzido de participantes com deficiência visual, a ausência de comparação com métodos tradicionais de ensino, a curta duração das sessões e a não mensuração de desempenho acadêmico antes e depois do uso do protótipo. Como o artefato está em processo de prototipagem tecnológica, a descrição técnica foi apresentada em nível controlado, preservando aspectos internos de implementação.

Como trabalhos futuros, pretende-se realizar novos ciclos de redesign e avaliação, com ampliação do número de participantes, inclusão de pessoas com diferentes perfis de deficiência visual e aplicação em contextos educacionais reais. Propõe-se, ainda, investigar o uso do K-Touch em atividades acompanhadas por docentes, analisar seu papel na compreensão de células, agrupamentos e expressões minimizadas e aprimorar os recursos de retorno tátil e sonoro. Com esses ciclos, o artefato poderá ser refinado como recurso complementar para o ensino de mapas de Karnaugh em práticas educacionais orientadas por acessibilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências de fomento à pesquisa: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), que viabilizaram a execução deste estudo.

Referências

- ANTLE, Alissa N.; CORNESS, Greg. Designing tangibles for learning: an empirical investigation. *Proceedings of the 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 1071-1080, 2009.
- BANGOR, Aaron; KORTUM, Philip; MILLER, James. Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale. *Journal of Usability Studies*, v. 4, n. 3, p. 114-123, 2009.
- BEAL, Franciele; GARCÍA, Laura Sánchez. Introduzindo mapas conceituais para estudantes com cegueira via recursos tangíveis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO, 31., 2020. *Anais do XXXI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação*. Porto Alegre: SBC, 2020. p. 682-691.



- BROOKE, John. SUS: a quick and dirty usability scale. In: JORDAN, Patrick W.; THOMAS, B.; McCLELLAND, Ian Lyall; WEERDMEESTER, Bernard (org.). *Usability Evaluation in Industry*. London: Taylor & Francis, 1996. p. 189-194.
- BUEHLER, Erin; HURST, Amy; HOFMANN, Megan. Making accessibility: inclusive 3D printing for children with visual impairments. *ACM Transactions on Accessible Computing*, v. 12, n. 3, p. 1-28, 2019.
- CALLEGARO, Vinicius; MARQUES, Felipe de Souza; KLOCK, Carlos Eduardo; ROSA J R., Leomar Soares da; RIBAS, Renato P.; REIS, André I. SwitchCraft: a framework for transistor network design. In: SYMPOSIUM ON INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS DESIGN, 23., 2010, São Paulo. *Proceedings of the 23rd Symposium on Integrated Circuits and Systems Design*. New York: ACM, 2010. p. 49-53.
- CASTANEDA, Jennifer Alejandra Cardenas; HUNG, Patrick C. K.; IQBAL, Farkhund; AHMAD, Rafiq. Towards a tangible blocky coding design for visually impaired children. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INCLUSIVE TECHNOLOGIES AND EDUCATION, 5., 2022, Cartago. *Proceedings of the 2022 International Conference on Inclusive Technologies and Education*. IEEE, 2022. p. 1-8.
- DE LIMA, Camila E.; MARCON, Marlon; ORTONCELLI, André R.; BEAL, Franciele. Desenvolvimento de uma interface tangível de usuário para auxílio de estudantes cegos em conteúdos de disciplinas da computação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO, 34., 2023. *Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Informática na Educação*. Porto Alegre: SBC, 2023. p. 972-982.
- HEVNER, Alan; CHATTERJEE, Samir. *Design Research in Information Systems: Theory and Practice*. New York: Springer Science+Business Media, 2010.
- ISHII, Hiroshi; ULLMER, Brygg. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In: ACM SIGCHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS, 1997, Atlanta. *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York: ACM, 1997. p. 234-241.
- JAFRI, Rabia; ALTHBITI, Shatha Musaed M.; ALATTAS, Nora Abdualrazaq A.; ALBRAIKI, Amal Abdullah A.; ALMUHAWWIS, Sarah Hassan A. Tac-Trace: a tangible user interface-based solution for teaching shape concepts to visually impaired children. *IEEE Access*, v. 10, p. 131153-131165, 2022.
- JURGINA, Laura; ZANANDREA, Régis; ROSA JÚNIOR, Leomar; MARQUES, Felipe. LogicFlow: uma ferramenta para o auxílio de ensino-aprendizagem de circuitos digitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO, 31., 2020. *Anais do XXXI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação*. Porto Alegre: SBC, 2020. p. 322-331.
- KARNAUGH, Maurice. The map method for synthesis of combinational logic circuits. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, v. 72, n. 9, p. 593-599, 1953.



KLOCK, Carlos; RIBAS, Renato; REIS, André. Karma: um ambiente para o aprendizado de síntese de funções Booleanas. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, v. 18, n. 2, p. 33-42, 2010.

LOTLIKAR, Priya C.; PATHAK, Deepak; HEROLD, P. C.; DASGUPTA, Chandan. Tangible flowchart blocks for fostering logical thinking in visually impaired learners. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED LEARNING TECHNOLOGIES, 20., 2020, Tartu. *Proceedings of the 2020 IEEE 20th International Conference on Advanced Learning Technologies*. IEEE, 2020. p. 266-268.

MARSHALL, Paul. Tangible interfaces for learning: a research framework. *International Journal of Human-Computer Studies*, v. 67, n. 1, p. 39-53, 2007.

PEFFERS, Ken; TUUNANEN, Tuure; ROTHENBERGER, Marcus; CHATTERJEE, S. A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007.

PIRES, Ana Cristina; BAKALA, Ewelina; GONZÁLEZ-PERILLI, Fernando; SANSONE, Gustavo; FLEISCHER, Bruno; MARICHAL, Sebastián; GUERREIRO, Tiago. Learning maths with a tangible user interface: lessons learned through participatory design with children with visual impairments and their educators. *International Journal of Child-Computer Interaction*, v. 32, p. 100382, 2022.

SANDOVAL-BRINGAS, J. Andrés; CARREÑO-LEÓN, Mónica A.; ENCINAS, Israel Durán; CARRILLO, Alejandro Leyva; COTA, Italia Estrada; CASTRO, Rafael Cosio. Using tangible interfaces for teaching Braille. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF INCLUSIVE TECHNOLOGY AND EDUCATION, 3., 2020, Baja California Sur. *Proceedings of the 2020 3rd International Conference of Inclusive Technology and Education*. IEEE, 2020. p. 128-132.

SHAER, Orit; HORNECKER, Eva. Tangible user interfaces: past, present, and future directions. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, v. 3, n. 1-2, p. 4-137, 2010.

TOCCI, Ronald J.; WIDMER, Neal S.; MOSS, Gregory L. *Digital Systems: Principles and Applications*. 11. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2011.

UYEMURA, John P. *CMOS Logic Circuit Design*. Boston: Springer, 2002.