

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA ELETRÔNICA**

**BENGALA ELETRÔNICA:**  
**TECNOLOGIA ASSISTIVA PARA DEFICIENTES VISUAIS**

**MANAUS**  
**2025**

**THAYLA MOURA DA SILVA**

**BENGALA ELETRÔNICA:  
TECNOLOGIA ASSISTIVA PARA DEFICIENTES VISUAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica Eletrônica da Universidade  
Federal do Amazonas (UFAM), como requisito para  
obtenção do título de 2025.

**ORIENTADOR: PROF. DR. CELSO BARBOSA CARVALHO**

**MANAUS**

**2025**

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

---

S586b Silva, Thayla Moura da  
Bengala eletrônica: tecnologia assistiva para deficientes visuais / Thayla Moura da Silva. - 2025.  
63 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Celso Barbosa Carvalho.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Manaus, 2025.

1. Bengala eletrônica. 2. Deficiência visual. 3. Tecnologia assistiva. 4. Acessibilidade. I. Carvalho, Celso Barbosa. II. Universidade Federal do Amazonas. Faculdade de Tecnologia. Curso de Engenharia Elétrica. III. Título

---

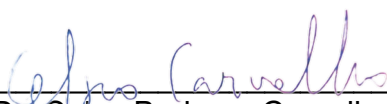
THAYLA MOURA DA SILVA

BENGALA ELETRÔNICA:  
TECNOLOGIA ASSISTIVA PARA DEFICIENTES VISUAIS

Monografia apresentada à  
Coordenação do Curso de  
Engenharia Elétrica Eletrônica da  
Universidade Federal do Amazonas,  
como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do grau  
em Bacharel em Engenharia Elétrica  
Eletrônica.

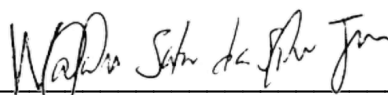
Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 12 de dezembro de  
2025.

BANCA EXAMINADORA



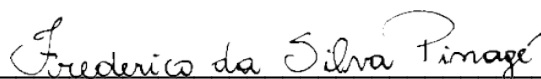
---

Prof. Dr. Celso Barbosa Carvalho - UFAM  
Orientadora



---

Prof. Dr. Waldir Sabino da Silva Júnior - UFAM  
Avaliador



---

Prof. Dr. Frederico da Silva Pinagé - UFAM  
Avaliador

Dedico esse a Deus, o qual guia os meus passos e a minha amada família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ter sido meu sustento e a maior fonte de força ao longo da graduação. À minha família, em especial à minha mãe, Lucicleia Moura, e ao meu pai, José Maria da Silva, pelo apoio, incentivo e sábios conselhos. Ao meu esposo, Gabriel Freitas, pelo companheirismo, apoio constante durante essa jornada acadêmica e pelas palavras de incentivo e conforto.

Expresso minha gratidão ao Dr. Celso Carvalho pela orientação na etapa de conclusão deste curso, ao Dr. Thiago Brito, orientador no Projeto Super, do qual tive a oportunidade de participar durante anos, e ao Dr. Waldir Sabino pela orientação durante o estágio supervisionado. Estendo meus agradecimentos aos demais professores da Faculdade de Tecnologia, com os quais tive a honra de conviver e aprender ao longo da graduação.

Agradeço, ainda, aos meus amigos de faculdade, que estiveram ao meu lado, oferecendo apoio e incentivo nos momentos mais difíceis.

Eu não sei por quais caminhos Deus me  
conduz, mas conheço bem o meu guia.  
*(Martinho Lutero)*

## RESUMO

A autonomia e a inclusão social de pessoas com deficiência visual representam um desafio contínuo, no qual a Tecnologia Assistiva (TA) desempenha um papel crucial no desenvolvimento de soluções inovadoras. Embora a bengala longa seja um recurso fundamental de locomoção, ela apresenta uma limitação significativa na detecção de obstáculos suspensos acima da linha da cintura, como galhos, placas e outros objetos que comprometem a segurança do usuário. Diante dessa lacuna, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) estabeleceu como objetivo geral o desenvolvimento de um protótipo de Bengala Eletrônica de baixo custo, capaz de identificar e alertar o usuário sobre a presença de obstáculos tanto abaixo quanto, principalmente, acima da cintura.

A metodologia empregada concentrou-se no projeto e na construção de um sistema embarcado eficiente. Para tal, utilizou-se o microcontrolador ESP32, selecionado por sua reconhecida eficiência e baixo consumo energético. A detecção de obstáculos foi realizada por meio de sensores ultrassônicos (HC-SR04), posicionados estrategicamente no dispositivo. O sistema de alerta foi concebido para fornecer um feedback tátil discreto e imediato, implementado através de um motor vibratório (Vibracall 1027), que sinaliza a proximidade de um objeto ao usuário.

Os resultados práticos obtidos demonstraram a eficácia do protótipo na detecção de obstáculos em diferentes ambientes, validando a funcionalidade do sistema de alerta tátil. A escolha da altura de 1,5 metros para a instalação do sensor se mostrou satisfatória para a detecção de obstáculos suspensos, reforçando a capacidade do dispositivo de aumentar significativamente a segurança e a autonomia na locomoção do usuário.

Palavras-chave: Bengala eletrônica; Deficiência visual; Tecnologia assistiva; Acessibilidade; Sensor ultrassônico.

## **ABSTRACT**

The autonomy and social inclusion of visually impaired people represent a continuous challenge, in which Assistive Technology (AT) plays a crucial role in the development of innovative solutions. Although the long cane is a fundamental mobility aid, it presents a significant limitation in detecting suspended obstacles above the waistline, such as branches, signs, and other objects that compromise user safety. Given this gap, this Final Project (TCC) established as its general objective the development of a low-cost Electronic Cane prototype, capable of identifying and alerting the user to the presence of obstacles both below and, primarily, above the waist.

The methodology employed focused on the design and construction of an efficient embedded system. For this purpose, the ESP32 microcontroller was used, selected for its recognized efficiency and low energy consumption. Obstacle detection was performed using ultrasonic sensors (HC-SR04), strategically positioned on the device. The alert system was designed to provide discrete and immediate tactile feedback, implemented through a vibrating motor (Vibracall 1027), which signals the proximity of an object to the user.

The practical results obtained demonstrated the effectiveness of the prototype in detecting obstacles in different environments, validating the functionality of the tactile alert system. The choice of a 1.5-meter height for sensor installation proved satisfactory for the detection of suspended obstacles, reinforcing the device's capacity to significantly increase safety and autonomy in user mobility.

**Keywords:** Visual impairment; Electronic cane; Assistive technology; Accessibility; Ultrasonic sensor.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	14
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO .....	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1	DEFICIÊNCIA VISUAL .....	16
2.2	MOBILIDADE.....	17
2.3	TECNOLOGIA ASSISTIVA.....	18
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONANDOS.....</b>	<b>20</b>
3.1	TECNOLOGIA ASSISTIVA: BENGALA ELETRÔNICA MICROCONTROLADA PARA NAVEGAÇÃO DE DEFICIENTES VISUAIS.	20
3.2	ENHANCED SMART STICK DESIGN FOR VISUALLY IMPAIRED.....	22
3.3	A CANE-MOUNTED SYSTEM FOR DYNAMIC ORIENTATION PREDICTION FOR CORRECTING INCORRECT CANE-TAPPING BY VISUALLY CHALLENGED PERSONS .....	23
3.4	DISPOSITIVO PARA AUXÍLIO DE DEFICIENTES VISUAIS UTILIZANDO SENSOR ULTRASSONICO .....	24
3.5	CONTRIBUIÇÕES E DIFERENCIAIS DO TRABALHO.....	25
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
4.1	ABORDAGEM DO PROJETO .....	28
4.2	SELEÇÃO DOS COMPONENTES .....	30
<b>4.2.1</b>	<b>Microcontroladores .....</b>	<b>32</b>
4.2.1.1	<i>ESP32 .....</i>	32
<b>4.2.2</b>	<b>SENSOR.....</b>	<b>34</b>
4.2.2.1	<i>SENSOR ULTRASSÔNICO .....</i>	34
<b>4.2.3</b>	<b>ATUADORES .....</b>	<b>36</b>
4.2.3.1	<i>MOTOR VIBRADOR .....</i>	37
<b>4.2.4</b>	<b>SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO .....</b>	<b>38</b>
4.2.4.1	<i>MÓDULO TP4056 .....</i>	38
4.2.4.2	<i>BATERIA RECARREGÁVEL .....</i>	39
4.3	MONTAGEM DO HARDWARE .....	40

4.3.1	<b>Integração dos Sensores Ultrassônicos ao Microcontrolador ESP32 .....</b>	<b>43</b>
4.3.2	<b>Conexão do Motor de Vibração .....</b>	<b>45</b>
4.3.3	<b>Conexão da bateria mais o Módulo TP4056 .....</b>	<b>45</b>
4.4	<b>MONTAGEM DO SOFTWARE .....</b>	<b>46</b>
4.4.1	<b>FUNÇÃO LOOP.....</b>	<b>46</b>
4.4.2	<b>LEITURA DO ULTRASSÔNICO .....</b>	<b>47</b>
4.4.3	<b>CONTROLAR A VIBRAÇÃO .....</b>	<b>48</b>
4.5	<b>MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO .....</b>	<b>49</b>
5	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
5.1	<b>AMBIENTE CONTROLADO.....</b>	<b>52</b>
5.1.1	<b>Calibração em 1,0 metro .....</b>	<b>53</b>
5.1.2	<b>Calibração em 1,5 metros.....</b>	<b>54</b>
5.2	<b>AMBIENTE REAL.....</b>	<b>55</b>
5.2.1	<b>Calibração em 1,0 metro .....</b>	<b>56</b>
5.2.2	<b>Calibração em 1,5 metros.....</b>	<b>57</b>
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Layout do sistema “Tecnologia assistiva: bengala eletrônica microcontrolada para navegação de deficientes visuais” .....	21
Figura 2 - Diagrama “Enhanced Smart Stick Design for Visually Impaired” .....	22
Figura 3 - Arquitetura do sistema “a cane- mounted system for dynamic orientation for correcting incorrect cane-tapping by visually challenged persons” .....	24
Figura 4 - Esquema do circuito “Dispositivo para auxílio de deficiente visuais utilizando sensor ultrassônico” .....	25
Figura 5 - Fluxograma metodológico .....	29
Figura 6 - Microcontrolador ESP32 .....	33
Figura 7 - Sensor ultrassônico .....	35
Figura 8 - Princípio de funcionamento do sensor ultrassônico HC-SR04.....	35
Figura 9 - Área de detecção do sensor HC-SR04 .....	36
Figura 10 - Vibracall 1027.....	38
Figura 11 - Módulo TP4056 .....	39
Figura 12 - Bateria recarregável 3.7V .....	40
Figura 13 - Sistema esquemático para o protótipo bengala inteligente.....	41
Figura 14 - Conjunto de alimentação e controle do protótipo.....	42
Figura 15 - Protótipo bengala eletrônica .....	43
Figura 16 - Detecção de dois sensores .....	44
Figura 17 - Código executado na função loop.....	47
Figura 18 - Leitura do sensor ultrassônico .....	48
Figura 19 - Controle de vibração.....	49
Figura 20 - Teste de detecção de portas de vidro. ....	53

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Comparativo de Tecnologias Assistivas para Deficientes Visuais na Literatura....	26
Tabela 2 - Componentes .....	31
Tabela 3 - Métricas de desempenho ambiente controlado (Calibração de 1,0 metro) .....	54
Tabela 4 - Métricas de desempenho ambiente controlado (Calibração de 1,5 metros).....	55
Tabela 5 - Métricas de desempenho ambiente real (Calibração de 1,0 metro) .....	56
Tabela 6 - Métricas de desempenho ambiente real (Calibração de 1,5 metros).....	57

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com os dados do IBGE 2022, mais da metade da população de deficientes do Brasil tem alguma dificuldade para enxergar, valor este que chega a atingir cerca de 7,9 milhões de pessoas que relatam não conseguir ver adequadamente mesmo com auxílio de óculos, o que evidencia a dimensão dos obstáculos para a autonomia e a inclusão social. Esse obstáculo fez com que a legislação brasileira pudesse evoluir, com o objetivo de promover iniciativas como o direito à mobilidade, à acessibilidade e a criação de ambientes amigáveis. Conforme destacam (TUMA; MATHIAS JUNIOR; PENHA, 2023), a intenção dessas políticas públicas é remover as limitações físicas e sociais, garantindo a plena participação de todos os cidadãos.

Nesse contexto a Tecnologia Assistiva (TA) surge para apresenta métodos para pessoas com deficiência, com objetivo de lhes dar autonomia e inclusão social (SANTOS et al., 2017). Essa ferramenta auxilia uma porcentagem de pessoas que possuem dificuldades em atividades simples do dia a dia, mas que por conta da deficiência não são capazes.

A Lei Brasileira de Inclusão (LBI) destaca a Tecnologia Assistiva como um direito indispensável às pessoas com deficiência. De acordo com Andrade (2024), além de garantir um sistema educacional inclusivo e a oferta de formação continuada, a LBI prevê em seu Art. 74 o acesso a dispositivos e recursos de TA. Essa garantia busca ampliar a mobilidade, a autonomia e o bem-estar, promovendo tanto a cidadania quanto a integração no mercado de trabalho.

Com os avanços da tecnologia digital e da inteligência artificial, surgiram soluções que ampliam ou substituem métodos tradicionais de auxílio. Entre elas destacam-se: óculos inteligentes, que reconhecem objetos, rostos e textos; pulseiras com sensores, que detectam obstáculos por meio de vibrações; bengalas inteligentes, que utilizam câmeras e sensores para identificar barreiras no ambiente; e aplicativos de celular, que oferecem desde análise de luminosidade até suporte remoto de voluntários via chamada de vídeo.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Diante desse cenário de constante inovação, o debate sobre acessibilidade tornou-se cada vez mais relevante. Esse termo diz respeito à adaptação de ambientes e ferramentas para garantir que indivíduos com diferentes tipos de deficiência sejam elas físicas, sensoriais ou intelectuais, consigam realizar tarefas de maneira independente. Entre os diversos grupos que enfrentam obstáculos no uso de tecnologias digitais, destacam-se as pessoas com deficiência visual, que constituem o foco principal deste estudo.

Este trabalho desenvolveu um protótipo de auxílio para pessoas com deficiência visual, utilizando um microcontrolador integrado a sensores ultrassônico para identificar obstáculos localizados abaixo e acima da cintura. A detecção é processada pelo sistema, que aciona um módulo vibratório responsável por alertar o usuário por meio de estímulos táteis.

Além disso, o protótipo foi concebido de forma portátil, de baixo custo e fácil adaptação, buscando oferecer uma solução acessível e viável para o uso cotidiano. O dispositivo também pode ser ampliado futuramente com recursos adicionais, como comunicação sem fio, integração com smartphones ou algoritmos de inteligência artificial para reconhecimento mais preciso do ambiente.

## 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Identificar os principais desafios enfrentados por pessoas com deficiência visual na locomoção em ambientes internos e externos.
- Estudar e selecionar sensores ultrassônico adequados para detecção de obstáculos.
- Implementar um sistema de alerta tátil utilizando módulo vibratório para sinalizar a presença de obstáculos ao usuário.
- Construir um protótipo portátil, de baixo custo e fácil adaptação ao corpo ou acessório do usuário.
- Realizar testes práticos para avaliar o desempenho do dispositivo em diferentes condições de uso.

- Propor melhorias futuras, como integração com tecnologias sem fio, aplicativos móveis ou algoritmos de inteligência artificial.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi estruturado em capítulos sequenciais para guiar o leitor desde os conceitos fundamentais até os resultados práticos do projeto.

Inicialmente, o Capítulo 2 (Referencial teórico) estabelece as bases conceituais, abordando temas essenciais como a deficiência visual, os desafios de mobilidade e o papel da tecnologia assistiva como ferramenta de inclusão.

Em seguida, o Capítulo 3 (Trabalhos Relacionados) analisa projetos e estudos anteriores na área de bengalas eletrônicas e dispositivos de auxílio, criando um panorama do estado da arte e contextualizando a contribuição deste trabalho.

A implementação prática é descrita no Capítulo 4 (Metodologia), que detalha o passo a passo do desenvolvimento. Esta seção aborda as especificações e justificativas para a escolha do microcontrolador ESP32, dos sensores ultrassônicos, do motor de vibração e dos módulos de alimentação, que são os blocos de construção do sistema. Descreve a montagem do hardware, com os esquemas de conexão, até a montagem do software, explicando a lógica por trás das principais funções do código, como o loop principal e o controle da vibração.

Finalmente, o Capítulo 5 (Resultados) apresenta os dados e as observações obtidas durante os testes do protótipo, validando sua eficácia, e o Capítulo 6 (Considerações Finais) resume as conclusões do trabalho, discute suas limitações.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, são apresentados os principais conceitos relacionados à Tecnologia Assistiva, destacando sua evolução, objetivos e importância na inclusão de pessoas com deficiência visual. Também são abordados os princípios de orientação e mobilidade, bem como o funcionamento da bengala longa e suas limitações. Por fim, são exploradas as inovações tecnológicas aplicadas ao auxílio à locomoção, com ênfase na bengala inteligente, que integra recursos eletrônicos e computacionais para proporcionar maior segurança e autonomia ao usuário.

### 2.1 DEFICIÊNCIA VISUAL

Dados do censo de 2000 (IBGE) mostram que 14,5% da população brasileira, o equivalente a 24,5 milhões de pessoas, tinha alguma deficiência, com concentração notável nas regiões Norte e Nordeste. Essa prevalência em áreas mais pobres é um fenômeno também observado pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Diante desse cenário, a Tecnologia Assistiva se apresenta como um recurso crucial para garantir a inclusão social, sendo fundamental para pessoas de todas as idades em seu dia a dia.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 80% dos casos de cegueira seriam evitáveis com ações preventivas e tratamento. As principais causas de cegueira em adultos incluem glaucoma, retinopatia diabética e degeneração macular, enquanto em crianças destacam-se glaucoma congênito e retinopatia da prematuridade (THYLEFORS, 1998).

A integração de pessoas com deficiência visual na sociedade atual encontra barreiras significativas que limitam sua autonomia e participação social. Um dos maiores obstáculos é a locomoção urbana, dificultada por infraestruturas deficientes, como calçadas mal estruturadas, falta de sinalização tátil e sonora, o que aumenta o risco de acidentes e complica a orientação. Em locais de grande circulação, a exemplo de shoppings ou terminais, a ausência de informações auditivas e de formatos acessíveis torna difícil a localização de serviços essenciais. (ETFA ARQUITETOS, 2024).

Além dos desafios físicos, as barreiras sociais também são proeminentes. A comunicação pode ser prejudicada pelo despreparo geral da população em interagir com pessoas com deficiência visual, gerando isolamento e mal-entendidos. No campo digital, o acesso à informação ainda é restrito, pois muitos sites e aplicativos não são compatíveis com leitores de tela, e a oferta de materiais em braille ou áudio continua limitada. Essas dificuldades reforçam a urgência de adotar políticas públicas e práticas sociais que garantam um ambiente verdadeiramente inclusivo e justo. (ETFA ARQUITETOS, 2024).

## 2.2 MOBILIDADE

A mobilidade é a habilidade de se deslocar de um lugar a outro com segurança e eficácia. Para que isso aconteça, existem métodos específicos de Orientação e Mobilidade que ensinam a pessoa a se locomover de maneira adequada (ASSIS, 2018).

Esses métodos podem envolver o acompanhamento por uma pessoa que enxerga, o uso de um cão-guia ou, o que é mais comum globalmente para a locomoção independente, o uso da bengala longa. A prática dessas técnicas permite que o indivíduo se sinta confiante para manter uma trajetória reta, identificar e desviar de barreiras, perceber alterações no caminho e se reposicionar caso saia da rota planejada, segundo Lagrow e Weessies (1994, apud ASSIS, 2018, p. 52).

A bengala longa atua como uma extensão do sentido do tato para a pessoa com deficiência visual, transmitindo informações sobre o ambiente através do toque. Ao varrer o caminho, ela alerta o usuário sobre obstáculos, bem como mudanças de nível e de textura no piso, permitindo um deslocamento mais seguro. Criada pelo Dr. Richard Hoover e popularizada após a Segunda Guerra Mundial, seu uso envolve técnicas específicas e uma postura correta ao segurá-la, geralmente com a mão dominante, para maximizar a percepção e prevenir lesões por esforço repetitivo (ASSIS, 2018).

Segundo Assis (2018), existem diversas técnicas para o uso da bengala longa, cada uma com uma finalidade específica. A técnica de dois toques é o método padrão, usado para detectar obstáculos e desníveis através de um arco em que a ponta da bengala toca o chão alternadamente antes de cada passo. Variações incluem a técnica de contato constante, onde a ponta desliza continuamente no chão, ideal para terrenos irregulares ou para usuários com fraqueza no pulso;

a técnica de toque e desliza, para superfícies ásperas; a técnica de toque e arrasta, para seguir linhas-guia como bordas de calçadas; e a técnica dos três pontos, um método mais avançado para localizar objetos e aberturas em níveis elevados.

### **2.3 TECNOLOGIA ASSISTIVA**

De acordo com o Comitê de Ajudas Técnicas (BRASIL, 2009), a Tecnologia Assistiva (TA) é um campo que utiliza inovações tecnológicas para desenvolver recursos que ampliam as capacidades de pessoas com deficiência em todas as áreas da vida, do autocuidado ao trabalho. O crescente interesse no Brasil é evidenciado pelo aumento de feiras especializadas, o que sinaliza um segmento econômico promissor. A área é fortalecida por grupos de pesquisa e pela distribuição de órteses e próteses através de entidades cadastradas no SUS.

Ao longo da história, a compreensão e aplicação da Tecnologia Assistiva (TA) variaram significativamente entre diferentes culturas e épocas. No entanto, independentemente das particularidades de cada nação, o propósito fundamental da TA permaneceu constante: aprimorar a qualidade de vida dos indivíduos. Isso é alcançado por meio de soluções que apoiam, compensam, fortalecem ou facilitam capacidades e funções que foram afetadas por deficiências ou pelo processo natural de envelhecimento. Desde os primórdios da humanidade, com exemplos simples como o uso de um galho como apoio, até as inovações tecnológicas contemporâneas, a TA reflete uma contínua interação criativa entre o ser humano e as ferramentas, buscando sempre expandir as possibilidades e superar barreiras (RODRIGUES; ALVES, 2013).

A Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Lei nº 13.146/2015) estabelece que a acessibilidade é um direito fundamental para indivíduos com deficiência. Essa legislação tem como propósito primordial assegurar que essas pessoas desfrutem de condições equitativas no acesso a direitos e liberdades essenciais, promovendo sua integração plena e definitiva como cidadãos na sociedade (BRASIL, 2015).

A legislação brasileira, a partir da Lei nº 10.098 de 2000 e do Decreto nº 5.296 de 2004, estabeleceu a necessidade de promover a igualdade para pessoas com deficiência. Como resultado, em 2006, a Secretaria Especial dos Direitos Humanos criou o Comitê de Ajudas Técnicas. A função desse grupo é estruturar a área, propor políticas e mapear os recursos

existentes, consolidando o desenvolvimento da Tecnologia Assistiva no Brasil (BRASIL, 2015).

Nesse contexto, as tecnologias assistivas são fundamentais, sendo compreendidas como qualquer produto, equipamento ou sistema — seja ele comercial, modificado ou personalizado — que visa ampliar, preservar ou aprimorar as habilidades funcionais de pessoas com deficiência. A bengala inteligente exemplifica essa inovação, pois, ao combinar eletrônica e software, ela aprimora e expande as funcionalidades dos dispositivos de auxílio convencionais.

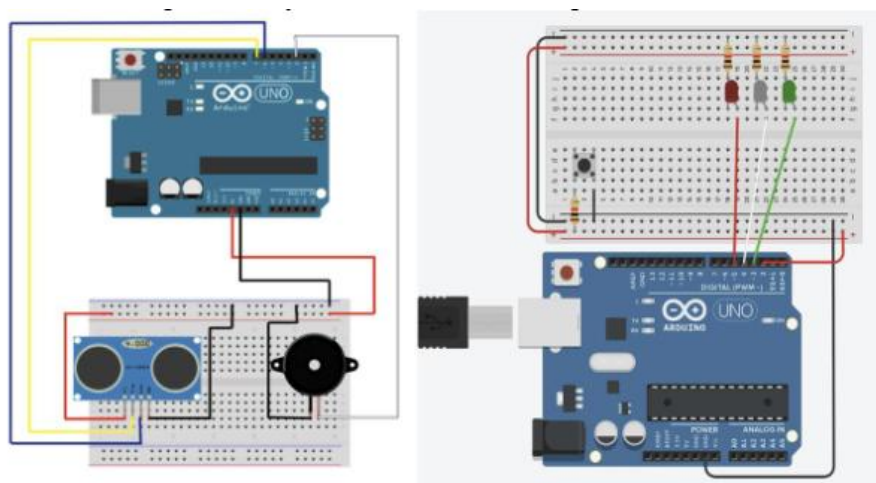
### **3 TRABALHOS RELACIONANDOS**

Para contextualizar e fundamentar o desenvolvimento deste projeto, foi realizada uma pesquisa sobre tecnologias assistivas existentes voltadas para a navegação de pessoas com deficiência visual. Nesta seção, são apresentados trabalhos correlatos que exploram diferentes abordagens para a detecção de obstáculos e orientação, descrevendo suas principais arquiteturas, funcionalidades, inovações e limitações, a fim de posicionar a presente proposta no cenário tecnológico atual.

#### **3.1 TECNOLOGIA ASSISTIVA: BENGALA ELETRÔNICA MICROCONTROLADA PARA NAVEGAÇÃO DE DEFICIENTES VISUAIS**

O estudo sobre a "bengala eletrônica microcontrolada" detalhou o desenvolvimento de uma tecnologia assistiva de baixo custo, projetada para melhorar a navegação de pessoas com deficiência visual. O protótipo foi construído com base em uma plataforma Arduino, que gerencia um sensor ultrassônico para detectar obstáculos e um motor de vibração na empunhadura. Este sistema fornece um feedback tátil intuitivo ao usuário, com a intensidade da vibração aumentando à medida que a distância do objeto diminui. Todo o conjunto eletrônico foi acondicionado em um invólucro protetor para garantir sua durabilidade e alimentado por células de lítio.

Figura 1 - Layout do sistema “Tecnologia assistiva: bengala eletrônica microcontrolada para navegação de deficientes visuais”.



Fonte: Borges et al. (2024).

Para validar sua eficácia, o protótipo passou por duas etapas de testes. A primeira, em bancada, confirmou o funcionamento correto de cada componente. A segunda fase consistiu em uma validação prática no campus da Universidade do Estado do Pará (UEPA), onde um percurso com obstáculos simulou condições de uso real. Alunos voluntários testaram o dispositivo, e suas percepções foram coletadas por meio de observação e questionários. As informações obtidas foram essenciais para calibrar o sensor e otimizar a resposta do sistema de alerta.

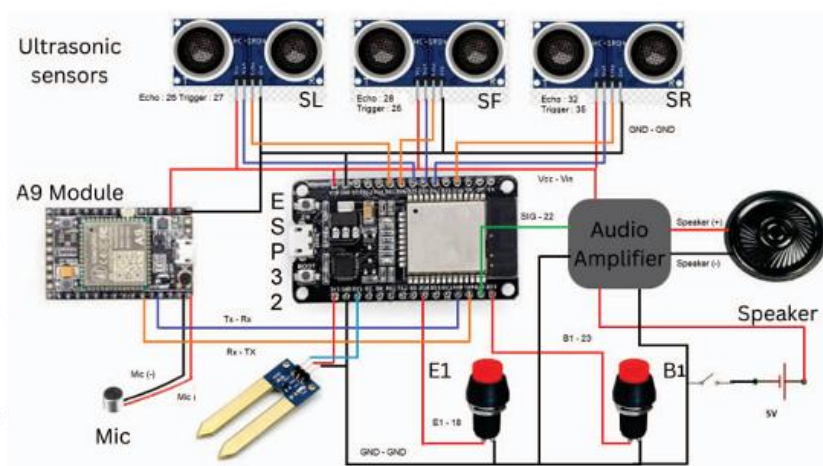
Os resultados da validação foram majoritariamente positivos, confirmando a funcionalidade do conceito. A capacidade de detecção de obstáculos foi bem avaliada, embora a ausência de classificações máximas ("Sempre") indique a necessidade de aprimorar a consistência e a confiabilidade do sensor em diferentes cenários. O feedback dos participantes não apenas validou o protótipo como uma base sólida e funcional, mas também forneceu um roteiro claro para futuras melhorias, como a adição de mais sensores e o refinamento da interface de alerta para tornar o dispositivo ainda mais eficaz.

### 3.2 ENHANCED SMART STICK DESIGN FOR VISUALLY IMPAIRED

O estudo de Pujara et al. (2023) apresenta uma bengala inteligente para pessoas com deficiência visual, construída em torno do microcontrolador ESP-32. O dispositivo se destaca por integrar múltiplos sensores: três ultrassônicos para mapear o ambiente e um sensor de água para identificar poças ou áreas molhadas. Para garantir a segurança do usuário, a bengala também inclui um módulo GSM/GPRS, que permite o rastreamento de localização e a realização de chamadas de emergência.

O sistema de navegação utiliza os três sensores ultrassônicos, posicionados na base da bengala, para monitorar as direções frontal, direita e esquerda. Quando um obstáculo é detectado a uma distância de até 200 cm, o dispositivo emite um alerta sonoro e, de forma inovadora, fornece comandos de voz direcionais, como "Vire à direita" ou "Vire à esquerda". Essa orientação por voz em tempo real representa um avanço significativo, pois ajuda o usuário a contornar os obstáculos de forma segura e promove maior autonomia.

Figura 2 - Diagrama "Enhanced Smart Stick Design for Visually Impaired".



Fonte: Pujara et al. (2023).

Os testes práticos conduzidos por Pujara et al. (2023) confirmaram a alta precisão e confiabilidade da bengala inteligente. O sistema demonstrou um desempenho notável, com um erro máximo de apenas 2 cm nas medições de distância por ultrassom e uma taxa de sucesso de 100% na detecção de água. A capacidade de identificar diversos tipos de obstáculos, como paredes, pessoas e escadas, atingiu uma precisão entre 85% e 100%, enquanto os comandos de

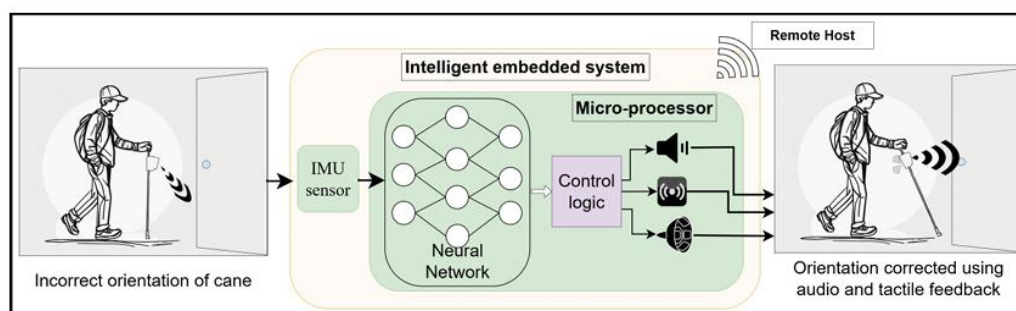
voz para desvio foram corretos em 98% dos casos. As funções de segurança também se mostraram extremamente eficientes: o envio de um SMS com a localização GPS levou apenas 3 segundos, e uma chamada de emergência foi conectada em 5 segundos. Os autores concluíram que esses resultados robustos validam o protótipo como uma ferramenta eficaz para aumentar a segurança e a autonomia de usuários com deficiência visual.

### **3.3 A CANE-MOUNTED SYSTEM FOR DYNAMIC ORIENTATION PREDICTION FOR CORRECTING INCORRECT CANE-TAPPING BY VISUALLY CHALLENGED PERSONS**

O principal objetivo deste sistema é corrigir a orientação da bengala em tempo real, funcionando como um instrutor virtual para o usuário. Utilizando uma Unidade de Medição Inercial (IMU) e uma rede neural, o dispositivo monitora continuamente o ângulo e a posição da bengala. Com base nessa análise, ele fornece feedback por meio de sons e vibrações para ajudar a pessoa a manter a postura e a técnica de manuseio corretas. Uma funcionalidade inovadora é o registro dos dados de navegação, que podem ser acessados remotamente por instrutores de mobilidade, permitindo uma análise detalhada dos padrões de uso e oferecendo insights valiosos para o treinamento.

O protótipo é um sistema portátil baseado em um microprocessador Raspberry Pi Zero 2 W, que integra a IMU, um buzzer, um motor de vibração e uma bateria. A rede neural processa os dados do sensor em tempo real, com cálculos distribuídos em diferentes núcleos para garantir uma resposta quase instantânea, determinando a orientação em menos de 30 milissegundos. O feedback é multimodal: um bipe sonoro alerta sobre o ângulo de inclinação incorreto, uma vibração indica inclinação lateral inadequada, e um alerta de áudio é emitido se o movimento de varredura for excessivo. Essa abordagem de orientação contínua permite que o usuário aprimore ativamente sua técnica, aumentando a segurança e a eficácia da navegação.

Figura 3 - Arquitetura do sistema “a cane- mounted system for dynamic orientation for correcting incorrect cane-tapping by visually challenged persons”.



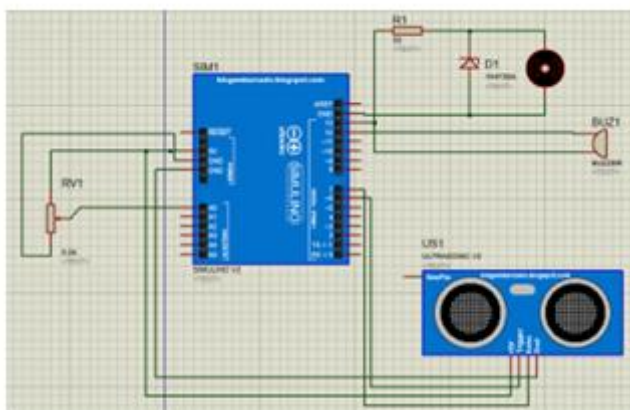
Fonte: Singh et al. (2025).

### 3.4 DISPOSITIVO PARA AUXÍLIO DE DEFICIENTES VISUAIS UTILIZANDO SENSOR ULTRASSONICO

O estudo de Alves et al. (2016) teve como objetivo criar um dispositivo para ajudar pessoas com deficiência visual a medir a distância de suas mãos em relação a objetos. A principal finalidade era prevenir acidentes com obstáculos que ficam na altura do tronco ou da cabeça, áreas que as bengalas comuns não cobrem. O sistema foi projetado para usar alertas sonoros, aproveitando a sensibilidade auditiva que pode ser mais desenvolvida em quem não enxerga.

Para isso, os pesquisadores desenvolveram um aparelho eletrônico com um sensor ultrassônico, um motor de vibração e um buzzer, todos controlados por um Arduino Pro Mini. O sistema funciona de maneira simples e eficaz: o sensor mede a distância e, ao detectar um objeto a 40 cm ou menos, a vibração é ativada. Se a aproximação for crítica, entre 10 e 5 cm, o buzzer soa, fornecendo um alerta final para evitar a colisão.

Figura 4 - Esquema do circuito “Dispositivo para auxílio de deficiente visuais utilizando sensor ultrassônico”.



Fonte: ALVES et al. (2016).

### 3.5 CONTRIBUIÇÕES E DIFERENCIAIS DO TRABALHO

A literatura relacionada à tecnologia assistiva para deficientes visuais apresenta uma diversidade de soluções que variam significativamente em termos de objetivos, complexidade tecnológica e componentes eletrônicos empregados. Enquanto alguns trabalhos se concentram em protótipos de baixo custo e funcionalidades básicas de detecção de obstáculos, outros exploram o estado da arte com sistemas avançados que integram múltiplos sensores, algoritmos de inteligência artificial e módulos de comunicação para oferecer navegação assistida e recursos de segurança. Essa variedade de abordagens ressalta a necessidade de posicionar claramente qualquer nova proposta de pesquisa, identificando suas contribuições específicas e os diferenciais que a distinguem das soluções existentes. A seguir, na tabela 1 detalhamos como o presente trabalho se insere neste panorama, destacando suas inovações e o valor agregado que oferece à comunidade de deficientes visuais.

Tabela 1 - Comparativo de Tecnologias Assistivas para Deficientes Visuais na Literatura

TRABALHO	MICROCONTROLADOR	SENSOR	ATUADOR	INOVAÇÃO
Tecnologia assistiva: bengala eletrônica microcontrolada para navegação de deficientes visuais	Arduino	Ultrassônico	Motor de vibração	Tecnologia assistiva de baixo custo
Enhanced Smart Stick Design for Visually Impaired	Esp32	3 ultrassônicos + 1 sensor de água	Amplificador de áudio	Rastreamento e chamada de emergência
A cane- mounted system for dynamic orientation for correcting incorrect cane-tapping by visually challenged persons	Raspberry Pi	Ultrassônico	Motor de vibração + buzzer	Correção de técnica de manuseio da bengala
Dispositivo para auxílio de deficiente visuais utilizando sensor ultrassônico	Arduino	Ultrassônico	Motor de vibração + buzzer	Prevenção de acidentes em altura (tronco/cabeça)
Bengala eletrônica: tecnologia assistiva para deficientes visuais	Esp32	2 Ultrassônicos	Motor de vibração	Deteção de obstáculos em duas alturas (abaixo e acima da cintura) em um dispositivo portátil e de baixo custo

Fonte: Autora (2025)

O diferencial competitivo mais significativo da “Bengala eletrônica: tecnologia assistiva para deficientes visuais” reside na sua funcionalidade de segurança: a deteção de obstáculos em duas alturas, utilizando sensores ultrassônicos para identificar barreiras localizadas abaixo e

acima da cintura, enquanto a bengala tradicional e a maioria dos dispositivos eletrônicos se concentram apenas no nível do solo, este projeto aborda também a segurança de objetos suspensos ou em altura que representam um risco real de ferimentos. Essa funcionalidade, combinada com a concepção de um dispositivo portátil e de fácil adaptação, permite oferecer uma solução de segurança mais completa e intuitiva, preenchendo a lacuna entre as soluções mais básicas e as mais complexas e caras da literatura, e representando uma contribuição importante para a autonomia e segurança de pessoas com deficiência visual.

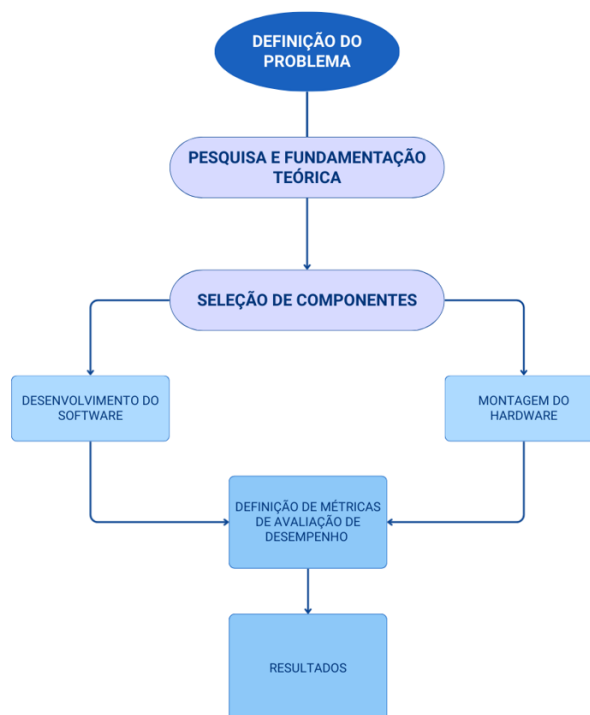
## **4 METODOLOGIA**

Neste capítulo será descrito a abordagem sistemática adotada para o desenvolvimento do protótipo da bengala inteligente. Esta seção detalha as etapas do projeto, desde a concepção inicial até a validação final, abrangendo a seleção de componentes, a montagem do hardware, o desenvolvimento do software e os procedimentos de teste. A metodologia utilizada neste estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, adotando a abordagem de prototipagem, na qual se desenvolve um artefato funcional com o objetivo de solucionar uma questão prática.

### **4.1 ABORDAGEM DO PROJETO**

O desenvolvimento do presente protótipo foi conduzido por meio de uma metodologia sequencial, estruturada em fases distintas para garantir a integração sistemática de hardware e software. Essa abordagem foi adotada para gerenciar a complexidade de criar um artefato funcional de tecnologia assistiva, permitindo a validação incremental e a otimização contínua do sistema. O processo metodológico, desde a concepção até a implementação, foi planejado para assegurar a robustez e a eficácia da bengala eletrônica, conforme a figura 5 e detalhamento nas etapas a seguir.

Figura 5 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autora (2025)

**Pesquisa e Referencial teórico:** A fase inicial consistiu em um levantamento bibliográfico aprofundado sobre tecnologias assistivas, com foco em dispositivos para deficientes visuais. A análise de projetos correlatos permitiu identificar as melhores práticas e os desafios técnicos, o que foi fundamental para a definição dos requisitos funcionais e não funcionais do protótipo, como a precisão na detecção de obstáculos, o baixo consumo energético e a clareza do feedback tátil.

**Seleção de Componentes:** Com base nos requisitos definidos, procedeu-se à seleção dos componentes de hardware. Os critérios de escolha incluíram custo-benefício, disponibilidade no mercado, compatibilidade técnica e eficiência energética. Foram selecionados sensores ultrassônicos para a detecção de distância, módulos de vibração para o feedback tátil e a placa de desenvolvimento ESP32 como unidade central de processamento, por atenderem plenamente às necessidades do projeto.

**Montagem do Hardware e Desenvolvimento do Software:** a fase de implementação prática envolveu a integração incremental do hardware e do software. Primeiramente, o esquema elétrico foi projetado e o circuito foi montado em uma protoboard, o que permitiu a realização de testes individuais dos componentes e ajustes ágeis. Em paralelo, o firmware foi codificado no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE, começando com rotinas isoladas

para a leitura dos sensores e avançando para a lógica de controle completa que integra os dados e aciona o motor de vibração. Essa abordagem modular garantiu a construção de um sistema funcional e confiável.

Métricas de avaliação e desempenho: para garantir a validade científica e a reprodutibilidade dos resultados, esta fase metodológica concentrou-se na definição de um conjunto de métricas de desempenho que permitem a avaliação quantitativa do protótipo. A escolha de indicadores foi fundamental para transformar as observações de campo em dados numéricos concretos.

Resultados: a validação do sistema foi conduzida por meio de um protocolo de testes, que incluiu a avaliação do protótipo em ambiente controlado e em ambiente real, apresentado no capítulo 5. Esta abordagem de dupla validação é essencial para assegurar que o desempenho do dispositivo não se restrinja a condições ideais de laboratório.

## **4.2 SELEÇÃO DOS COMPONENTES**

A etapa de seleção dos componentes constituiu um momento fundamental no desenvolvimento do protótipo, uma vez que influenciaria diretamente a funcionalidade, a eficiência e a viabilidade do sistema. O objetivo principal foi escolher dispositivos que proporcionassem um equilíbrio adequado entre desempenho técnico, custo acessível, facilidade de integração e praticidade de uso, garantindo que o protótipo fosse confiável, portátil e passível de futuras expansões. A seguir, a tabela 2 detalha os principais componentes escolhidos, seus modelos específicos e a justificativa para sua seleção.

Tabela 2 - Componentes

Componentes	Modelo Específico	Justificativa
Microcontrolador	ESP32 DevKitC V4	Possui baixo custo e ampla documentação, com suporte consolidado da comunidade Arduino, facilitando a programação e integração com sensores e atuadores.
Sensor Ultrassônico	HC-SR04	Excelente relação custo-benefício e é capaz de medir distâncias de até 4 metros, sendo ideal para a detecção de obstáculos frontais.
Atuador de Feedback	Motor de Vibração Vibracall 1027	O motor de vibração fornece feedback tátil intuitivo e discreto ao usuário. É de baixo custo, pequeno e permite controle da intensidade
Estrutura de Montagem	Protoboard e Jumpers	É ideal para o desenvolvimento inicial, garantindo segurança e praticidade na montagem dos componentes.
Fonte de Alimentação	Bateria recarregável + Módulo TP4056	A bateria recarregável fornece energia portátil ao protótipo, enquanto o módulo TP4056 garante recarga segura e protege contra sobrecarga.

Fonte: Autora (2025)

Para o desenvolvimento do protótipo proposto, foi necessária a seleção criteriosa de componentes eletrônicos que atendessem aos requisitos de baixo custo, portabilidade e eficiência na detecção de obstáculos. Nesta seção, são apresentados os dispositivos utilizados como microcontrolador, sensores, atuadores e elementos de alimentação, descrevendo suas principais características, funções no sistema e justificativa para a escolha de cada um.

#### 4.2.1 Microcontroladores

Os microcontroladores são dispositivos eletrônicos de grande importância na atualidade, estão presentes no nosso cotidiano, aplicações que vão desde eletrodomésticos até sistemas industriais complexos.

Segundo Kerschbaumer (2013), os microcontroladores podem ser compreendidos como computadores em um único chip, uma vez que reúnem em seu interior todos os elementos necessários ao seu funcionamento, necessitando apenas de uma fonte de alimentação externa. Diferentemente de sistemas microprocessados tradicionais, que exigem a conexão de diversos periféricos externos — como memórias de dados e de programa, além do circuito de clock —, os microcontroladores já integram esses recursos em um único componente.

##### 4.2.1.1 ESP32

Segundo Uma avaliação de desempenho citada por Goyal (2024 apud Oliveira, 2025, p. 30) comparou o ESP32, o Arduino Uno e o Raspberry Pi 4, destacando o ESP32 como a escolha ideal para sistemas embarcados devido ao seu equilíbrio entre performance e baixo consumo de energia. Enquanto o Arduino Uno se mostra simples e econômico, seu poder de processamento é limitado. Em contrapartida, o Raspberry Pi 4 oferece alta capacidade computacional, mas ao custo de um consumo energético elevado e maior complexidade de uso.

Por seu baixo consumo e versatilidade, o ESP32 (Figura 6) é especialmente adequado para aplicações de Internet das Coisas (IoT). Suas áreas de aplicação são vastas, incluindo casas inteligentes, automação industrial, dispositivos de saúde, agricultura de precisão e robôs de serviço. Ele também é empregado em sistemas de ponto de venda (POS), hubs de sensores, câmeras de vídeo, reconhecimento de fala e imagem, e como placa de rede com Wi-Fi e Bluetooth integrados.

Figura 6 - Microcontrolador ESP32



Fonte: Autora (2025)

De acordo com Garbelloto (2024), a arquitetura do ESP32, com seu processador dual-core que pode atingir até 240 MHz, juntamente com uma boa capacidade de memória e múltiplos periféricos integrados, confere grande flexibilidade ao dispositivo. Isso permite sua aplicação em uma ampla gama de projetos, desde sistemas domésticos inteligentes até soluções industriais complexas. A família ESP32 inclui diversas variantes, como o ESP32-S2, otimizado para baixo consumo de energia e com suporte a USB, e o ESP32-C3, que se baseia na arquitetura RISC-V e oferece conectividade Wi-Fi e Bluetooth LE. Essa diversidade de modelos permite que os desenvolvedores escolham a versão que melhor se alinha aos requisitos específicos de desempenho, funcionalidade e custo de seus projetos de IoT e sistemas embarcados.

A placa de desenvolvimento DOIT ESP32 DevKit V1 é a plataforma física que integra o chip microcontrolador ESP32. Ela oferece um total de 30 pinos para conexões externas, dos quais 26 são pinos de entrada/saída de propósito geral (GPIOs) configuráveis. Esses GPIOs são versáteis, podendo ser programados para funcionar como portas digitais padrão ou para operar com diversos protocolos de comunicação. Os pinos restantes são dedicados à alimentação do circuito, fornecendo tensões de 5 V e 3,3 V, além de duas portas de aterramento (GND) para referência.

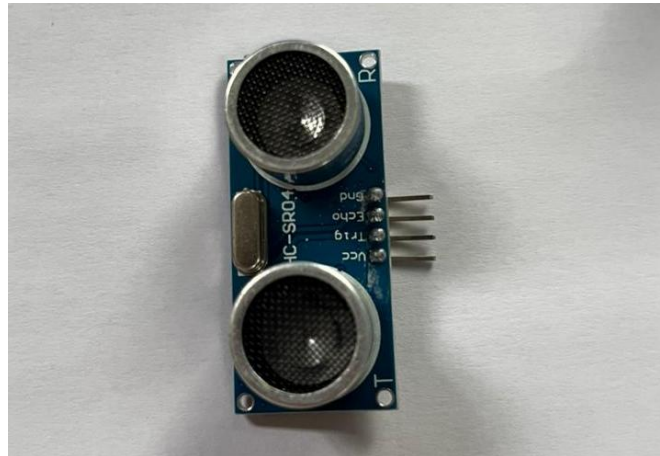
## 4.2.2 SENSOR

Sensores são componentes que detectam estímulos do ambiente e os convertem em sinais elétricos interpretáveis por um sistema eletrônico. Sua função essencial é coletar informações do mundo real e enviá-las a um microcontrolador para processamento, o que possibilita a automação de tarefas e o controle de sistemas. A variedade de sensores é vasta, incluindo tipos que medem temperatura, luz, pressão, distância ou movimento. Em projetos de tecnologia assistiva e sistemas embarcados, sensores ultrassônicos, infravermelhos e de vibração são particularmente importantes, pois permitem a detecção de obstáculos e a interação com o usuário, promovendo uma navegação mais segura e autônoma.

### 4.2.2.1 SENSOR ULTRASSÔNICO

Os sensores ultrassônicos são dispositivos que medem distâncias e detectam a presença de objetos ao emitir e receber ondas sonoras de alta frequência, um processo ilustrado na figura 6. Por funcionarem sem a necessidade de contato físico, eles são amplamente utilizados em ambientes industriais para tarefas como automação de linhas de produção, controle de nível de tanques, detecção de obstáculos para veículos autônomos e monitoramento de dimensões de produtos. Conforme aponta Reis (2024), sua versatilidade os torna ferramentas essenciais em diversos setores, incluindo o automobilístico, químico e alimentício, sendo fundamentais para sistemas modernos de controle e automação.

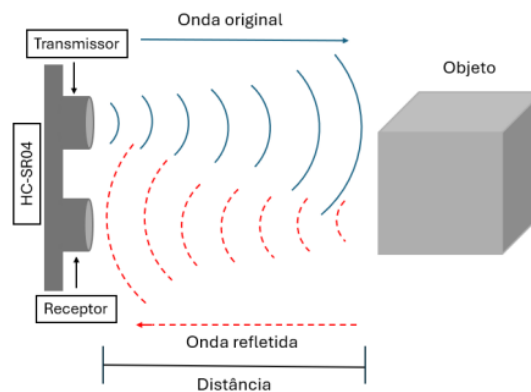
Figura 7 - Sensor ultrassônico



Fonte: Autora (2025)

Segundo Morgan (2014), o sensor ultrassônico é capaz de medir a distância entre o sensor e o objeto mais próximo. Ele funciona emitindo uma onda sonora em determinada frequência e aguardando o retorno dessa onda após ser refletida por um obstáculo. Ao receber o eco, o sensor calcula a distância até o objeto com base no tempo que a onda leva para percorrer o trajeto de ida e volta, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Princípio de funcionamento do sensor ultrassônico HC-SR04

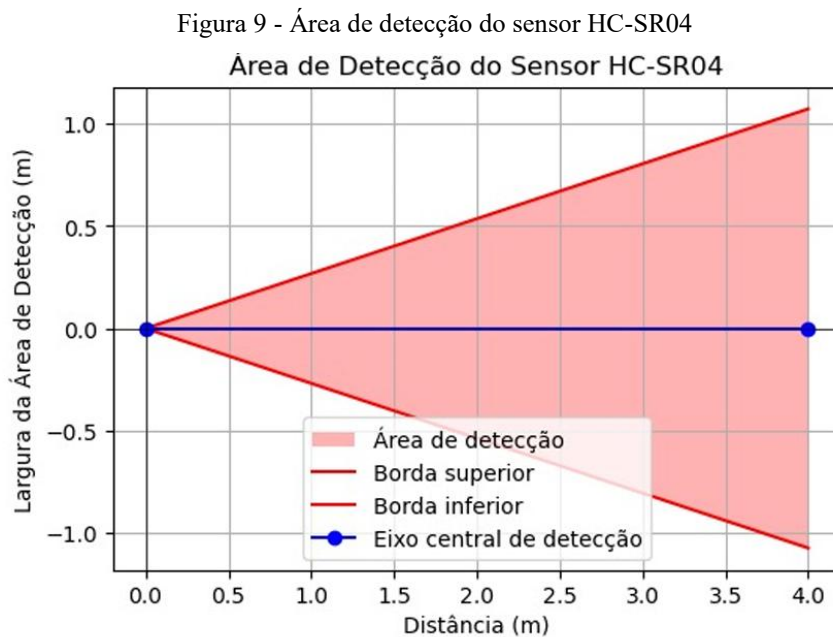


Fonte: Reis, 2024

Um modelo sensor muito utilizado, de baixo custo e bom desenvolvimento, o sensor ultrassônico HC-SR04 escolhido para o desenvolvimento deste projeto, O funcionamento do sensor ultrassônico inicia-se quando o microcontrolador, como o Arduino ou o ESP32, envia um pulso elétrico de aproximadamente  $10 \mu\text{s}$  para o pino Trigger. Ao receber esse sinal, o módulo emite automaticamente uma sequência de oito pulsos ultrassônicos com frequência de 40 kHz, que se propagam pelo ar até atingirem um obstáculo (MORGAN, 2014).

Segundo Kreezmer (2010 apud Mota, 2018), o sensor ultrassônico HC-SR04 possui desvantagens para detectar alguns obstáculos, ele pode receber múltiplas reflexos de um impulso emitido, podendo não detectar obstáculos, como por exemplo cantos de paredes.

De acordo com Oliveira (2025), a área de detecção do sensor HC-SR04 pode ser representada, em duas dimensões, por duas linhas divergentes que partem da posição do sensor formando um ângulo de  $15^\circ$  e se estendendo até o alcance máximo de 4 metros. No entanto, o autor destaca que essa representação é apenas uma simplificação, pois a área real de detecção possui formato tridimensional, comportando-se como um cone gerado pela propagação do feixe ultrassônico. Assim, a base desse cone aumenta conforme a distância, podendo alcançar aproximadamente 2 metros de raio a 4 metros do sensor, conforme a Figura 9.



#### 4.2.3 ATUADORES

Segundo Nogueira e Arruda (2022), os atuadores são dispositivos essenciais na automação industrial, responsáveis por converter sinais de controle, geralmente elétricos, em ações físicas como movimento ou força. Funcionando como os "músculos" de um sistema, eles executam as ordens de uma unidade de processamento, fazendo a ponte entre o mundo virtual

(comandos) e o mundo real (ação). Diferentemente dos sensores, que coletam dados do ambiente, os atuadores recebem informações processadas e as utilizam para movimentar, posicionar ou controlar mecanismos. Seja através de energia elétrica para alta precisão, hidráulica para grande força ou pneumática para alta velocidade, os atuadores são os elementos que efetivamente realizam o trabalho físico em um processo automatizado, sendo, portanto, um pilar para a eficiência e produtividade na indústria moderna.

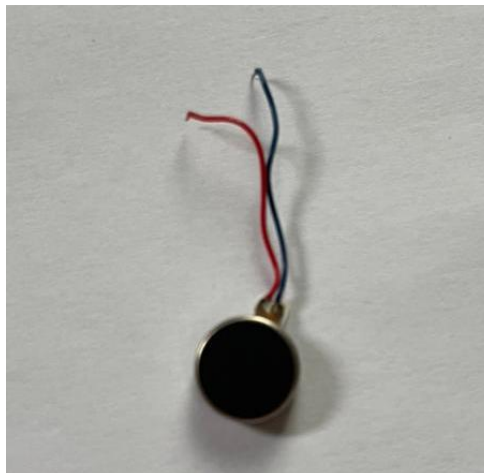
#### 4.2.3.1 MOTOR VIBRADOR

A aplicação de estímulos táteis, frequentemente por meio de motores vibratórios, é uma solução tecnológica já empregada para auxiliar pessoas surdas no cotidiano. Esses motores geram vibrações ao girar uma massa desbalanceada acoplada a um eixo, convertendo energia elétrica em um sinal tátil perceptível.

Para auxiliar em suas tarefas diárias, pessoas surdas utilizam dispositivos estimuladores, a maioria dos quais opera aplicando estímulos na pele por meio de motores vibratórios, que consistem em motores elétricos com um peso desbalanceado acoplado para criar a sensação de vibração (BER GANDELMAN; MENDES, 2014).

O princípio de funcionamento do motor Vibracall 1027, conforme apresentado na Figura 10, baseia-se na rotação de uma massa excêntrica em alta velocidade, processo que resulta na geração de vibrações. O uso de dispositivos vibratórios mostra-se uma solução menos invasiva em comparação aos dispositivos sonoros, uma vez que preserva a capacidade auditiva do usuário em relação aos sons do ambiente ao seu redor.

Figura 10 - Vibracall 1027



Fonte: Autora (2025)

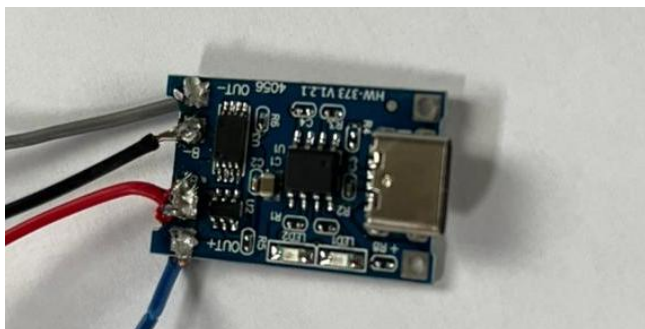
#### 4.2.4 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação é um componente crucial, pois garante a autonomia operacional e o carregamento eficiente do dispositivo. A escolha recaiu sobre a utilização de uma bateria recarregável de íon-lítio, visando conferir a portabilidade e a usabilidade necessárias para o contexto de aplicação diário do usuário. Para o gerenciamento e controle do processo de recarga, foi integrado o módulo TP4056, um circuito dedicado que assegura o carregamento seguro e otimizado da célula, em conformidade com as especificações técnicas para baterias de íon-lítio.

##### 4.2.4.1 MÓDULO TP4056

Segundo a MakerHero (2025), o módulo TP4056 consiste em um controlador de carga linear de corrente constante/tensão constante (CC/CV), projetado especificamente para baterias de íon de lítio (Li-Ion) e polímero de lítio (Li-Po) de célula única. Sua ampla adoção em projetos eletrônicos portáteis que utilizam microcontroladores, como ESP8266, ESP32, Raspberry Pi Pico e Arduino, deve-se à sua eficiência e aos recursos de proteção integrados, fundamentais para a segurança e longevidade das baterias.

Figura 11 - Módulo TP4056



Fonte: Autora (2025)

O módulo TP4056 (Figura 11) possui terminais de entrada (IN+ e IN- ou micro USB) para alimentação externa (4,5V a 5,5V), terminais de saída (OUT+ e OUT-) que fornecem 4,2V para o dispositivo, e terminais (B+ e B-) para conexão da bateria Li-Ion/Li-Po, com proteção contra sobrecorrente. Dois LEDs (LED1 e LED2) indicam o status de carregamento: LED1 aceso/LED2 apagado para carregando, LED1 apagado/LED2 aceso para carga completa, e LED1 piscando/LED2 aceso para bateria não conectada.

#### 4.2.4.2 BATERIA RECARREGÁVEL

A solução de alimentação do sistema embarcado é centralizada no uso de uma célula de bateria de íon de lítio (Li-ion) no formato 18650, que oferece uma tensão nominal de 3,7V e alta densidade de energia, essencial para garantir a portabilidade e autonomia do projeto. A escolha desta tecnologia, que se destaca pela baixa taxa de autodescarga e ausência de efeito memória, permite um ciclo de vida prolongado e custos operacionais recorrentes reduzidos. Para a integração com o microcontrolador ESP32, cuja tensão de operação é tipicamente de 3,3V, a tensão nominal da bateria de 3,7V é ideal, pois pode ser gerenciada por um circuito de carregamento e proteção (como um módulo TP4056 ou similar) e, em seguida, regulada para o nível de tensão estável exigido pelo microcontrolador e seus periféricos, garantindo um fornecimento de energia eficiente e seguro para as operações de processamento.

Figura 12 - Bateria recarregável 3.7V



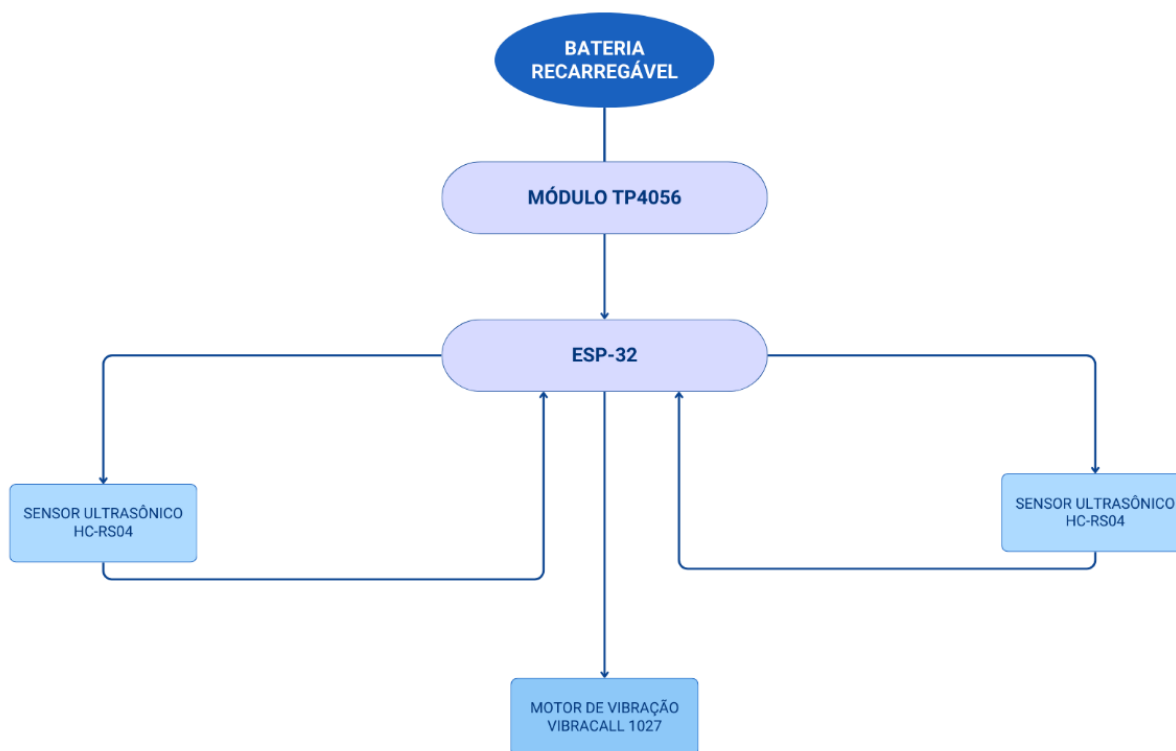
Fonte: Autora (2025)

### 4.3 MONTAGEM DO HARDWARE

O projeto e a montagem do hardware constituíram etapas essenciais no desenvolvimento do protótipo, sendo responsáveis por garantir a correta integração entre os componentes eletrônicos e a funcionalidade do sistema. Esta fase envolveu a elaboração detalhada do esquema elétrico, a montagem física do protótipo e a verificação do funcionamento individual e integrado de sensores, atuadores e microcontrolador.

Inicialmente, elaborou-se o esquema completo do protótipo, conforme a Figura 13, considerando todos os dispositivos selecionados, incluindo o microcontrolador ESP32, os sensores ultrassônicos HC-SR04 e o motor de vibração para feedback tátil e a fonte de alimentação baseada em bateria recarregável com módulo TP4056. Durante essa etapa, foram avaliadas as especificações técnicas de cada componente, como limites de tensão e corrente, compatibilidade de sinais e posição dos pinos, garantindo que o circuito fosse seguro, eficiente e funcional.

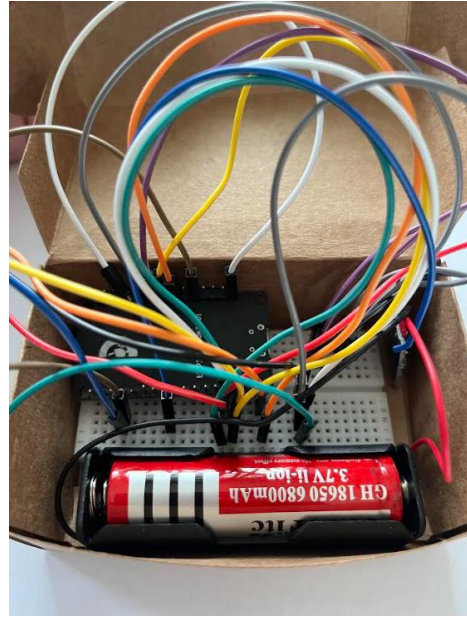
Figura 13 - Sistema esquemático para o protótipo bengala inteligente



Fonte: Autora (2025)

Para a prototipagem, utilizou-se uma protoboard, que proporcionou flexibilidade e rapidez na montagem e nos testes iniciais. A escolha dessa estrutura permitiu realizar ajustes de conexão, reorganizações de componentes e substituição de módulos de forma simples, sem a necessidade de soldagem. Os componentes: bateria, o módulo TP4056, ESP32 foram acoplados em uma caixa leve, para trazer mais ergonomia a bengala, conforme a Figura 14. Esse método de prototipagem iterativa possibilitou verificar o funcionamento individual de cada elemento: o sensor ultrassônico foi testado para medir distâncias a obstáculos frontais, e o motor de vibração foi acionado para conferir a intensidade e a clareza do feedback tátil.

Figura 14 - Conjunto de alimentação e controle do protótipo

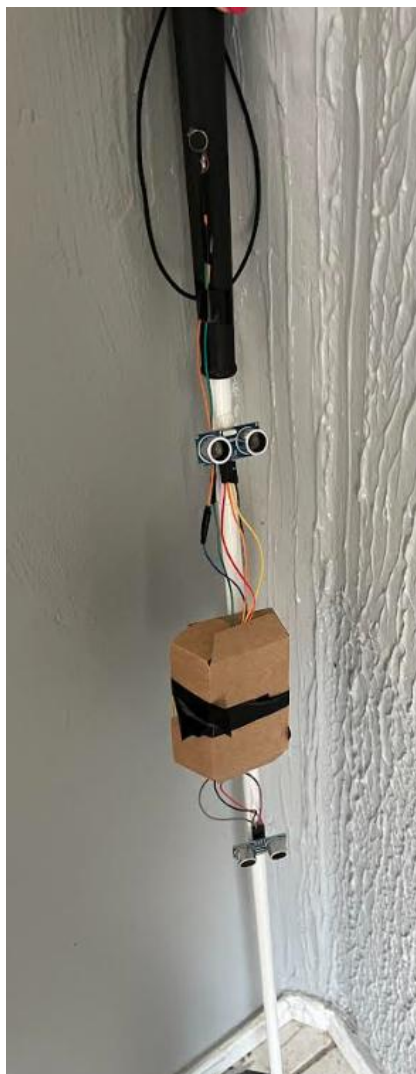


Fonte: Autora (2025)

Na construção do protótipo, o arranjo dos fios e jumpers foi cuidadosamente planejado para impedir interferências e garantir a solidez mecânica do dispositivo. O posicionamento dos sensores foi otimizado para ampliar a cobertura da área frontal, enquanto o motor de vibração foi instalado para emitir sinais táteis perceptíveis e discretos.

Ao final, o hardware estava completamente montado e operacional, conforme a Figura 15 permitindo o desenvolvimento do software de controle e a realização dos testes de validação. Portanto, o projeto e a montagem do hardware foram vitais para transformar o conceito em um produto funcional, pronto para a interação com o usuário e para fornecer feedback tátil confiável.

Figura 15 - Protótipo bengala eletrônica

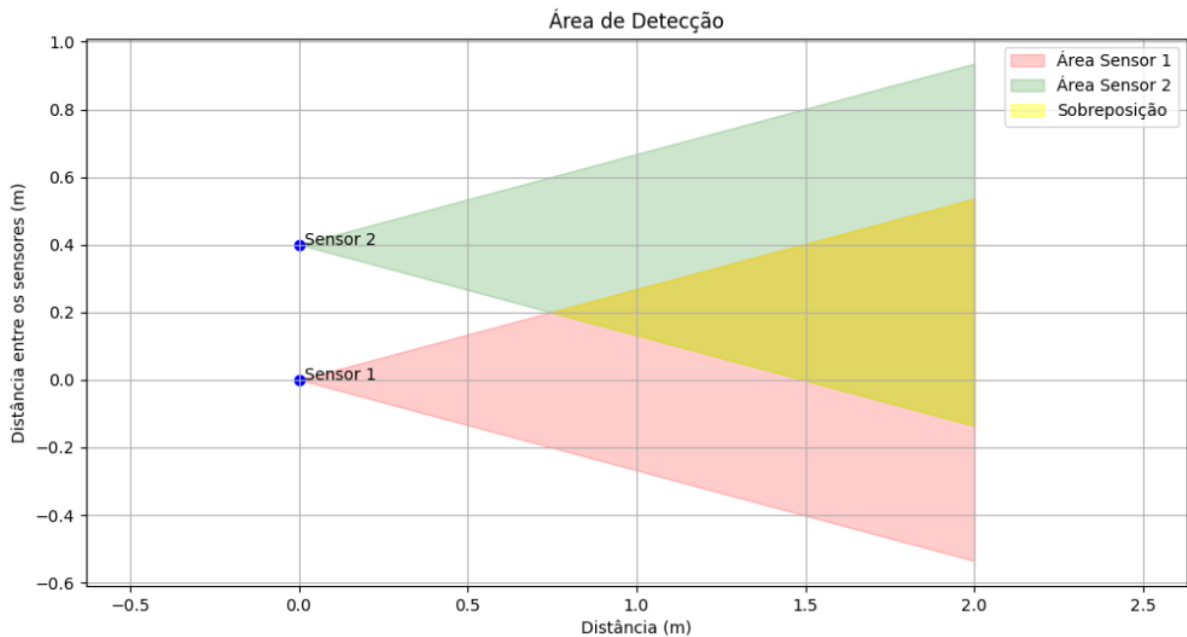


Fonte: Autora (2025)

#### 4.3.1 Integração dos Sensores Ultrassônicos ao Microcontrolador ESP32

Para a detecção automática de obstáculos, foram utilizados dois sensores ultrassônicos do modelo HC-SR04, instalados em posições distintas da estrutura física da bengala eletrônica assistiva. O primeiro sensor foi destinado à identificação de obstáculos elevados, enquanto o segundo foi orientado para a detecção de barreiras ao nível do solo, a área de detecção foi projetada na Figura 16, nessa conseguimos observar que quanto maior a detecção no eixo x, também se torna maior no eixo Y.

Figura 16 - Detecção de dois sensores



Fonte: Adaptado de: (OLIVEIRA, 2025)

O sensor HC-SR04 possui quatro pinos: VCC, GND, TRIG e ECHO. O pino VCC é responsável pela alimentação de 5V, proveniente do microcontrolador. O GND deve ser conectado à terra (aterramento) do mesmo, enquanto os pinos TRIG e ECHO devem ser ligados a pinos GPIO do microcontrolador, que serão utilizados para enviar e receber os sinais ultrassônicos.

O sensor responsável pela detecção frontal superior teve seu terminal TRIG conectado ao pino GPIO 26 do ESP32, enquanto o terminal ECHO foi interligado ao pino GPIO 25. De forma análoga, o sensor destinado à detecção inferior teve o terminal TRIG conectado ao pino GPIO 33 e o terminal ECHO ao pino GPIO 32. Os sensores ultrassônicos foram conectados diretamente ao microcontrolador ESP32, sendo os terminais de alimentação (VCC) ligados à saída de 5V disponibilizada pelo próprio ESP32, enquanto os terminais GND foram interligados ao mesmo pino de terra do microcontrolador, assegurando uma referência elétrica comum entre os dispositivos.

### 4.3.2 Conexão do Motor de Vibração

A integração do Módulo Vibracall 1027 em um circuito é relativamente simples. Ele é tipicamente controlado por um pino de saída digital de um microcontrolador. Quando o pino é colocado em nível lógico alto (HIGH), a tensão é aplicada ao motor, que começa a vibrar (ELETROGATE, 2025). É uma solução eficiente e de baixo custo para adicionar feedback vibratório a qualquer projeto eletrônico que necessite de uma forma de interação não visual e não sonora.

O motor de vibração atua como atuador de feedback tátil, sendo acionado sempre que um obstáculo é identificado pelo sistema. Seu terminal de controle foi interligado ao pino GPIO 14 do ESP32, enquanto o terminal de referência (GND) foi conectado ao barramento de terra do microcontrolador, assegurando retorno elétrico adequado para o acionamento do dispositivo.

### 4.3.3 Conexão da bateria mais o Módulo TP4056

O sistema de alimentação portátil é composto por uma bateria recarregável e um módulo TP4056. Este módulo é crucial para a recarga segura da bateria e para protegê-la contra sobrecarga e descarga excessiva, garantindo a segurança do protótipo. A escolha da bateria recarregável se fez necessária para fornecer energia e o funcionamento autônomo do protótipo, permitindo portabilidade e operação em diferentes ambientes sem depender de conexão direta à rede elétrica.

Dois fatores principais justificaram a escolha deste módulo: o primeiro é que ele impede a aplicação de tensões superiores ao limite suportado pelo ESP32, garantindo a proteção do microcontrolador; o segundo é que possibilita a recarga da bateria diretamente no circuito, sem necessidade de removê-la, o que torna o protótipo mais prático e com maior autonomia de uso.

O módulo TP4056 foi conectado entre a bateria e o circuito do ESP32. Ele gerencia o processo de carga da bateria quando conectado a uma fonte de alimentação USB e protege a bateria durante o uso, assegurando tensão e corrente adequadas ao sistema.

Os terminais B+ e B- do módulo recebem a conexão da bateria, correspondendo aos polos positivo e negativo, respectivamente, enquanto os terminais OUT+ e OUT- foram

conectados às entradas 3V3 e GND do ESP32, fornecendo energia ao microcontrolador e aos demais componentes do protótipo, garantindo estabilidade e confiabilidade no fornecimento elétrico.

Esta configuração possibilita a realização de testes do protótipo em diferentes condições de operação, simulando cenários reais, ao mesmo tempo que mantém a segurança e a confiabilidade do sistema de alimentação.

## **4.4 MONTAGEM DO SOFTWARE**

### **4.4.1 FUNÇÃO LOOP**

A função `loop()`, representa o núcleo do programa e é executada de forma contínua. Em cada iteração, realiza-se a leitura dos dois sensores por meio da função `lerSensorUltrassonico()` e, em seguida, é chamada a função `controlarVibracao()`, responsável por determinar o acionamento do motor de vibração com base nas distâncias obtidas. Após essas etapas, é inserida uma pausa de 100 milissegundos, com o objetivo de estabilizar o sistema, evitando um número excessivo de leituras por segundo, o que poderia gerar instabilidade e aumentar o consumo de energia, conforme a Figura 17.

Figura 17 - Código executado na função loop

```

34 void loop() {
35     // --- Leitura dos Sensores ---
36     distanciaFrontal = lerSensorUltrassonico(PINO_TRIG_FRONTAL, PINO_ECHO_FRONTAL);
37     distanciaSuperior = lerSensorUltrassonico(PINO_TRIG_SUPERIOR, PINO_ECHO_SUPERIOR);
38
39     // Imprime os valores para depuração
40     Serial.print("Distância Frontal: ");
41     Serial.print(distanciaFrontal);
42     Serial.print(" cm | Distância Superior: ");
43     Serial.print(distanciaSuperior);
44     Serial.println(" cm");
45
46     // --- Lógica de Controle do Atuador ---
47     controlarVibracao();
48
49     // Pequeno atraso para estabilidade do loop
50     delay(100);
51 }
52

```

Fonte: Autora (2025)

#### 4.4.2 LEITURA DO ULTRASSÔNICO

A operação do sensor ultrassônico é composta por quatro etapas principais. Primeiro, a emissão do pulso sonoro é realizada através dos comandos `digitalWrite` e `delayMicroseconds` aplicados ao pino TRIG, gerando um pulso breve e controlado. Em seguida, ocorre a medição do tempo de viagem do pulso: a função `pulseIn()` registra o intervalo durante o qual o pino ECHO permanece em nível lógico alto (HIGH), correspondendo ao tempo total de ida e volta do sinal acústico, conforme a Figura 18. O parâmetro 30000L configura um timeout de 30 ms; se não for recebido retorno dentro desse intervalo, a medição é abortada.

A conversão para distância é feita pela equação 1:

$$\text{Distância} = \frac{(\text{duração} \times 0,0343)}{2} \quad (1.1)$$

Nessa expressão, duração está em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ), 0,0343 representa a velocidade do som no ar em  $\text{cm}/\mu\text{s}$ , e a divisão por 2 corrige o fato de que o tempo medido se refere ao percurso de ida e volta. Por fim, há o tratamento de erro: quando `pulseIn()` atinge o timeout e

retorna zero, o código retorna um valor sentinela (por exemplo, 999) para indicar “nenhum obstáculo detectado”, prevenindo alarmes falsos e facilitando a lógica de filtragem no nível superior do sistema

Figura 18 - Leitura do sensor ultrassônico

```

59 float lerSensorUltrassonico(int pinoTrig, int pinoEcho) {
60     digitalWrite(pinoTrig, LOW);
61     delayMicroseconds(2);
62     digitalWrite(pinoTrig, HIGH);
63     delayMicroseconds(10);
64     digitalWrite(pinoTrig, LOW);
65
66     long duracao = pulseIn(pinoEcho, HIGH, 30000L);
67
68     float distancia = (duracao * 0.0343) / 2;
69
70     if (distancia == 0) {
71         return 999; // Retorna um valor alto para indicar falha na leitura
72     }
73
74     return distancia;
75 }

```

Fonte: Autora (2025)

#### 4.4.3 CONTROLAR A VIBRAÇÃO

Primeiramente, define-se um limiar de alerta, representado pela constante `DISTANCIA_MAX_ALERTA`, com valor de 100 cm, que estabelece o raio de segurança ao redor do usuário. Em seguida, a função identifica o obstáculo mais próximo utilizando `min(distanciaFrontal, distanciaSuperior)`, garantindo que o sistema responda ao perigo mais iminente, independentemente de sua posição, seja frontal ou superior.

A lógica de ativação é implementada por meio de uma estrutura condicional `if/else`, que compara a menor distância detectada com o limiar de alerta. Caso essa distância seja menor ou igual a `DISTANCIA_MAX_ALERTA`, o comando `digitalWrite(PINO_VIBRADOR, HIGH)` aciona o motor de vibração. Caso contrário, quando ambos os sensores indicam que o caminho

está livre além do limite definido, o comando `digitalWrite(PINO_VIBRADOR, LOW)` desativa o motor, mantendo o sistema em estado de espera, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Controle de vibração

```

80 void controlarVibracao() {
81     // --- Parâmetros de Detecção ---
82     const int DISTANCIA_MAX_ALERTA = 100;
83
84     // Encontra a menor distância entre os dois sensores
85     float menorDistancia = min(distanciaFrontal, distanciaSuperior);
86
87     // Se a menor distância detectada for menor ou igual à distância de alerta
88     if (menorDistancia <= DISTANCIA_MAX_ALERTA) {
89         Serial.print("Alerta! Obstáculo detectado a ");
90         Serial.print(menorDistancia);
91         Serial.println(" cm. LIGANDO vibração!");
92
93         // Liga o motor (envia sinal HIGH para a base do transistor)
94         digitalWrite(PINO_VIBRADOR, HIGH);
95     } else {
96         // Se não houver obstáculos, desliga o motor
97         Serial.println("Caminho livre.");
98
99         // Desliga o motor (corta o sinal da base do transistor)
100        digitalWrite(PINO_VIBRADOR, LOW);
101    }
102 }
103

```

Fonte: Autora (2025)

Esta abordagem assegura que o alerta seja acionado apenas em situações de risco real, evitando acionamentos desnecessários e garantindo maior conforto e segurança ao usuário.

#### 4.5 MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para avaliar a eficácia e a confiabilidade da bengala eletrônica desenvolvida, foram definidos parâmetros quantitativos que permitem uma análise objetiva dos dados coletados durante os testes práticos.

- Tempo de resposta

O tempo de resposta corresponde ao intervalo, medido em milissegundos (ms), entre o instante em que o sensor ultrassônico detecta um obstáculo dentro da distância de risco pré-configurada e o instante em que o sistema de feedback (vibração) é acionado para alertar o

usuário. Valores reduzidos de tempo de resposta são essenciais para garantir a segurança do usuário.

$$\text{Tempo médio de resposta} = \frac{\sum \text{tempo de resposta de cada teste}}{\text{Quantidade de teste}} \quad (1.2)$$

- Taxa de acerto

A taxa de acerto representa a proporção de vezes em que a bengala eletrônica detectou corretamente a presença de um obstáculo real em seu caminho. Essa métrica é calculada por:

$$\text{Taxa de Acerto} = \frac{\text{Número de detecções corretas}}{\text{Número total de testes}} \times 100 \quad (1.3)$$

Quanto maior a taxa de acerto, mais confiável é o sistema na identificação de obstáculos.

- Taxa de falso positivo

A taxa de falso positivo indica a frequência com que o sistema alerta o usuário sobre um obstáculo inexistente ou localizado fora da zona de perigo. Falsos positivos recorrentes podem comprometer a confiança do usuário no dispositivo. A métrica é obtida por:

$$\text{Taxa falso positivo} = \frac{\text{Número de detecções incorretas}}{\text{Número total de testes}} \times 100 \quad (1.4)$$

- Taxa de falso negativo

A taxa de falso negativo corresponde à falha mais crítica do sistema, pois ocorre quando a bengala não detecta um obstáculo real, expondo o usuário a situações de risco. Essa taxa é calculada da seguinte forma:

$$\text{Taxa de falso negativo} = \frac{\text{Número de obstáculos ignorados}}{\text{Número total de testes}} \times 100 \quad (1.5)$$

- Condições de teste: ambiente controlado e ambiente real

Os testes do protótipo serão realizados em dois tipos de ambientes, com o objetivo de avaliar a robustez do sistema em diferentes condições de uso.

Ambiente controlado: Corresponde a um espaço interno, livre de interferências externas, com iluminação constante e superfícies predominantemente planas. Os obstáculos (como caixas e cadeiras) são posicionados em distâncias previamente conhecidas, possibilitando a calibração e a validação inicial da precisão dos sensores.

Ambiente real: Engloba cenários de uso cotidiano, tais como calçadas, corredores públicos e parques. Esses ambientes introduzem variáveis adicionais, como superfícies irregulares, diferentes condições de iluminação, ruído ambiente e obstáculos em movimento (pessoas), permitindo avaliar o desempenho do sistema em condições reais de operação.

## **5 RESULTADOS**

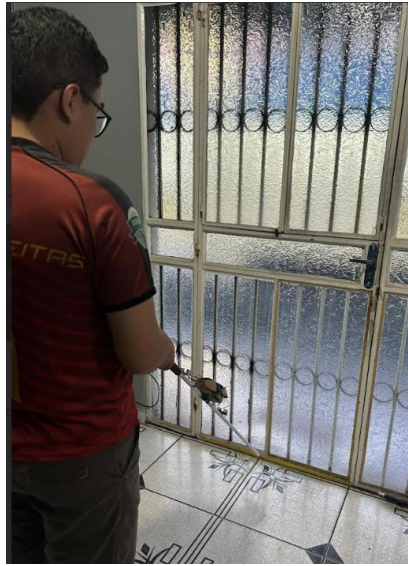
Os testes de validação do protótipo foram conduzidos em dois ambientes distintos e complementares: um ambiente controlado (residência) e um ambiente real (via pública). O objetivo desta abordagem foi avaliar a eficácia do sensor ultrassônico na detecção de obstáculos em cenários cotidianos para um deficiente visual, identificando as particularidades e desafios de cada local.

Para a avaliação de desempenho do protótipo, foram realizados 40 testes no total, com 20 testes em cada um dos 2 cenários definidos. Os cenários foram estruturados para refletir as etapas de calibração e a aplicação final do dispositivo, para cada cenário o ESP32 foi calibrado em 1 metro e 1,5 metros.

### **5.1 AMBIENTE CONTROLADO**

O primeiro ciclo de testes foi executado em um ambiente residencial, simulando condições internas. Os testes foram realizados com o protótipo sendo movido em direção a obstáculos pré-determinados, registrando-se a resposta do sensor (detecção ou falha) e o tempo de resposta.

Figura 20 - Teste de detecção de portas de vidro.



Fonte: Autora (2025)

#### 5.1.1 Calibração em 1,0 metro

Inicialmente, o sensor ultrassônico foi calibrado para detectar obstáculos a uma distância de 1,0 metro. Nesta configuração, o dispositivo demonstrou eficácia na detecção de barreiras frontais sólidas, como paredes, quinas e portas (de vidro e madeira), conforme ilustrado na tabela 3.

Tabela 3 - Métricas de desempenho ambiente controlado (Calibração de 1,0 metro)

<b>Métrica</b>	<b>Ambiente Controlado (1m)</b>
<b>Número de teste</b>	10
<b>Taxa de acerto</b>	80%
<b>Taxa de falso positivo</b>	0
<b>Taxa de falso negativo</b>	20%
<b>Tempo médio de resposta</b>	83ms

Fonte: Autora (2025)

A Taxa de Acerto de 80% e o Tempo Médio de Resposta de 83ms indicam um desempenho satisfatório. No entanto, foi observada uma limitação significativa na detecção de obstáculos suspensos. Em um dos testes, o sensor falhou em detectar janelas abertas, e em outro, o sinal de resposta foi baixo, resultando em uma Taxa de Falso Negativo de 20%. Este tipo de falha representa um risco potencial à segurança do usuário.

### 5.1.2 Calibração em 1,5 metros

Para mitigar a falha na detecção de obstáculos aéreos, uma segunda calibração foi realizada, ajustando a distância de detecção para 1,5 metros. Os testes foram repetidos com o mesmo conjunto de obstáculos, com foco especial naqueles suspensos. Com este novo parâmetro, o sensor conseguiu identificar com sucesso os obstáculos suspensos que não foram detectados na configuração anterior.

Tabela 4 - Métricas de desempenho ambiente controlado (Calibração de 1,5 metros)

<b>Métrica</b>	<b>Ambiente Controlado (1.5m)</b>
Número de teste	10
Taxa de acerto	90%
Taxa de falso positivo	0
Taxa de falso negativo	10%
Tempo médio de resposta	93ms

Fonte: Autora (2025)

Os testes de desempenho indicaram que a Acurácia do sistema alcançou 90%, resultando em uma Taxa de Falsos Negativos de 10%. Este resultado confirma a elevada precisão do protótipo na detecção de objetos em altura. A totalidade da Taxa de Falsos Negativos (10%) foi atribuída a uma falha pontual de leitura do sistema, na qual o dispositivo não conseguiu detectar uma bancada de cozinha. Este caso específico foi classificado como um erro de leitura do sensor, e não como uma limitação inerente ao princípio de detecção.

Apesar da melhoria, a execução dos testes em corredores estreitos introduziu um novo desafio. Devido à expansão lateral do cone de detecção do sensor ultrassônico, o dispositivo passou a detectar as paredes laterais. Embora a Taxa de Falso Positivo de detecção pura permaneça em 0%, essa característica pode gerar alertas contextuais frequentes para o usuário, que poderia interpretar a presença de uma parede lateral como um obstáculo frontal a ser evitado.

## 5.2 AMBIENTE REAL

Os testes em ambiente externo (via pública) foram cruciais para avaliar o desempenho do protótipo em condições de maior complexidade e variabilidade, incluindo variações de

luminosidade e ruídos externos. Os testes consistiram em percorrer um trajeto pré-definido em uma via pública, com obstáculos naturais e artificiais, registrando-se as interações do sensor.

### 5.2.1 Calibração em 1,0 metro

A configuração de 1,0 metro no ambiente real demonstrou a mesma dificuldade observada no ambiente controlado em relação à identificação de objetos altos.

Os testes foram realizados com a presença de obstáculos como carros estacionados, objetos caídos e pessoas. Apesar de a bengala tradicional já exercer a função de auxiliar o deficiente a detectar obstáculos localizado abaixo da linha da cintura, os resultados foram satisfatórios, permitindo ao usuário identificar obstáculos como carros estacionados, objetos e pessoas sem a necessidade de contato direto com a bengala.

Tabela 5 - Métricas de desempenho ambiente real (Calibração de 1,0 metro)

<b>Métrica</b>	<b>Ambiente real (1m)</b>
<b>Número de teste</b>	10
<b>Taxa de acerto</b>	70%
<b>Taxa de falso positivo</b>	0
<b>Taxa de falso negativo</b>	30%
<b>Tempo médio de resposta</b>	87ms

Fonte: Autora (2025)

A Taxa de Falso Negativo de 30% neste cenário reforça a inadequação da calibração de 1,0 metro para ambientes externos, onde a presença de elementos suspensos (como galhos de árvores ou placas baixas) é comum e representa um risco significativo.

### 5.2.2 Calibração em 1,5 metros

Optou-se por priorizar a calibração de 1,5 metros para a aplicação em vias públicas, por ser a distância mais adequada para a detecção de obstáculos elevados, garantindo maior segurança. O trajeto de teste incluiu a passagem por áreas com lixeiras suspensas e toldos de fachadas.

Tabela 6 - Métricas de desempenho ambiente real (Calibração de 1,5 metros)

<b>Métrica</b>	<b>Ambiente real (1.5m)</b>
<b>Número de teste</b>	10
<b>Taxa de acerto</b>	90%
<b>Taxa de falso positivo</b>	0
<b>Taxa de falso negativo</b>	10%
<b>Tempo médio de resposta</b>	95ms

Fonte: Autora (2025)

Nesta configuração, o sensor apresentou excelente desempenho, sendo capaz de identificar obstáculos como lixeiras suspensas e toldos de fachadas. A Taxa de Falso Negativo foi de 10%. A principal dificuldade encontrada durante a execução dos testes foi a detecção de colunas estruturais finas (como postes delgados ou sinalizações estreitas), que representaram Falsos Negativos, pois o feixe ultrassônico pode não ter sido totalmente refletido por essas superfícies estreitas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do protótipo demonstrou resultados satisfatórios em relação ao objetivo proposto, que foi o de ampliar a segurança e a autonomia de pessoas com deficiência visual por meio da detecção de obstáculos. A integração dos sensores ultrassônicos mostrou-se eficiente na identificação de barreiras tanto superiores quanto inferiores, emitindo alertas em tempo hábil para que o usuário pudesse reagir adequadamente. Durante os testes realizados, o sistema apresentou bom desempenho em diferentes condições ambientais, garantindo uma resposta rápida e precisa.

A análise dos resultados evidenciou que a utilização de sensores em alturas distintas, um superior e outro inferior, permitiu a cobertura de áreas que a bengala tradicional não alcança com facilidade. O sensor superior, posicionado a 1,5 metros, obteve excelente desempenho na detecção de obstáculos aéreos, como toldos e lixeiras suspensas, enquanto o sensor inferior contribuiu para evitar colisões com objetos e veículos estacionados. Essa combinação demonstrou-se eficaz para reduzir significativamente o risco de acidentes e aumentar a confiança do usuário durante o deslocamento.

O projeto representa um avanço significativo na área da acessibilidade para pessoas com deficiência visual. O design é leve e proporciona maior conforto durante o uso, enquanto o baixo custo de produção o torna uma alternativa acessível. Além disso, o dispositivo pode ser facilmente adaptado às necessidades de cada usuário, garantindo maior eficiência e personalização em comparação às bengalas eletrônicas disponíveis no mercado.

Em todos os testes, o Tempo Médio de Resposta do sistema (variando entre 83ms e 95ms) foi considerado suficiente para alertar o usuário com antecedência, permitindo o desvio seguro do obstáculo. O alcance médio do sensor manteve estabilidade mesmo sob variações de luminosidade e ruídos externos, demonstrando robustez operacional.

Como principal linha de Trabalho Futuro, propõe-se a integração de técnicas de Inteligência Artificial (IA), para o processamento dos dados do sensor. Esta integração visa transformar a simples detecção de presença em uma análise contextualizada do obstáculo, permitindo a Classificação da Posição Vertical (em cima ou embaixo) e a Sugestão de Rota de Desvio (melhor lado para seguir). Ao passar de um sistema de alerta passivo para um sistema de assistência ativa à navegação, esta funcionalidade otimizará a fluidez e a segurança do deslocamento do deficiente visual, superando limitações atuais como a falha na detecção de

colunas finas e a ambiguidade de alertas em corredores estreitos, resultando em um dispositivo mais inteligente e adaptável a ambientes complexos.

Por fim o projeto contribui para a discussão sobre o uso da tecnologia assistiva como ferramenta de inclusão social e acessibilidade. O sistema proposto representa um avanço relevante na área de auxílio à locomoção de pessoas com deficiência visual, evidenciando o potencial da engenharia e da inteligência embarcada em promover maior independência e qualidade de vida aos usuários.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Educação. *Deficiência visual*. Brasília, DF: MEC, [s. d.]. Disponível em: <https://portal.mec.gov.br/component/tags/tag/deficiencia-visual>. Acesso em: 13 ago. 2025.

SANTOS, Renata Ferreira dos et al. Tecnologia assistiva e suas relações com a qualidade de vida de pessoas com deficiência. *Revista Brasileira de Educação Especial*, Marília, v. 18, n. 4, p. 695-708, out./dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-65382012000400014>. Acesso em: 13 ago. 2025.

TUMA, Eduardo; MATHIAS JUNIOR, Alexandre Ferreira; PENHA, Thaluana Alves da. Acessibilidade e mobilidade do deficiente visual: contribuições no âmbito das cidades inteligentes – o caso da Vila Clementino. *Revista Controle-Doutrina e Artigos*, Fortaleza, v. 21, n. 2, p. 28-62, jul./dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.32586/rcda.v21i2.835>.

KERSCHBAUMER, Ricardo. *Microcontroladores*. [S. l.: s. n.], 2025. Apostila.

ESP32-WROOM-32 Datasheet. Shanghai: Espressif Systems, 2019. Disponível em: [https://documentation.espressif.com/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://documentation.espressif.com/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf). Acesso em: 25 nov. 2025.

**ANDRADE, Sueny Aparecida. Tecnologia Assistiva: Aspectos Conceituais e Implicações Pedagógicas. Periódico Multidisciplinar da FESA Educacional**, [S. l.], v. 3, n. 20, ago. 2024. DOI: 10.56069/2676-0428.2024.481.

GARBELLOTO, Vinicius. Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento logístico de baixo custo baseado em ESP32 no contexto da Indústria 4.0. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola Politécnica e de Artes, Goiânia, 2023.

MORGAN, Elijah J. *HC-SR04 Ultrasonic Sensor*. [S. l.], 16 nov. 2014. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132203/ETC2/HC-SR04.html>. Acesso em: 26 set. 2025.

**REIS, Lara Elisa Pereira.** Desenvolvimento de um protótipo de controle de nível baseado em Arduino: uma abordagem utilizando sensor ultrassônico. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

**MOTA, Ricardo Fábio da Silva.** *Sensor de distância por infravermelhos para a caracterização do espaço de trabalho*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) — Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2018.

BENET, G.; BLANES, F.; SIMÓ, J. E.; PÉREZ, P. Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 40, n. 4, p. 255-266, 2002.

BERGANDELMAN, Ariel Dov; MENDES, Felipe Hecke. *Desenvolvimento do projeto e protótipo de dispositivo para despertar surdos*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Curitiba, 2014.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria Especial dos Direitos Humanos. Comitê de Ajudas Técnicas. **Tecnologia Assistiva**. Brasília, DF: SEDH, 2009.

RODRIGUES, Patrícia Rocha; ALVES, Lynn Rosalina Gama. *Tecnologia Assistiva – uma revisão do tema. HOLOS*, Natal, [s. v.], [s. n.], [s. p.], 2013.

**OLIVEIRA, Rafael Souza.** *Tecnologia assistiva para bengalas de pessoas com deficiência visual*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Instituto Federal de Goiás, Câmpus Anápolis, Anápolis, 2025.

SILVA, Marcelo Martins da. **Smart Glasses**: dispositivo vestível em forma de óculos para auxiliar deficientes visuais na detecção de obstáculos. 2020. [80] f. Trabalho de Conclusão

de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Quixadá, 2020.

ETFSA. Dificuldades dos deficientes visuais: como ajudar no dia a dia?. [S. l.: s. n., s. d.]. Disponível em: <https://etfa.com.br/dificuldades-dos-deficientes-visuais-como-ajudar-no-dia-a-dia/>. Acesso em: 2 out. 2025.

ASSIS, D. C. A. *O caminhar da pessoa cega: análise da exploração de elementos do espaço urbano por meio da bengala longa*. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2018. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/2467/1/O%20caminhar%20da%20pessoa%20cega%3a%20analise%20da%20exploracao%20de%20elementos%20do%20espaco%20urbano%20por%20meio%20da%20bengala%20longa.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.

ELETROGATE. Micro motor de vibração Vibracall 1027. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/micro-motor-de-vibracao-vibracall>. Acesso em: 13 out. 2025.

MAKERHERO. Saiba como funciona o módulo TP4056. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.makehero.com/blog/saiba-como-funciona-o-modulo-tp4056/>. Acesso em: 13 out. 2025.

NOGUEIRA, Eduardo José; ARRUDA, Luiz Fernando Marquez. *Instrumentação eletroeletrônica*. Indaial: UNIASSELVI, 2022.

BORGES, João Victor Fialho et al. Tecnologia assistiva: bengala eletrônica microcontrolada para navegação de deficientes visuais. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 21, n. 10, p. 01-20, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n10-029.

PUJARA, Dhyhanik et al. Enhanced Smart Stick Design for Visually Impaired. *In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART ELECTRONIC SYSTEMS (ISES)*, 2023, Warangal. **Anais** [...]. Warangal, Índia: IEEE, 2023. p. 445-448. DOI: 10.1109/iSES58672.2023.00100.

SINGH, G. *et al.* A Cane-mounted System for Dynamic Orientation Prediction for Correcting Incorrect Cane-tapping by Visually Challenged Persons. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), 2025, Atlanta. Anais [...]. Atlanta, USA: IEEE, 2025. p. 720-726. DOI: 10.1109/ICRA55743.2025.11127542.*

ALVES, N. M. V. *et al.* Dispositivo para auxílio de deficientes visuais utilizando sensor ultrassônico. *In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 9., 2016, Uberlândia. Anais [...]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2016. p. 1-3.*