

Desenvolvimento de um Dispositivo Vestível com Feedback Háptico para Auxílio à Mobilidade

Ana Carolyne Pereira de Souza¹,
Beatriz Gerogiannis Mendonça¹, Gustavo Teodoro Laureano¹

¹Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás

{ana.carolyne, beatriz.gerogiannis}@discente.ufg.br
{gustavolaureano}@ufg.br

Abstract. Assistive technologies for the mobility of blind people often present limitations such as high cost, poor ergonomics, or dependence on the auditory channel. This work presents the development of a low-cost wearable device, consisting of a bracelet with six haptic actuators, which aims to overcome these barriers. The main contribution lies in a hardware design with an optimized spacing of 2.5 cm between actuators to improve spatial acuity, addressing a limitation of previous work, and in a software architecture that employs a hybrid pattern logic. The system uses dynamic stimuli to signal moving obstacles and static ones for stationary objects, enriching the transmitted information. The result is a functional prototype, controlled by a Python graphical user interface and a C++ firmware, which demonstrates the feasibility of the approach as a discreet and ergonomic alternative for navigation.

Resumo. Tecnologias assistivas para mobilidade de pessoas cegas frequentemente apresentam limitações como alto custo, baixa ergonomia ou dependência do canal auditivo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo vestível de baixo custo, composto por um bracelete com seis atuadores hápticos, visando superar essas barreiras. A principal contribuição reside em um design de hardware com espaçamento otimizado de 2,5 cm entre os atuadores para melhorar a acuidade espacial, resolvendo uma limitação de trabalhos anteriores, e em uma arquitetura de software que emprega uma lógica de padrões híbrida. O sistema utiliza estímulos dinâmicos para sinalizar obstáculos em movimento e estáticos para objetos imóveis, enriquecendo a informação transmitida. O resultado é um protótipo funcional, controlado por uma interface gráfica em Python e um firmware em C++, que demonstra a viabilidade da abordagem como uma alternativa discreta e ergonômica para a navegação.

1. Introdução

A trajetória da tecnologia assistiva acompanha a própria história da humanidade, com registros de adaptações rudimentares desde a Antiguidade, como próteses artesanais e instrumentos de apoio voltado à mobilidade de pessoas com deficiência. Durante o século XX, esse campo passou por avanços significativos, especialmente em decorrência da Segunda Guerra Mundial [HELPVOX CONNECT sd], que motivou a criação de próteses mais sofisticadas e dispositivos de locomoção, frente à urgente necessidade de reabilitar os veteranos de combate.

Atualmente, mesmo após diversos marcos históricos no que tange à garantia de tecnologias assistivas [Kalscheur 1992], [da República 2004], diversas pessoas ainda continuam enfrentando problemas em relação ao acesso delas [Souza 2018]. Diante desse cenário, diversas iniciativas já foram propostas para ampliar a autonomia de pessoas cegas ou com baixa visão por meio de tecnologias assistivas. Contudo, muitas dessas soluções apresentam limitações práticas, como custo elevado, baixa usabilidade ou desempenho insatisfatórios em contextos reais.

Uma das soluções propostas é o *Orcam MyEye 2.0* [Nguyen et al. 2022], um dispositivo com uma câmera acoplada a óculos que converte texto em áudio. Apesar de inovador, seu acesso é limitado por um custo elevado [National Library Service for the Blind and Print Disabled (NLS) 2025]. Além disso, sua principal desvantagem reside na dependência do canal auditivo, um importante sentido para a navegação e percepção espacial de pessoas cegas, além de comprometer a privacidade do usuário com alertas sonoros em público.

Outra alternativa é a bengala inteligente *WeWalk* [Silva and outros 2023], que utiliza sensores ultrassônicos para detectar obstáculos aéreos. Embora seja uma solução inovadora, seu uso prático apresenta desafios ergonômicos, podendo causar fadiga muscular devido à necessidade de manter o braço constantemente elevado. Adicionalmente, seu campo de detecção é restrito a obstáculos frontais, o que reduz sua eficácia em ambientes com maior complexidade espacial.

Essas limitações evidenciam a importância de explorar alternativas que preservem a percepção auditiva, sejam ergonômicas e que promovam maior discríção no uso cotidiano. Nesse sentido, os estímulos vibrotáteis surgem como uma solução promissora, uma vez que fornecem informações relevantes sem comprometer a audição nem expor verbalmente suas interações com o ambiente.

Estudos têm demonstrado o potencial dos estímulos vibrotáteis em contextos de navegação. Por exemplo, [Oakley et al. 2006], [Rekimoto 2001], [Bosman et al. 2003] investigaram a viabilidade de dispositivos vibrotáteis no antebraço, com resultados positivos. Os estudos também apontam que a disposição espacial dos atuadores e a área de contato influenciam a percepção da intensidade do estímulo. Ademais, os trabalhos validam a eficácia de dispositivos vestíveis, como pulseiras no antebraço, demonstrando que eles não interferem em tarefas diárias e contribuem para a redução de erros na navegação. Além disso, o trabalho apresentado por [Katzschmann et al. 2018] introduziu o ALVU, um sistema que utiliza um cinto com sensores LiDAR e atuadores hápticos no abdômen, mostrando que um arranjo de múltiplos atuadores pode guiar usuários cegos de forma segura.

O sucesso dos sistemas com *feedback* háptico se devem à combinação da disposição espacial dos atuadores e também do design de padrões de vibração. Os estudos apresentados por [Yeganeh et al. 2023] e [Paneels et al. 2013] evidenciam que a maneira com que os estímulos são apresentados interfere diretamente no reconhecimento e na associação dos padrões. Padrões estacionários tendem a passar despercebidos com o tempo, enquanto que estímulos que incorporam padrões dinâmicos apresentam um reconhecimento significativamente maior em relação aos estáticos. O estudo introduzido por Paneels *et al.* também revela em sua conclusão que a curta distância entre os motores

dificultava a distinção precisa dos padrões, sugerindo que o design físico da interface tátil é tão importante quanto os próprios padrões [Paneels et al. 2013].

Com base no panorama apresentado, este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo háptico para auxiliar a mobilidade de pessoas cegas, apresentando uma solução construída com componentes de baixo custo e uma estrutura construída com impressora 3D. O trabalho avança em relação ao trabalho proposto por [Paneels et al. 2013] ao abordar diretamente suas limitações: primeiro, aprimorar a disposição dos atuadores a fim de garantir uma clara distinção dos estímulos. Segundo, implementando uma lógica híbrida que emprega padrões estáticos de forma situacional, para complementar os dinâmicos. O objetivo é oferecer uma ferramenta mais intuitiva, ergonômica e que amplie a autonomia e inclusão social dos seus usuários.

Este trabalho será dividido em cinco seções. Inicialmente, a Seção 2 apresenta os princípios de design de sistema háptico e o fluxo adotado. Em seguida, Seção 3 apresenta o hardware do dispositivo (bracelete e atuadores) e descreve a arquitetura de software e comunicação cliente-servidor. A Seção 4 exibe os padrões vibrotáteis implementados, o funcionamento da interface gráfica e compara o design proposto com a literatura existente. Finalmente, a seção 5 resume as principais contribuições do estudo e apresenta as frentes de expansão, como integração do projeto com visão computacional e testes de usabilidade.

2. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho seguiu um processo estruturado, o qual se iniciou com um levantamento bibliográfico para fundamentar o projeto. Em seguida, foi realizado um projeto digital do dispositivo, logo após, o desenvolvimento do protótipo físico e a implementação da interface de controle. A etapa de validação consistiu na definição de cenários de teste, seguida pela realização de ensaios práticos e adaptações no protótipo. As etapas da metodologia deste trabalho são ilustradas no fluxograma da Figura 1.

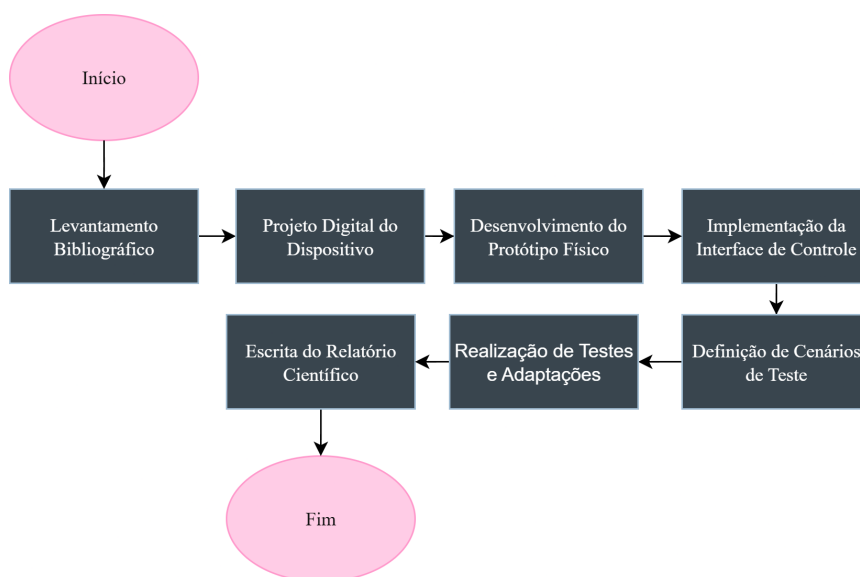


Figura 1. Fluxograma da metodologia adotada.

2.1. Princípios de Design do Sistema Háptico

De acordo com [Gault 1924], o sentido tátil é um canal robusto para a percepção humana e a eficácia de uma interface vibrotátil depende de fatores perceptivos chave. O design do nosso protótipo foi baseado em duas propriedades importantes no que tange à percepção tátil [Choi and Kuchenbecker 2012]: a acuidade temporal e a acuidade espacial. A acuidade espacial, a habilidade de localizar um estímulo na pele, valida o uso de um arranjo com múltiplos atuadores para fornecer informações direcionais. A acuidade temporal, a alta sensibilidade do tato a mudanças no tempo, é o que permite diferenciar padrões que variam sequencialmente.

Com base nisso, nosso sistema emprega uma abordagem híbrida que utiliza tanto padrões estáticos quanto dinâmicos para codificar diferentes tipos de informação conforme [Paneels et al. 2013]. Padrões estáticos, onde a ativação espacial permanece constante, foram designados para sinalizar a presença de obstáculos imóveis. Em contrapartida, padrões dinâmicos, que variam ao longo do tempo em sequência ou intensidade, foram utilizados para indicar obstáculos em movimento. Sendo assim, essa escolha de design permite que o usuário não apenas detecte um objeto, mas também compreenda sua natureza, auxiliando seu poder de tomada de decisão durante a locomoção.

3. Desenvolvimento do Protótipo e Arquitetura do Sistema

3.1. Apresentação do protótipo

O protótipo desenvolvido neste trabalho é um dispositivo vestível, projetado para ser usado no antebraço. Ele consiste em um bracelete com seis atuadores de vibração que emitem padrões táteis, incluindo seis pré-definidos (estáticos e dinâmicos) e a possibilidade de criação de novos padrões pelo usuário. O bracelete é conectado a um segundo módulo, que abriga o microcontrolador, uma bateria e o circuito eletrônico de acionamento. Veja na Figura 2 abaixo o projeto digital pensado inicialmente para o dispositivo:

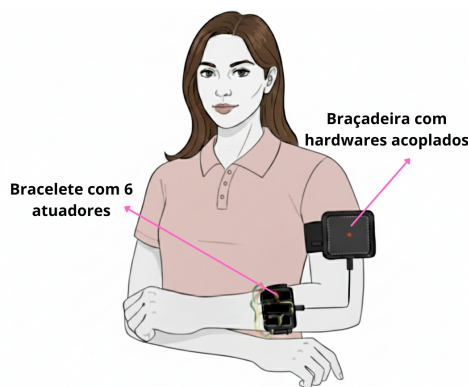
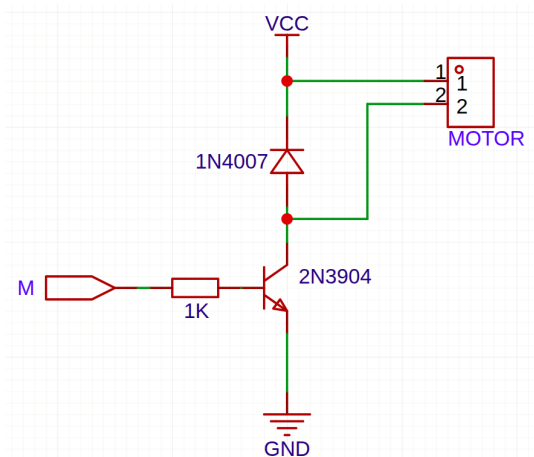


Figura 2. Protótipo digital do projeto.

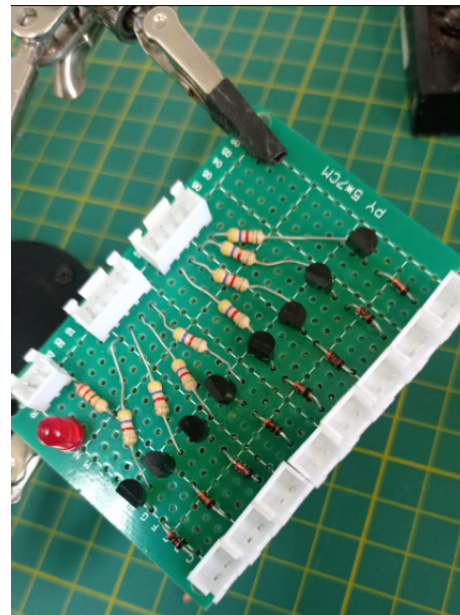
O dispositivo desenvolvido funciona como um atuador háptico programável, o qual reage com padrões de vibração mediante comandos via comunicação serial, independente dos sensores ou outros sistemas usados para a percepção do ambiente. Dessa forma, o protótipo abre margem para explorar várias frentes de percepção do ambiente, tais como sensores ultrassônicos de distância, câmeras de profundidade (RGB-D), LiDAR e radar.

3.2. Hardware do Dispositivo

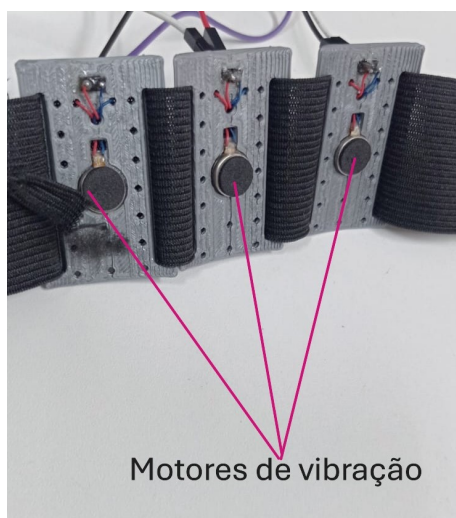
Para acionar os motores, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso (PCI) com oito canais independentes. Cada canal é controlado por um transistor Bipolar de Junção (BJT), o qual atua como uma chave eletrônica, e é protegido por um diodo de *flyback* para suprimir picos de tensão. A Figura 3 apresenta, respectivamente, o circuito de acionamento para um único motor, o qual foi replicado para os oito canais, a montagem final do circuito, a disposição entre os atuadores, onde foi utilizado em espaçamento de 2,5 cm entre cada atuador e, finalmente, a montagem final do dispositivo, com os atuadores interligados ao bracelete.



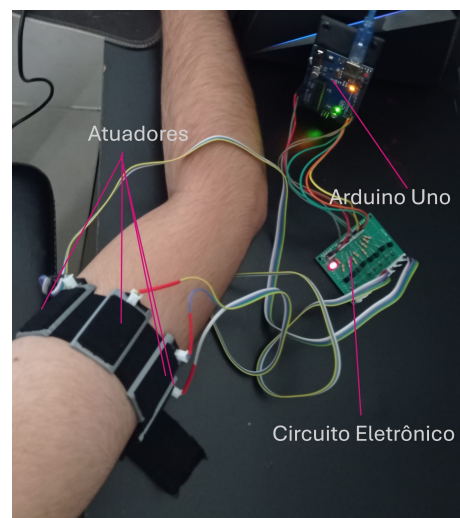
(a) Esquema eletrônico para acionamento do motor de vibração.



(b) Montagem final do circuito.



(c) Disposição dos atuadores.



(d) Configuração Final do dispositivo com seis atuadores.

Figura 3. Componentes principais e montagem do dispositivo. Subfigura (a) Esquema eletrônico; (b) Montagem do circuito; (c) Disposição dos motores; (d) Configuração final.

4. Resultados e Discussão

Esta seção detalha os resultados alcançados no desenvolvimento do protótipo, abordando tanto os aspectos de software quanto os padrões de interação. O capítulo inicia com a descrição da arquitetura de software e comunicação adotada, seguido pela apresentação dos padrões vibrotáteis desenvolvidos e o funcionamento da interface gráfica. Por fim, o design do protótipo e as soluções implementadas são discutidos e comparados com a literatura existente a respeito da acuidade espacial e da lógica de padrões.

4.1. Arquitetura de Software e Comunicação

A interação com o dispositivo é gerenciada por uma arquitetura cliente-servidor. O Cliente (*Front-End*) é uma Interface Gráfica do Usuário (GUI) desenvolvida em *Python 3* com a biblioteca *Tkinter*. Essa interface permite que o usuário selecione padrões pré-definidos ou crie novas sequências vibrotáteis de forma intuitiva, abstraindo a complexidade do controle de hardware. Já o servidor (*Back-End*) foi implementado no firmware do Arduino Uno, em linguagem C++, o qual opera de forma reativa, recebendo comandos pela porta serial e traduzindo-os em sinais PWM para controlar a intensidade e duração da vibração de cada motor. Tal camada de abstração de hardware encapsula o controle direto dos pinos de GPIO e a temporização dos eventos. A comunicação entre o cliente e o servidor ocorre via interface serial assíncrona (9600 bps). Os comandos são serializados em strings de texto, permitindo que qualquer cliente compatível possa controlar o bracelete. O código-fonte completo do projeto está disponível publicamente no GitHub: <https://github.com/Assistive-Robotics/haptic-controller>. A interface gráfica resultante é ilustrada na Figura 4, que apresenta o menu principal, a ferramenta de criação de padrões e a de seleção de padrões, respectivamente.



Figura 4. Telas principais da Interface Gráfica (GUI).

4.2. Implementação dos Padrões Vibrotáteis

Como enunciado na Subseção 2.1, este trabalho adotou o princípio de que eventos que implicam movimento, como o deslocamento de objetos no entorno do usuário, são representados por padrões dinâmicos. Esta escolha de design aproveita a capacidade intrínseca desta classe de padrões de gerar perceptos de movimento aparente sobre a pele, criando assim uma analogia intuitiva e de fácil interpretação com o evento real. Em contrapartida, a sinalização de obstáculos imóveis foi mapeada para padrões estáticos, cuja codificação primariamente espacial reforça a natureza estacionária e localizada do objeto a ser evitado. A partir desta diretriz de design, que associa a dinâmica do estímulo à dinâmica do evento, foram criados os seguintes padrões pré-definidos mostrados na Tabela 1:

Tabela 1. Padrões Hápticos Desenvolvidos e Seus Princípios de Design.

Padrão	Objetivo Semântico	Princípio de Design Háptico
Padrão 1: Movimento Direita	Notificar o usuário sobre um evento ou obstáculo dinâmico que se desloca da esquerda para a direita.	Explora o fenômeno do movimento aparente tátil, em que a ativação sequencial de atuadores (A0 a A5) gera a percepção de um estímulo contínuo e direcional.
Padrão 2: Movimento Esquerda	Notificar sobre um evento ou obstáculo dinâmico que se desloca da direita para a esquerda.	Semelhante ao Padrão 1, mas com a sequência de ativação invertida (A5 a A0) para comunicar o movimento no sentido contrário.
Padrão 3: Bi-direcional	Informar sobre a presença de obstáculos estáticos em ambos os lados (esquerda e direita) do usuário simultaneamente.	Usa codificação espacial simétrica e simultânea (A0 + A5) e repetição temporal para aumentar a saliência perceptual de uma barreira.
Padrão 4: Perigo	Transmitir um alerta de alta prioridade ou uma condição de perigo que exige atenção imediata.	Combina longa duração (270ms), pausas curtas e estímulo bilateral repetido e alternado (A0+A5, depois A1+A4, etc.) para maximizar a urgência perceptual e o nível de estresse.
Padrão 5: Estático Direita	Fornecer um alerta sobre a presença de objeto estático no lado direito do usuário.	Baseado em codificação espacial direta (apenas atuador A5, o mais à direita), com longa duração (520ms) para reforço.
Padrão 6: Estático Esquerda	Fornecer um alerta sobre a presença de objeto estático no lado esquerdo do usuário.	Semelhante ao Padrão 5, mas aplicado de forma simétrica no lado esquerdo (atuador A0).

Para facilitar a compreensão da sequência de acionamento dos atuadores, a Tabela 2 apresenta, passo a passo, o acionamento de cada motor, incluindo os intervalos de pausa

e a duração total de cada padrão pré-programado.

Tabela 2. Detalhamento dos padrões de vibração pré-definidos.

Padrão	Tipo	Sequência de Acionamento (Atuador, Duração)
1: Mov. Direita	D	(A0, 60ms) → P(20ms) → (A1, 80ms) → P(20ms) → (A2, 100ms) → P(20ms) → (A3, 100ms) → P(20ms) → (A4, 100ms) → P(20ms) → (A5, 200ms)
2: Mov. Esquerda	D	(A5, 60ms) → (A4, 80ms) → P(20ms) → (A3, 100ms) → P(20ms) → (A2, 100ms) → P(20ms) → (A1, 100ms) → P(20ms) → (A0, 200ms) → P(20ms)
3: Bidirecional	E	(A0+A5, 270ms) → P(150ms) → (A0+A5, 270ms)
4: Perigo	D	(A0+A5, 270ms) → P(50ms) → (A1+A4, 270ms) → P(50ms) → (A0+A5, 240ms) → P(50ms) → (A1+A4, 270ms)
5: Estático Dir.	E	(A0, 520ms)
6: Estático Esq.	E	(A5, 520ms)

P: Pausa; A0-A5: Atuadores; (A0+A5): Ativação simultânea; D: Dinâmico; E: Estático.

4.3. Discussão e Comparação com a Literatura

O design do protótipo foi concebido para endereçar limitações específicas identificadas em trabalhos anteriores e em soluções comerciais. Em contraste com soluções que utilizam o canal auditivo, como *Orcam MyEye* [Nguyen et al. 2022], nosso dispositivo preserva a audição do usuário, garantindo maior privacidade ao não emitir alertas sonoros.

Quando comparado à bengala inteligente *WeWalk* [Silva and outros 2023], o formato do bracelete oferece uma solução mais discreta e ergonômica para o uso contínuo, além de não causar fadiga muscular associada à necessidade de manter o braço em uma posição específica. Ademais, a construção final do dispositivo foi baseada em componentes de baixo custo, tornando a solução mais acessível. No que tange à distribuição dos atuadores e acuidade espacial, a principal inovação no design do hardware reside na disposição dos atuadores.

O trabalho de [Paneels et al. 2013], que serviu como base para este projeto, identificou que a curta distância entre os atuadores dificultou a distinção precisa dos padrões. Para solucionar esse impasse, nosso protótipo adotou um espaçamento de 2,5 cm entre cada atuador. Finalmente, o design dos estímulos foi refinado. Embora a literatura confirme que padrões de vibração dinâmicos são mais identificáveis que os estáticos, nosso sistema adota os padrões estáticos de forma situacional. Essa abordagem híbrida permite codificar uma camada extra de informação ao utilizar padrões dinâmicos para objetos em movimento e estáticos para obstáculos imóveis. Com isso, o sistema não só melhora a capacidade do usuário de distinguir os padrões, mas também enriquece a semântica da informação transmitida.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou o projeto, o desenvolvimento e a validação funcional de um protótipo de dispositivo vestível de baixo custo, composto por um bracelete com seis atuadores hápticos, para auxiliar a mobilidade de pessoas com deficiência visual. O sistema se destaca por duas contribuições principais: um design de hardware com espaçamento otimizado entre os atuadores (2,5 cm) para superar as limitações de distinção de padrões identificadas em trabalhos anteriores; e uma arquitetura de software que emprega uma lógica de padrões híbrida, utilizando estímulos dinâmicos para representar objetos em movimento e estáticos para obstáculos imóveis. O protótipo funcional, controlado por uma interface gráfica intuitiva, demonstra a viabilidade da abordagem e serve como uma plataforma robusta para futuras investigações.

Os resultados promissores desta fase inicial abrem caminho para diversas expansões. Como trabalhos futuros, procura-se aprimorar o protótipo em quatro frentes principais. Inicialmente, busca-se fazer a integração do atual projeto com percepção computacional, ligando o bracelete a uma câmera e utilizando algoritmos de visão para detectar e classificar obstáculos em tempo real. Em seguida, serão realizados estudos de usabilidades com usuários (pessoas cegas ou com baixa visão) para validar a eficácia e a intuitividade dos padrões. Outro ponto importante é a miniaturização e portabilidade do dispositivo, que será refinado com a troca do microcontrolador por um modelo menor (como ESP32 ou Arduino Nano), a inclusão de uma bateria recarregável e o encapsulamento da parte eletrônica. Finalmente, o desenvolvimento de uma interface acessível que seja compatível com leitores de tela, comando de voz e *feedback* sonoro para o público-alvo.

Referências

- [Bosman et al. 2003] Bosman, S., Groenendaal, B., Findlater, J.-W., Visser, T., de Graaf, M., and Markopoulos, P. (2003). Gentleguide: An exploration of haptic output for indoors pedestrian guidance. In *International Conference on Mobile Human-Computer Interaction*, pages 358–362. Springer.
- [Choi and Kuchenbecker 2012] Choi, S. and Kuchenbecker, K. J. (2012). Vibrotactile display: Perception, technology, and applications. *Proceedings of the IEEE*, 101(9):2093–2104.
- [da República 2004] da República, B. P. (2004). Decreto nº 5.296, de 2 de dezembro de 2004. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5296.htm. Acesso em: 25 ago. 2025.
- [Gault 1924] Gault, R. H. (1924). Progress in experiments on tactual interpretation of oral speech. *The Journal of Abnormal Psychology and Social Psychology*, 19(2):155.
- [HELPVOX CONNECT sd] HELPVOX CONNECT (s.d.). História e desenvolvimento de tecnologias assistivas. <https://helpvoxconnect.com.br/glossario/historia-e-desenvolvimento-de-tecnologias-assistivas/>. Acesso em: 31 maio 2025.
- [Kalscheur 1992] Kalscheur, J. A. (1992). Benefits of the americans with disabilities act of 1990 for children and adolescents with disabilities. *The American Journal of Occupational Therapy*, 46(5):419–426.

- [Katzschmann et al. 2018] Katzschmann, R. K., Araki, B., and Rus, D. (2018). Safe local navigation for visually impaired users with a time-of-flight and haptic feedback device. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(3):583–593.
- [National Library Service for the Blind and Print Disabled (NLS) 2025] National Library Service for the Blind and Print Disabled (NLS) (2025). Assistive technology products for information access. <https://www.loc.gov/nls/services-and-resources/informational-publications/assistive-technology-products-information-access/>. Acesso em: 31 maio 2025.
- [Nguyen et al. 2022] Nguyen, X.-T.-A., Koopman, J., van Genderen, M. M., Stam, H. L., and Boon, C. J. (2022). Artificial vision: the effectiveness of the orcam in patients with advanced inherited retinal dystrophies. *Acta Ophthalmologica*, 100(4):e986–e993.
- [Oakley et al. 2006] Oakley, I., Kim, Y., Lee, J., and Ryu, J. (2006). Determining the feasibility of forearm mounted vibrotactile displays. In *2006 14th symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, pages 27–34. IEEE.
- [Paneels et al. 2013] Paneels, S., Anastassova, M., Strachan, S., Van, S. P., Sivacoumarane, S., and Bolzmacher, C. (2013). What’s around me? multi-actuator haptic feedback on the wrist. In *2013 World Haptics Conference (WHC)*, pages 407–412. IEEE.
- [Rekimoto 2001] Rekimoto, J. (2001). Gesturewrist and gesturepad: Unobtrusive wearable interaction devices. In *Proceedings Fifth International Symposium on Wearable Computers*, pages 21–27. IEEE.
- [Silva and outros 2023] Silva, N. O. d. and outros (2023). Análises de dispositivos assistivos para auxílio de caminhada para pessoas com deficiências visuais. Instituto Federal Goiano. Trabalho acadêmico.
- [Souza 2018] Souza, J. B. d. (2018). Cegueira, acessibilidade e inclusão: apontamentos de uma trajetória. *Psicologia: Ciência e Profissão*, 38:564–571.
- [Yeganeh et al. 2023] Yeganeh, N., Makarov, I., Kristjánsson, Á., and Unnthorsson, R. (2023). Discrimination accuracy of sequential versus simultaneous vibrotactile stimulation on the forearm. *Applied Sciences*, 14(1):43.