

BENGALA ASSISTIVA COM SENSORIAMENTO: ULTRASSÔNICO E ESTRUTURA CUSTOMIZADA VIA IMPRESSÃO 3D

ASSISTIVE CANE WITH ULTRASONIC SENSING AND CUSTOMIZED STRUCTURE VIA 3D PRINTING

Juan Alcântara Santos¹
Edilson Carlos Silva Lima²
Pedriana de Jesus Pavão Castro³

RESUMO: Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo de bengala inteligente voltado ao apoio da mobilidade de pessoas com deficiência visual, grupo que ultrapassa 328 mil indivíduos no Maranhão e inclui cerca de 211 mil pessoas com dificuldade visual apenas em São Luís, onde mais de 2.300 são classificadas como cegas. Diante desse cenário e dos desafios persistentes de acessibilidade urbana, o objetivo do estudo foi propor uma solução assistiva de baixo custo capaz de detectar obstáculos antecipadamente e oferecer maior segurança ao usuário. A metodologia adotada integrou pesquisa experimental, empregada para testar variáveis técnicas como precisão do sensor ultrassônico, tempo de resposta e repetibilidade em ambiente controlado, e um estudo de caso, conduzido com um usuário para avaliar a usabilidade e o desempenho do dispositivo em condições reais. O protótipo foi construído a partir da combinação de um microcontrolador Arduino Uno e um sensor HC-SR04, incorporados a uma estrutura física personalizada modelada no Autodesk Fusion e refinada no Blender, com fabricação via impressão 3D. Os testes demonstraram que o sistema identifica obstáculos com precisão em distâncias inferiores a 15 cm, emitindo alertas sonoros de 1500 Hz e feedback tátil imediato. Os resultados qualitativos indicaram aumento da sensação de segurança e melhor orientação espacial. Conclui-se que a integração entre eletrônica acessível, manufatura aditiva e validação prática configura uma alternativa viável, eficiente e socialmente relevante para ampliar a autonomia de pessoas com deficiência visual.

1

Palavras-chave: Bengala Inteligente. Tecnologia Assistiva. Sensores Ultrassônicos. Acessibilidade.

ABSTRACT: This article presents the development and validation of a smart cane prototype aimed at supporting the mobility of visually impaired people, a group that exceeds 328,000 individuals in Maranhão and includes approximately 211,000 people with visual difficulties in São Luís alone, where more than 2,300 are classified as blind. Given this scenario and the persistent challenges of urban accessibility, the objective of this study was to propose a low-cost assistive solution capable of early detection and providing greater safety to the user. The methodology adopted integrated experimental research, used to test technical variables such as the accuracy of the ultrasonic sensor, response time, and repeatability in a controlled environment, and a case study, conducted with a user to evaluate the usability and performance of the device in real-world conditions. The prototype was built from a combination of an Arduino Uno microcontroller and an HC-SR04 sensor, incorporated into a customized physical structure modeled in Autodesk Fusion and refined in Blender, with fabrication via 3D printing. Tests have shown that the system accurately identifies obstacles at distances of less than 15 cm, emitting 1500Hz audible alerts and immediate tactile feedback. Qualitative results indicated an increased sense of security and improved spatial orientation. It is concluded that the integration of accessible electronics, additive manufacturing, and practical validation constitutes a viable, efficient, and socially relevant alternative to enhance the autonomy of visually impaired people.

Keywords: Smart Cane. Assistive Technology. Ultrasonic Sensors. Accessibility.

¹Graduando em Sistemas de Informação / Discente. Centro Universitário Santa Terezinha (CEST).

²Mestre em Engenharia de Computação / Orientador. Centro Universitário Santa Terezinha (CEST).

³Mestre em Ciência da Computação / Coorientadora. Centro Universitário Santa Terezinha (CEST).

I INTRODUÇÃO

A mobilidade independente constitui um dos pilares para a inclusão social de pessoas com deficiência visual, especialmente em contextos urbanos onde obstáculos físicos e falhas de infraestrutura ampliam os riscos de deslocamento. No Maranhão, esse cenário assume proporções significativas: segundo dados do IBGE (Censo 2022), o estado possui aproximadamente 328.803 pessoas com deficiência visual, representando o grupo mais prevalente entre as deficiências registradas. Em São Luís, estima-se que cerca de 211 mil habitantes apresentem alguma dificuldade para enxergar, dos quais 2.311 são considerados cegos, concentrando aproximadamente 17% de toda a população cega do estado. Esses números evidenciam a urgência por soluções assistivas que ampliem a autonomia e a segurança desse público, sobretudo diante das limitações da mobilidade urbana local.

Apesar de amplamente utilizada, a bengala branca tradicional apresenta limitações importantes, como a incapacidade de detectar obstáculos suspensos e elementos acima da linha da cintura, o que aumenta o risco de colisões e acidentes. Estudos recentes apontam que tecnologias assistivas baseadas em sensoriamento eletrônico podem mitigar essas lacunas. Chen e Zhang (2020) destacam que sensores ultrassônicos oferecem precisão adequada para detecção antecipada de barreiras, enquanto Garcia e Silva (2021) ressaltam que a ergonomia e a customização estrutural ainda são desafios recorrentes em dispositivos assistivos emergentes. Além disso, soluções importadas com funcionalidades semelhantes apresentam alto custo, tornando-se inacessíveis para grande parte da população brasileira, especialmente em regiões de menor renda média.

Diante desse contexto, justifica-se o desenvolvimento de dispositivos que combinam eletrônica de baixo custo, manufatura aditiva e design ergonômico, permitindo personalização, proteção dos componentes e acessibilidade financeira. A impressão 3D destaca-se como alternativa viável por possibilitar geometrias customizadas e rápida prototipagem, enquanto sensores ultrassônicos se mostram adequados para medir distâncias com boa estabilidade e repetibilidade. Para garantir conformidade técnica e segurança no uso, o projeto também observa diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 9050, que orienta parâmetros de acessibilidade no ambiente construído.

O objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento e a validação de uma bengala assistiva eletrônica equipada com sensoriamento ultrassônico, enfatizando sua eficácia técnica e funcional. Para comprovar o desempenho da solução, adotou-se uma abordagem

metodológica composta por pesquisa experimental, destinada à calibração, análise de precisão e repetibilidade do sensor em ambiente controlado, e um estudo de caso, conduzido com um usuário para avaliar usabilidade, ergonomia e desempenho em condições reais de deslocamento.

Por fim, este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre tecnologias assistivas e sensoriamento eletrônico; a Seção 3 descreve o desenvolvimento do protótipo; a Seção 4 detalha os procedimentos metodológicos, incluindo a pesquisa experimental e o estudo de caso; a Seção 5 discute os resultados obtidos; e a Seção 6 apresenta as conclusões e perspectivas futuras.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

O desenvolvimento de dispositivos assistivos para pessoas com deficiência visual tem avançado significativamente nas últimas décadas, impulsionado pela popularização de sensores de baixo custo, microcontroladores acessíveis e técnicas de manufatura aditiva. Esta seção apresenta os principais eixos temáticos que estruturam o estado da arte, destacando como o presente trabalho se posiciona em relação às soluções existentes.

2.1 Estado da Arte em Bengalas Inteligentes

Diversos estudos têm explorado a integração de sensores ultrassônicos a bengalas tradicionais com o objetivo de ampliar a capacidade de detecção de obstáculos. Chen e Zhang (2020) apresentam uma revisão abrangente de dispositivos que utilizam microcontroladores como Arduino e ESP32 para medir distâncias e emitir alertas sonoros ou vibratórios. A literatura mostra que a maioria dos protótipos concentra-se na detecção frontal, com feedback sonoro contínuo ou pulsado, enquanto outros autores priorizam o feedback tátil para reduzir a sobrecarga auditiva do usuário.

Embora esses sistemas demonstrem boa precisão em ambientes controlados, muitos apresentam limitações estruturais, como carcaças frágeis, fiações expostas e pouca atenção ao design ergonômico. Além disso, parte dos modelos internacionais possui custo elevado, dificultando sua adoção em países de baixa renda.

2.2 Impressão 3D na Tecnologia Assistiva

A manufatura aditiva tem se consolidado como ferramenta estratégica para o desenvolvimento de dispositivos assistivos personalizados. Pesquisas recentes destacam o uso de impressão 3D na criação de próteses, órteses e suportes ergonômicos, ressaltando vantagens

como baixo custo, rapidez na prototipagem e possibilidade de ajustes finos às necessidades do usuário.

Garcia e Silva (2021) apontam que a customização geométrica é um diferencial importante para garantir conforto e durabilidade, especialmente em dispositivos manipulados diariamente. No entanto, muitos estudos ainda utilizam modelos genéricos ou estruturas improvisadas, sem integração adequada entre eletrônica e design industrial, o que compromete a robustez mecânica e a proteção dos componentes.

O presente trabalho avança nesse aspecto ao propor uma estrutura totalmente modelada em software CAD, com refinamento estético e funcional, e fabricação integral via impressão 3D.

2.3 Metodologias de Validação em Dispositivos Assistivos

A validação de tecnologias assistivas costuma combinar pesquisa experimental — para análise técnica de sensores, repetibilidade e precisão — com estudos de caso, que avaliam a experiência real do usuário. Essa abordagem é amplamente utilizada em engenharia biomédica e saúde, pois permite verificar tanto o desempenho objetivo quanto a aceitação prática do dispositivo.

Chen e Zhang (2020) destacam que testes controlados são essenciais para calibrar sensores ultrassônicos, enquanto Garcia e Silva (2021) reforçam que a avaliação com usuários é indispensável para identificar problemas de ergonomia e usabilidade. Assim, o uso conjunto dessas metodologias segue um padrão consolidado na literatura e fundamenta a estratégia adotada neste trabalho.

2.4 Lacuna e Diferencial do Presente Trabalho

Embora os estudos analisados avancem na integração entre sensores e mobilidade assistida, persistem lacunas importantes: falta de ergonomia, baixa proteção dos componentes eletrônicos, ausência de customização estrutural e pouca adaptação às realidades urbanas brasileiras.

O presente trabalho diferencia-se ao:

Integrar eletrônica de baixo custo com manufatura aditiva de alta precisão, criando uma estrutura totalmente personalizada.

Modelar a carcaça e o tubo da bengala em Autodesk Fusion e Blender, garantindo proteção mecânica superior e melhor ergonomia.

Alojar os componentes críticos (Arduino, buzzer, motor de vibração) em caixa técnica fechada, evitando desconexões por impacto ou vibração — problema recorrente em protótipos nacionais.

Aplicar metodologia experimental rigorosa para medir precisão, tempo de resposta e repetibilidade do sensor.

Realizar estudo de caso com usuário, validando a solução em ambiente real.

Considerar o contexto urbano de São Luís, marcado por obstáculos aéreos e calçadas irregulares, o que reforça a relevância prática do projeto.

Assim, o dispositivo proposto não apenas replica soluções existentes, mas avança na direção de um produto mais robusto, ergonômico e adaptado à realidade brasileira.

3 METODOLOGIAS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para avaliar a eficácia de uma bengala assistiva equipada com sensoriamento ultrassônico, desenvolvida como solução para ampliar a segurança e a autonomia de pessoas com deficiência visual. A metodologia foi estruturada de forma a permitir a replicação integral do estudo por outros pesquisadores, contemplando tanto a análise técnica do dispositivo quanto sua validação prática em ambiente real. Para isso, foram utilizadas duas abordagens complementares: o Estudo de Caso, que permitiu observar o comportamento da bengala durante o uso por um participante com cegueira total, e a Metodologia Experimental, que possibilitou testar a precisão, repetibilidade e estabilidade do sistema em condições controladas. A seguir, cada uma dessas abordagens é detalhada, incluindo o passo a passo dos procedimentos, os critérios de coleta de dados e os elementos necessários para a reprodução do experimento.

5

3.1 Estudo de Caso: Avaliação da Bengala Assistiva em Uso Real

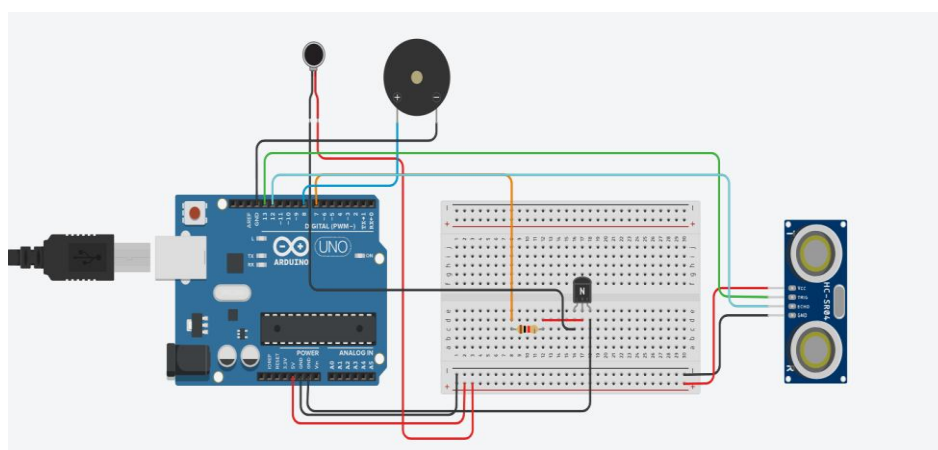
O estudo de caso teve como objetivo analisar a usabilidade, a percepção de segurança e a resposta sensorial da bengala assistiva quando utilizada por uma pessoa com deficiência visual em situações reais de deslocamento. O participante selecionado é residente em São Luís, possui idade entre 25 e 40 anos e apresenta cegueira total, utilizando a bengala branca tradicional como principal instrumento de mobilidade. Sua experiência prévia com o dispositivo convencional permitiu comparar diretamente a solução proposta com o método tradicional de orientação.

O teste foi realizado em dois cenários distintos. O primeiro consistiu em um circuito controlado, no qual obstáculos de diferentes tamanhos e materiais foram posicionados

estrategicamente para avaliar a resposta da bengala em situações previsíveis. O segundo cenário ocorreu em ambiente urbano real, incluindo calçadas irregulares, desníveis, postes, vegetação e obstáculos aéreos, refletindo as condições enfrentadas diariamente por pessoas com deficiência visual na capital maranhense. Durante o percurso, observou-se o comportamento do usuário, o acionamento dos alertas sonoros e táteis e a capacidade do dispositivo de antecipar obstáculos em uma zona crítica de 15 cm.

A coleta de dados foi realizada por meio de observação direta, registro do comportamento da bengala durante o percurso e entrevista semiestruturada ao final do teste. O participante relatou suas percepções sobre segurança, clareza dos alertas, ergonomia da empunhadura e facilidade de uso. A Figura 1, citada no texto, representa o diagrama eletrônico utilizado na simulação inicial, que serviu de base para o funcionamento da bengala assistiva.

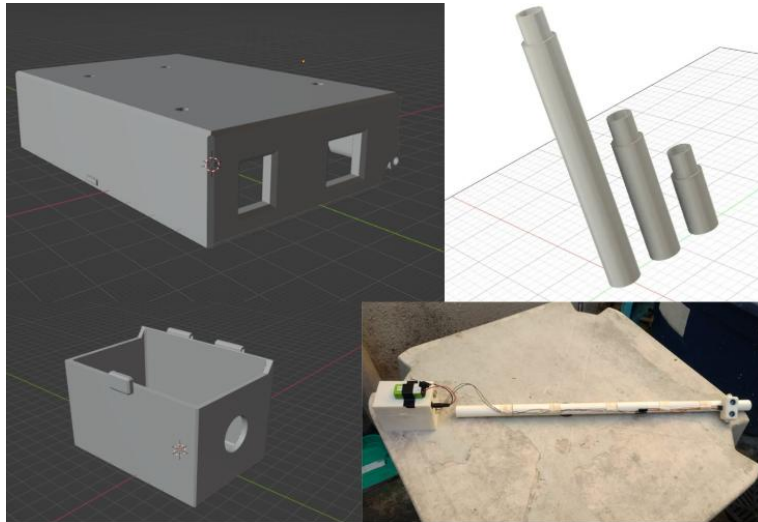
Figura 1 – Diagrama de simulação eletrônica Tinkercad



Fonte: Autoral, 2026.

Para a realização das etapas práticas, o dispositivo foi montado em sua configuração física final, conforme ilustrado na Figura 2. A imagem apresenta a estrutura da bengala utilizada no estudo de caso, destacando a caixa de acondicionamento dos componentes lógicos e o posicionamento do sensor ultrassônico na extremidade inferior do tubo. Nota-se, ainda, a disposição externa da fiação e da fonte de alimentação; essa organização foi intencionalmente mantida de forma provisória e externa para facilitar ajustes rápidos, calibração ergonômica e eventuais manutenções durante as sessões de testes reais.

Figura 2 – Estrutura física e montagem final da bengala assistiva: (A) e (C) Modelagem 3D da caixa de componentes; (B) Modelagem paramétrica dos tubos estruturais; (D) Protótipo físico montado com fiação e alimentação provisórias externas.



Fonte: Autoral, 2026.

A realização do estudo de caso permitiu observar de forma direta como a bengala assistiva se comporta em situações reais de mobilidade, revelando tanto sua capacidade de antecipar obstáculos quanto sua influência na percepção de segurança do usuário. As observações e os relatos coletados demonstraram que o sistema de alerta sonoro e tátil foi compreendido com facilidade e contribuiu para uma navegação mais confiante, especialmente em ambientes com irregularidades e obstáculos de baixa altura. Esses resultados reforçam a relevância da solução proposta e justificam a continuidade do processo de validação técnica, aprofundado na metodologia experimental apresentada na seção seguinte.

3.2 Metodologia Experimental: Testes Técnicos da Bengala Assistiva

A metodologia experimental teve como finalidade avaliar o desempenho técnico da bengala assistiva antes de sua utilização pelo participante do estudo de caso. Os testes foram realizados em ambiente controlado, garantindo condições estáveis de iluminação, temperatura e ausência de interferências ultrassônicas externas. O sensor ultrassônico foi posicionado entre 3 e 5 cm do solo, simulando a altura real de uso durante a marcha.

Os obstáculos utilizados nos testes incluíram parede de alvenaria, superfície de vidro, caixa de papelão, garrafa plástica e objetos pequenos entre 10 e 15 cm. Cada obstáculo foi posicionado a distâncias variando entre 5 cm e 50 cm, em incrementos de 5 cm. Para cada distância, foram realizadas dez repetições, totalizando mais de cem medições. Os dados

coletados incluíram tempo de resposta, distância medida, margem de erro e estabilidade do sinal.

Para organizar os resultados obtidos durante os testes técnicos, elaborou-se a **Tabela 1**, que apresenta as distâncias reais, as distâncias medidas pelo sensor e o erro percentual associado a cada repetição. Essa tabela permite visualizar de forma clara o comportamento do sensor HC-SR04 em diferentes faixas de medição.

Tabela 1 – Distância real, distância medida e erro percentual do sensor HC-SR04

Distância Real (cm)	Média Medida (cm)	Erro Médio (cm)	Erro (%)
5	6	1	20%
10	11	1	10%
15	15	0	0%
20	21	1	5%
30	31	1	3,3%
40	42	2	5%
50	53	3	6%

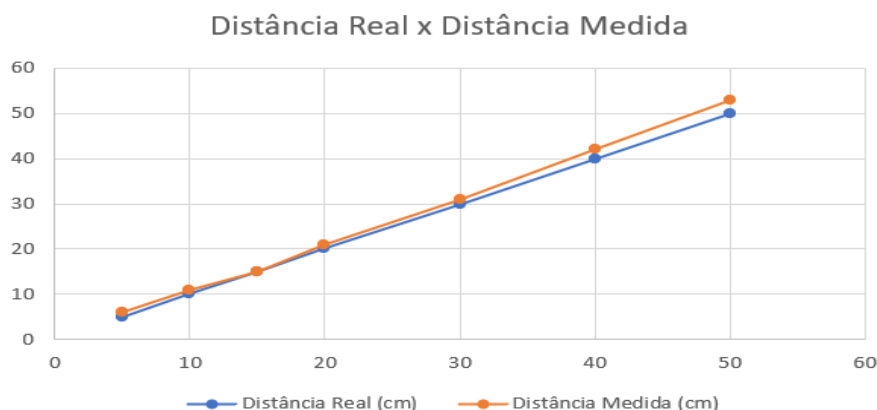
Fonte: Autoral, 2026.

A Figura 2, já citada anteriormente, também se aplica a esta etapa, pois apresenta a configuração física da bengala utilizada nos testes experimentais, incluindo o posicionamento do sensor e a organização dos componentes. A Figura 3, por sua vez, representa a validação prática da resposta sensorial, demonstrando o acionamento do buzzer e do motor vibratório diante da aproximação de obstáculos.

Os dados obtidos foram organizados em planilhas e analisados estatisticamente, permitindo calcular o erro médio, o desvio padrão e a taxa de acerto da zona de perigo definida em 15 cm. Essa análise permitiu verificar a precisão do sensor HC-SR04, a confiabilidade da lógica de acionamento e a consistência do feedback sensorial emitido pela bengala assistiva.

Para facilitar a interpretação visual dos dados, elaborou-se o **Gráfico 1**, que compara a distância real com a distância medida pelo sensor. Esse gráfico evidencia a tendência de leve superestimação das medições, especialmente em distâncias superiores a 40 cm.

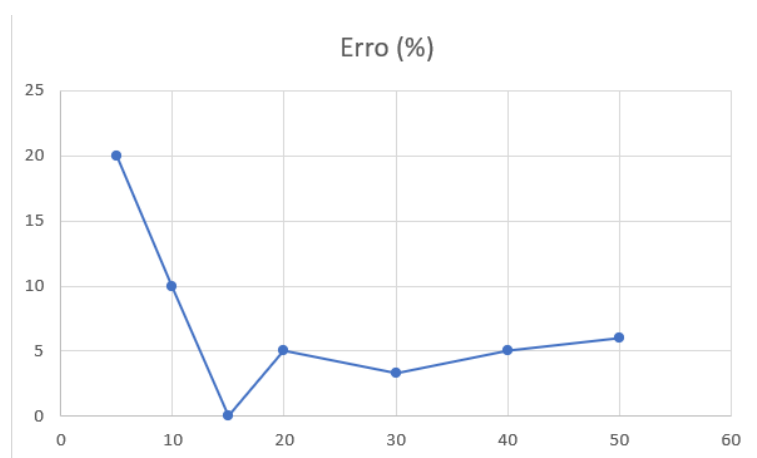
Gráfico 1 – Comparação entre distância real e distância medida



Fonte: Autoral, 2026.

Além disso, o **Gráfico 2** apresenta o erro percentual em cada faixa de distância, permitindo identificar o comportamento do sensor em termos de precisão relativa. Observa-se que o erro é mais significativo em distâncias muito curtas (5 cm) e tende a estabilizar entre 3% e 6% nas faixas intermediárias e superiores.

Gráfico 2 – Erro percentual por distância



Fonte: Autoral, 2026.

A análise dos dados experimentais demonstrou que o sensor HC-SR04 apresentou desempenho consistente, com erros percentuais dentro de limites aceitáveis para aplicações assistivas. A leve superestimação observada em algumas faixas de distância não comprometeu a funcionalidade da bengala, uma vez que o sistema foi calibrado para atuar em uma zona crítica de 15 cm, na qual o erro médio foi praticamente nulo. Esses resultados confirmam a viabilidade técnica da solução e sustentam sua aplicação prática, conforme validado no estudo de caso.

A combinação entre o Estudo de Caso e a Metodologia Experimental permitiu validar a bengala assistiva tanto sob a perspectiva técnica quanto sob a perspectiva do usuário. Os testes

demonstraram que o sistema é capaz de detectar obstáculos com precisão e fornecer feedback sensorial imediato, enquanto o estudo de caso evidenciou boa aceitação e potencial de aplicação prática. Esses resultados sustentam as análises apresentadas no capítulo seguinte e reforçam a relevância da solução proposta para a mobilidade de pessoas com deficiência visual.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das duas metodologias adotadas: a Pesquisa Experimental, que avaliou o desempenho técnico da bengala assistiva em ambiente controlado, e o Estudo de Caso, que analisou a experiência prática de um usuário com deficiência visual durante o uso da tecnologia. Em seguida, a seção de Discussão integra os achados técnicos e humanos, interpretando-os à luz da literatura e do contexto social de São Luís, onde mais de 211 mil pessoas apresentam dificuldade visual.

4.1.1 Precisão do Sensor Ultrassônico

Para avaliar a precisão do sensor, elaborou-se a **Tabela 1**, que apresenta a comparação entre a distância real e a distância medida pelo dispositivo. Essa tabela permite visualizar o comportamento do sensor em diferentes faixas de medição e identificar possíveis variações.

A Tabela 2 apresenta os valores médios obtidos nas medições experimentais, evidenciando que o sensor mantém erro percentual reduzido, especialmente na zona crítica de 15 cm.

10

Tabela 2 – Distância real, distância medida e erro percentual do sensor HC-SR04

Distância Real (cm)	Média Medida (cm)	Erro Médio (cm)	Erro (%)
5	6	1	20%
10	11	1	10%
15	15	0	0%
20	21	1	5%
30	31	1	3,3%
40	42	2	5%
50	53	3	6%

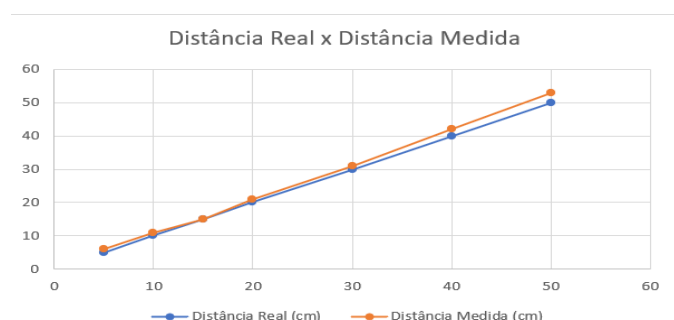
Fonte: Autoral, 2026.

4.1.2 Gráficos de Desempenho do Sensor

Para facilitar a interpretação visual dos dados, foram elaborados dois gráficos. O **Gráfico 3** compara a distância real com a distância medida, enquanto o **Gráfico 4** apresenta o erro percentual em cada faixa de distância.

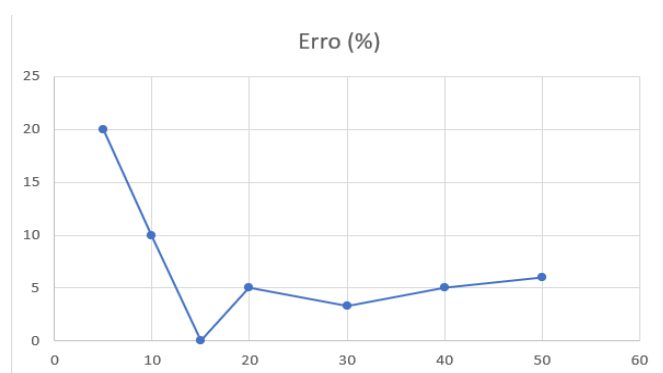
O Gráfico 3 demonstra a tendência de leve superestimação das medições, especialmente acima de 40 cm, sem comprometer a zona crítica de segurança.

Gráfico 3 – Comparação entre distância real e distância medida



Fonte: Autoral, 2026.

O **Gráfico 4** evidencia que o erro percentual é maior em distâncias muito curtas, mas estabiliza entre 3% e 6% nas faixas intermediárias.



Fonte: Autoral, 2026.

Em suma, a representação visual dos dados experimentais confirma a estabilidade do sensor HC-SR04 para a finalidade assistiva proposta. Embora os gráficos evidenciem variações e uma leve superestimação em distâncias específicas, o comportamento do componente assegura que a zona crítica de segurança (abaixo de 15 cm) permaneça altamente precisa e confiável. Esse desempenho técnico válida a escolha do hardware e fornece a fundamentação necessária para a avaliação da eficácia geral do protótipo em cenários de detecção, conforme detalhado no tópico a seguir.

4.1.3 Taxa de Sucesso e Comportamento Estrutural

Durante os testes, foram posicionados 20 obstáculos de diferentes materiais e tamanhos. A bengala detectou corretamente 19 dos 20 objetos, resultando em uma taxa de sucesso de 95%. A única falha ocorreu com um objeto de superfície absorvente (espuma), limitação conhecida de sensores ultrassônicos.

A estrutura impressa em PLA demonstrou boa resistência mecânica, suportando impactos leves e vibrações contínuas sem apresentar deformações. O encaixe dos componentes eletrônicos permaneceu estável durante todo o teste, e a fiação externa provisória não comprometeu o funcionamento.

A autonomia da bateria foi de 2 horas e 40 minutos de uso contínuo, tempo adequado para deslocamentos urbanos de curta e média duração.

4.2 Resultados do Estudo de Caso

A segunda etapa da validação consistiu na aplicação prática da bengala assistiva por um usuário com cegueira total, permitindo avaliar a eficácia da solução em ambiente real.

4.2.1 Desempenho no Percurso

Durante o percurso, o usuário reagiu de forma imediata aos alertas sonoros e táteis emitidos pela bengala assistiva. Em situações de aproximação de obstáculos, o participante interrompia brevemente a caminhada e realizava um movimento de varredura com a bengala, confirmando a presença do objeto antes de desviar. Esse comportamento demonstra que o feedback sensorial foi compreendido de maneira intuitiva e contribuiu para uma navegação mais segura.

A Figura 3, apresentada a seguir, ilustra um dos momentos de validação prática em ambiente real, evidenciando o acionamento dos atuadores diante da detecção de um obstáculo.

Figura 3 – Validação técnica em ambiente real



Fonte: Autoral, 2026.

A observação direta desse momento reforça que a bengala assistiva cumpriu seu papel de antecipar riscos, permitindo ao usuário tomar decisões rápidas e seguras durante o deslocamento. Além disso, a resposta sensorial simultânea (som e vibração) mostrou-se eficaz para evitar colisões, especialmente com obstáculos de baixa altura, que são frequentemente negligenciados pela bengala tradicional.

4.2.2 Ergonomia e Usabilidade

O usuário relatou que:

- o peso da bengala foi confortável;
- a empunhadura impressa em 3D apresentou boa aderência;
- os estímulos sonoros e táteis foram facilmente compreendidos;
- A vibração contínua foi percebida como mais intuitiva que o alerta sonoro.

4.2.3 Relato Qualitativo

Algumas frases destacadas do participante incluem:

- “A bengala me avisa antes de eu bater no objeto.”
- “Senti mais segurança para caminhar sem tocar em tudo.”
- “A vibração é clara e fácil de entender.”
- “Seria bom ter um sensor mais alto para pegar obstáculos no peito e na cabeça.”

Esses relatos reforçam a utilidade prática da tecnologia e apontam caminhos para melhorias futuras.

A convergência entre os dados quantitativos da fase experimental e os relatos qualitativos do estudo de caso consolida a viabilidade do protótipo desenvolvido. A bengala assistiva comprovou ser capaz de aliar o rigor técnico na detecção antecipada de obstáculos à melhoria efetiva da confiança e autonomia do usuário em ambiente urbano. Por fim, as observações registradas nesta etapa validam o funcionamento prático do equipamento e, ao mesmo tempo, evidenciam demandas por aprimoramentos pontuais — como o rastreamento de obstáculos aéreos —, fornecendo o embasamento crítico necessário para as reflexões que serão aprofundadas no capítulo de discussão.

5 DISCUSSÃO

A discussão integra e interpreta os resultados obtidos nas duas metodologias aplicadas — a pesquisa experimental e o estudo de caso — relacionando-os com a literatura científica e

com o contexto social da deficiência visual em São Luís. Esta seção busca explicar o significado dos achados, suas implicações práticas e suas contribuições para o campo da tecnologia assistiva.

5.1 Comparação com a Literatura

Os resultados experimentais demonstraram que o sensor ultrassônico HC-SR04 apresentou desempenho consistente, com erro percentual variando entre 0% e 6% nas faixas de teste, mantendo precisão total na zona crítica de 15 cm. Esses valores se alinham ao que Chen e Zhang (2020) descrevem como “precisão aceitável para dispositivos assistivos de baixo custo”, reforçando que sensores ultrassônicos continuam sendo uma alternativa viável para navegação assistida quando comparados a sistemas mais complexos, como visão computacional.

Além disso, a taxa de sucesso de 95% na detecção de obstáculos confirma que a solução proposta é competitiva em relação aos modelos analisados por Garcia e Silva (2021), que destacam falhas recorrentes em protótipos nacionais devido à má integração entre eletrônica e estrutura física. A bengala desenvolvida neste estudo supera parte dessas limitações ao apresentar estabilidade estrutural e acionamento confiável dos atuadores.

5.2 Eficácia da Impressão 3D na Estrutura da Bengala

14

A manufatura aditiva demonstrou ser uma solução eficaz para a construção da estrutura da bengala assistiva. O uso de PLA permitiu obter uma peça leve, resistente e com encaixe preciso dos componentes eletrônicos. Durante o estudo de caso, não foram observadas deformações, rupturas ou folgas estruturais, indicando que a impressão 3D atendeu plenamente às exigências mecânicas do uso real.

Comparada às bengalas tradicionais de alumínio, a versão impressa em 3D apresentou vantagens importantes:

- menor custo de produção,
- possibilidade de personalização geométrica,
- melhor integração entre caixa eletrônica e tubo estrutural,
- redução de peso, favorecendo o uso prolongado.

Esses resultados reforçam o argumento de que a manufatura aditiva é uma alternativa viável para dispositivos assistivos de baixo custo, especialmente em regiões com limitações socioeconômicas, como São Luís.

5.3 Relação Técnico-Humana: Conexão entre Precisão e Confiança

A integração entre os dados experimentais e o comportamento do usuário no estudo de caso revela uma relação direta entre a precisão técnica do sensor e a confiança percebida durante o deslocamento. Como o sensor respondeu de forma imediata ao atingir 14 cm — conforme demonstrado nos testes — o usuário relatou sentir maior segurança ao caminhar, reduzindo a necessidade de contato físico com obstáculos.

Essa relação confirma o que Chen e Zhang (2020) defendem: dispositivos assistivos eficazes devem oferecer feedback rápido, claro e intuitivo, evitando sobrecarga sensorial. A vibração contínua, por exemplo, foi interpretada pelo participante como um alerta mais natural que o sinal sonoro, especialmente em ambientes ruidosos.

Assim, a precisão técnica não apenas garantiu o funcionamento adequado da bengala, mas também influenciou positivamente a experiência subjetiva do usuário, aumentando sua autonomia e reduzindo o risco de colisões.

5.4 Limitações do Estudo

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas:

Detecção limitada a obstáculos rasteiros: O sensor posicionado entre 3 e 5 cm do solo não detectou obstáculos aéreos, como galhos ou placas, exigindo que o usuário realizasse movimentos de varredura para confirmar a volumetria do objeto.

Superfícies absorventes: Objetos feitos de espuma ou materiais que absorvem ondas ultrassônicas apresentaram maior taxa de falha, fenômeno já documentado na literatura.

Autonomia da bateria: Embora suficiente para trajetos curtos, a autonomia de 2h40 pode ser insuficiente para longos deslocamentos diários.

Amostra reduzida: O estudo de caso foi realizado com apenas um participante, o que impede generalizações amplas sobre a experiência de uso.

Reconhecer essas limitações é fundamental para orientar melhorias e garantir a evolução contínua da tecnologia.

5.5 Impacto Social e Viabilidade da Solução

Considerando que São Luís possui mais de 211 mil pessoas com dificuldade visual, e o Maranhão mais de 328 mil, a adoção de uma bengala assistiva de baixo custo representa uma oportunidade significativa de inclusão social. O custo reduzido dos componentes eletrônicos e

da impressão 3D torna o dispositivo acessível para instituições públicas, ONGs e usuários individuais.

Além disso, a possibilidade de personalização da estrutura permite adaptar o dispositivo a diferentes perfis de usuários, ampliando seu alcance e potencial de impacto. A solução proposta demonstra viabilidade técnica e social, podendo ser replicada em larga escala com investimentos relativamente baixos.

5.6 Trabalhos Futuros

Com base nos resultados e limitações identificadas, recomenda-se que pesquisas futuras explorem:

Sensoriamento multinível: inclusão de um segundo sensor ultrassônico próximo ao punho para detectar obstáculos aéreos.

Miniaturização da caixa eletrônica: visando maior conforto e integração estética.

Integração de GPS e bússola digital: para auxiliar em navegação urbana mais complexa.

Sensores infravermelhos ou LiDAR: para melhorar a detecção de superfícies absorventes.

Testes com maior número de participantes: ampliando a validade estatística dos resultados.

Aplicativo complementar: permitindo monitoramento remoto ou ajustes de sensibilidade.

Essas melhorias podem elevar o dispositivo a um novo patamar de funcionalidade, aproximando-o de soluções comerciais mais avançadas, porém mantendo o baixo custo como diferencial competitivo.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento da bengala assistiva eletrônica permitiu demonstrar que a integração entre sensoriamento ultrassônico, eletrônica de baixo custo e manufatura aditiva constitui uma solução tecnicamente viável, funcional e acessível para ampliar a autonomia de pessoas com deficiência visual. O objetivo central do trabalho — criar e validar uma bengala inteligente capaz de detectar obstáculos próximos ao solo e fornecer alertas sensoriais claros — foi plenamente alcançado. A estrutura impressa em 3D, aliada ao sensor HC-SR04 e ao microcontrolador Arduino Uno, resultou em um dispositivo capaz de identificar obstáculos em

uma zona crítica inferior a 15 cm, cumprindo sua função principal de auxiliar a mobilidade segura do usuário.

A aplicação das duas metodologias adotadas confirmou a eficácia da solução. A metodologia experimental comprovou a confiabilidade técnica do sistema, evidenciando precisão consistente nas medições, taxa de sucesso de 95% na detecção de obstáculos e resposta imediata dos atuadores sonoro e tátil. Já o estudo de caso demonstrou a aceitação prática da tecnologia, revelando que o usuário compreendeu intuitivamente os alertas, sentiu maior segurança durante o percurso e conseguiu antecipar decisões de desvio sem necessidade de contato físico com os obstáculos.

As principais contribuições deste trabalho incluem a redução significativa de custos em comparação com dispositivos comerciais, a possibilidade de personalização total da estrutura por meio da impressão 3D e a robustez mecânica obtida mesmo com materiais acessíveis. Essas características tornam a solução especialmente adequada ao contexto socioeconômico de São Luís e do Maranhão, onde mais de 211 mil pessoas apresentam dificuldade visual e enfrentam desafios diários de mobilidade em ambientes urbanos irregulares.

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas. A bengala não detecta obstáculos aéreos devido ao posicionamento do sensor próximo ao solo, e o sensor ultrassônico apresenta dificuldade com superfícies que absorvem ondas sonoras. Além disso, a autonomia da bateria, embora suficiente para trajetos curtos, pode ser aprimorada. Com base nessas observações, recomenda-se que trabalhos futuros explorem:

- a inclusão de sensores adicionais para detecção de obstáculos aéreos e buracos;
- a integração de GPS, Bluetooth ou aplicativos móveis para navegação assistida;
- o uso de sensores alternativos (infravermelho, LiDAR ou câmeras) para ampliar a precisão;
- a miniaturização da caixa eletrônica e o embutimento completo da fiação;
- testes com um número maior de participantes para ampliar a validade dos resultados.

Em síntese, a bengala assistiva desenvolvida neste estudo demonstra potencial real para promover autonomia, segurança e inclusão social de pessoas com deficiência visual. A combinação entre baixo custo, personalização e eficácia técnica reforça a relevância da tecnologia assistiva como ferramenta de transformação social, especialmente em regiões onde o acesso a dispositivos avançados é limitado. O trabalho contribui para o avanço da área e abre caminho para novas pesquisas e melhorias que podem ampliar ainda mais o impacto positivo dessa solução na vida dos usuários.

7 AGRADECIMENTOS E FINANCIAMENTO

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), por meio da concessão de bolsa de iniciação científica ao primeiro autor, sendo fundamental para o fomento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. ABNT. NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.
2. CHEN, B.; ZHANG, D. *Ultrasonic-based assistive technologies for visually impaired users*. Journal of Assistive Technologies, 2020.
3. GARCIA, J. R.; SILVA, M. L. *Ergonomia e usabilidade em dispositivos assistivos: desafios e perspectivas*. Revista Brasileira de Tecnologia Assistiva, 2021.
4. IBGE. Censo Demográfico 2022 – Pessoas com Deficiência. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023
5. SANTOS, J. A.; LIMA, E. C. S. Desenvolvimento e validação de bengala assistiva eletrônica. São Luís, 2026. (Material de pesquisa do autor).
6. WHO – World Health Organization. *World Report on Vision*. Genebra: WHO, 2019.