

Sistema Assistivo Inteligente: babá eletrônica e campainha integradas com automação residencial e *power line communication* para deficientes auditivos

Benco Junior, Willians^{*1}; Raganhan Figênio, Gabriel²; Simões Dias, Thiago³; Castellanos Rodriguez, Juan Camilo⁴

1 – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, UTFPR, williansj@alunos.utfpr.edu.br

2 – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, UTFPR, figenio@alunos.utfpr.edu.br

3 – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, UTFPR, tsimoesdias@gmail.com

4 – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, UTFPR, juanc@utfpr.edu.br

* -Correspondência: Av. Sete de Setembro, 3165 - Rebouças, Curitiba - PR, 80230-901

DOI 10.52050/9788579177163-33

RESUMO

A deficiência auditiva compromete tarefas como atender à campainha ou monitorar bebês. Este estudo apresenta um sistema assistivo com funcionalidades de babá eletrônica e campainha, utilizando Inteligência Artificial (IA) e comunicação por linha de energia (PLC). Um microprocessador com algoritmo de IA detecta sons e identifica o choro por meio de algoritmo, enviando alertas por PLC a módulos que emitem sinais visuais e táteis. O protótipo, acessível, de baixo custo e *plug and play*, obteve F1-score de até 93%. A solução promove acessibilidade, inclusão digital e respeita a privacidade, integrando tecnologias em benefício de pais surdos.

Palavras-chave: surdez, casas conectadas, algoritmos inteligentes, comunicação por rede elétrica, tecnologia assistiva.

ABSTRACT

Hearing impairment affects daily tasks such as answering the doorbell or monitoring babies. This study presents an assistive system with the features of baby monitor and doorbell functionalities, using artificial intelligence and Power Line Communication (PLC). A microprocessor with an AI algorithm detects sounds and identifies crying through an algorithm, sending alerts via PLC to output

modules that emit visual and tactile signals. The accessible, low-cost, plug-and-play prototype achieved an F1-score of up to 93%. The solution fosters accessibility, digital inclusion, and data privacy by integrating affordable technologies to support parents with hearing impairments.

Keywords: deafness, connected homes, intelligent algorithms, mains communication, assistive technology.

1. INTRODUÇÃO

A deficiência auditiva afeta milhões de pessoas no Brasil e no mundo, dificultando a realização de tarefas cotidianas como ouvir o choro de um bebê ou atender a uma campanha (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2023, p. 5). Segundo a Pesquisa Nacional de Saúde (PNS), cerca de 2,3 milhões de brasileiros apresentam algum grau de surdez (PNS, 2021, p. 4). A Organização Mundial da Saúde (OMS) também destaca que aproximadamente 1,5 bilhão de pessoas no mundo possuem perda auditiva (OMS, 2023, p. 12).

Paralelamente, o uso de tecnologias de automação residencial, associadas ao uso de Inteligência Artificial (IA), tem potencial para oferecer autonomia e qualidade de vida com soluções práticas e acessíveis à população com deficiência (SABINO SOARES, 2024, p. 35). No entanto, ainda são escassas as pesquisas que integram IA em sistemas microcontrolados com automação residencial voltada especificamente para pessoas surdas (BENCO JUNIOR et al., 2024, p. 3).

A comunicação entre dispositivos de automação frequentemente depende de redes sem fio ou cabeadas. Contudo, redes Wi-Fi podem apresentar instabilidade; e redes cabeadas demandam modificações estruturais na residência. A comunicação por rede elétrica, ou *Power Line Communication* (PLC), surge como alternativa eficiente, pois utiliza a infraestrutura elétrica existente para transmitir dados, combinando estabilidade e facilidade de instalação.

Neste cenário, este estudo apresenta o desenvolvimento de um sistema assistivo inteligente com funcionalidades de babá eletrônica e campanha adaptadas para pessoas com deficiência auditiva. O sistema é baseado em IA para reconhecimento de choro de bebê e utiliza PLC para comunicação, eliminando a necessidade de cabeamento adicional ou conectividade sem fio. Dessa forma, o presente trabalho contribui para a inclusão de pessoas surdas, promovendo maior autonomia e segurança no ambiente doméstico por meio de uma solução acessível, modular e de fácil instalação.

Este estudo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e validação de um sistema assistivo de automação residencial, com funcionalidades de babá eletrônica e campanha, voltado a pessoas com deficiência auditiva, utilizando IA embarcada e PLC.

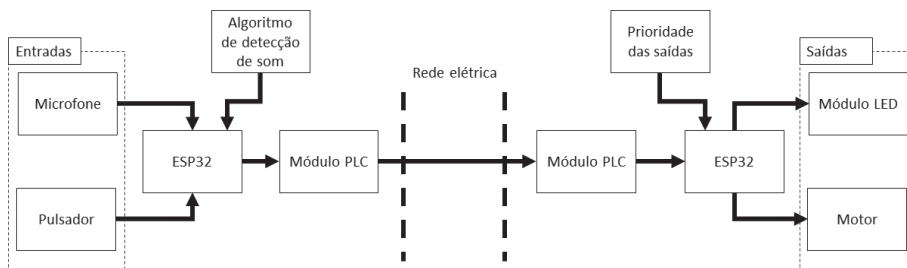
2. MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema proposto foi dividido em dois módulos: entrada e saída. Ambos os módulos utilizam microcontroladores ESP32 e são interligados via PLC, utilizando a rede elétrica residencial para troca de dados. A seguir, detalham-se os componentes, arquitetura do sistema, metodologia de treinamento da IA e a estratégia de teste em ambiente controlado.

2.1 Arquitetura Geral do Sistema

O módulo de entrada é responsável pela captação de sinais acústicos por meio de um microfone MEMS (modelo INMP-441) e por um botão de campainha. O ESP32 utilizado neste módulo executa um algoritmo de árvore de decisão, previamente treinado, para identificar choro de bebês. Foi selecionada a árvore de decisão pois esse algoritmo é leve (baseado em regras) e de fácil implementação, em um microcontrolador, quando comparado a outros como redes neurais e vizinhos próximos. O módulo de saída, por sua vez, recebe os comandos via PLC e aciona alertas visuais (LED RGB de alta potência) e táteis (motor de vibração acoplado à cama) (Figura 1).

Figura 01 - Diagrama de blocos da implementação do sistema



2.2 Componentes Utilizados

A escolha do ESP32 deve-se ao seu baixo custo, conectividade integrada e capacidade de processamento suficiente para executar algoritmos de IA localmente (*on edge*), sem a utilização de processamento na nuvem (Figura 2). Para comunicação do PLC, foi utilizado o módulo KQ-330, com alimentação de 5V, comunicação serial e conexão direta à rede elétrica (Figura 3).

Figura 02 - ESP32

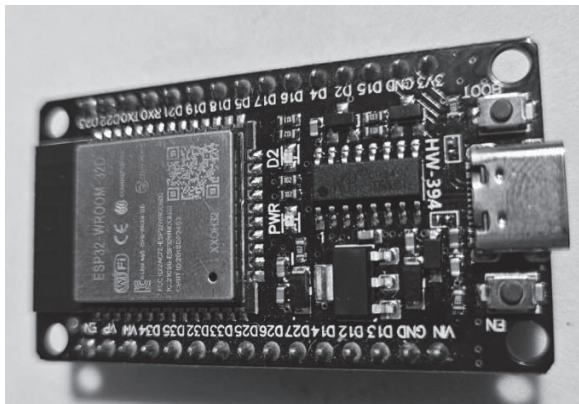
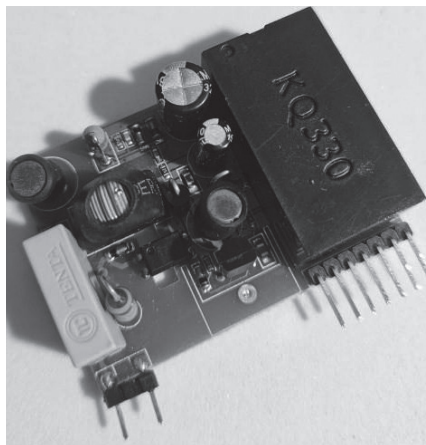


Figura 03 - Módulo KQ-330



As saídas são compostas por um LED RGB de alta potência, para sinalização visual (Figura 4), e um motor DC do tipo massageador, para alertas táteis (Figura 5). Ambos são acionados conforme o tipo de evento detectado (campainha ou choro de bebê).

Figura 03 - LED RGB

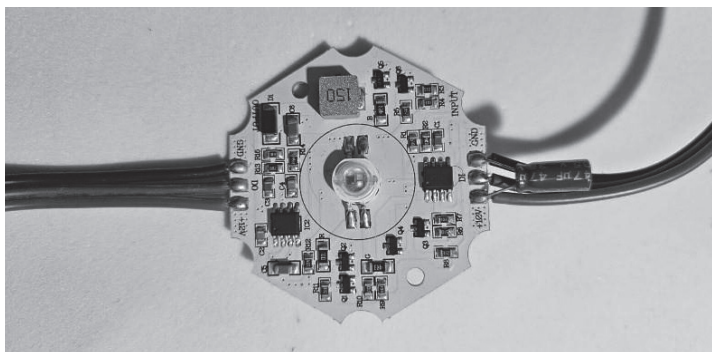
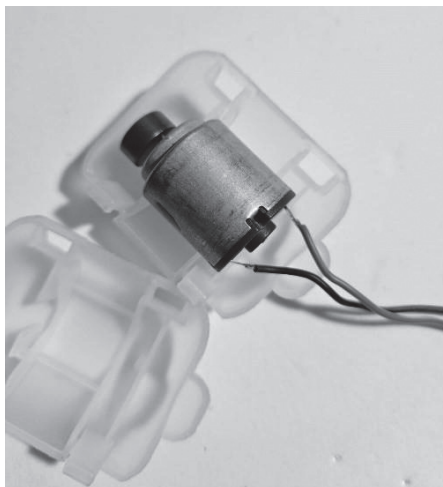


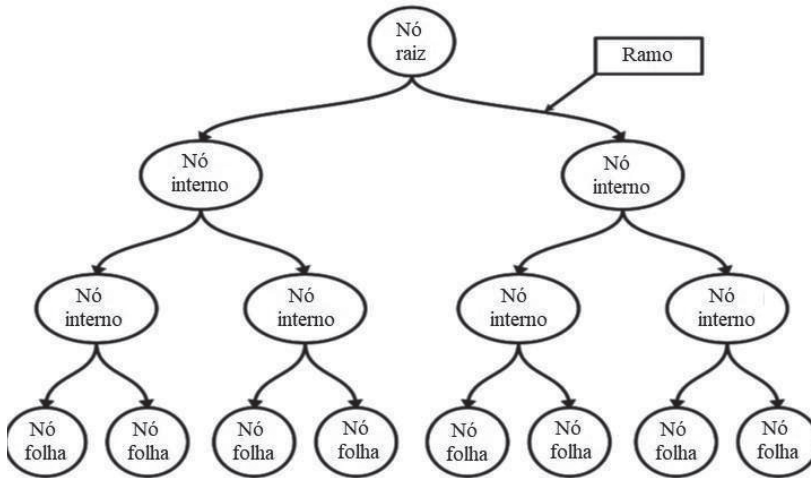
Figura 05 - Motor de vibração



2.3 Inteligência Artificial

O modelo de IA foi treinado off-line em Python utilizando a biblioteca scikit-learn (PEDREGOSA et al., 2011), com uma base de dados de sons de choro chamada DonateACry (VERES, 2015) e sons ambientes, obtidos pela junção das bases de dados FSDKaggle2018 (FONSECA et al., 2019b) e FSDnoisy18k (FONSECA et al., 2019a), utilizando o algoritmo de árvore de decisão (Figura 6). Os atributos extraídos incluem características no domínio do tempo e da frequência, como RMS, *zero-crossing rate* e *centroid*. Após o treinamento, o modelo foi exportado e embarcado no ESP32 para execução local.

Figura 06 - Ilustração do algoritmo de árvore de decisão



2.4 Comunicação via PLC

A comunicação entre os módulos ocorre por meio de dois módulos KQ-330, que operam pela rede elétrica monofásica. A troca de dados entre ESP32 e o módulo PLC é feita via UART. Essa abordagem permite uma instalação sem a necessidade de cabeamento adicional, mantendo a robustez da comunicação.

2.5 Montagem e Ambiente de Teste

A validação do sistema foi realizada em ambiente controlado, com simulação de eventos de campanha e reprodução de áudios com choro de bebê. Os dois circuitos foram montados em placas de circuito impresso (PCB) com dimensões 8x10x15 cm. Os dois módulos foram conectados ao mesmo circuito elétrico de uma residência, e, em alguns testes, posicionados em cômodos diferentes e até mesmo em andares distintos. Durante os testes, foram registrados a resposta do sistema, o tempo de comunicação e a taxa de detecção correta dos eventos (Figura 7 e 8).

Figura 07 - Teste de cenário da campanha: módulo de entrada e saída conectados à rede elétrica

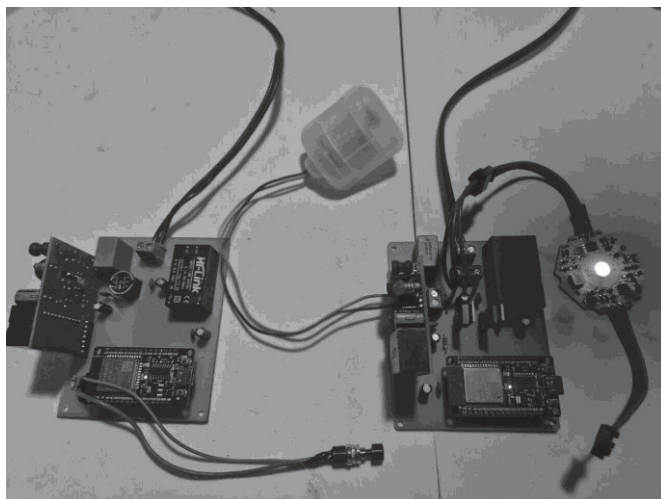
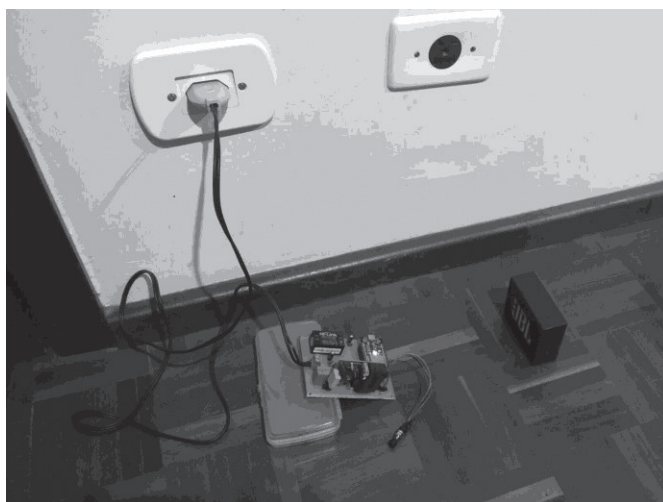


Figura 08 - Teste de cenário de choro: módulo de entrada conectado à rede elétrica e usando caixa de som como fonte de choro



3. RESULTADOS

A validação do sistema foi conduzida por meio de testes práticos com foco em três aspectos principais: a eficácia da comunicação via PLC, o desempenho da inteligência artificial embarcada e a resposta dos atuadores aos eventos simulados.

A comunicação entre os módulos apresentou estabilidade e confiabilidade, sem perdas de pacotes durante os testes de transmissão de dados em tempo real. O sistema manteve sincronização entre os módulos, mesmo em ambiente com ruídos elétricos típicos de uma residência.

O desempenho da IA embarcada no ESP32 foi avaliado por meio de testes de classificação de sons. Durante o treinamento offline, o modelo apresentou um F1-score de 93% (Figura 9). Contudo, após a implementação do modelo no microcontrolador, o desempenho caiu para 51% (Figura 10), o que é atribuído às limitações computacionais do dispositivo e à captação de som em ambiente real.

Figura 9 - Matriz de confusão no teste em simulação usando Python

		Matriz de confusão		
		Predição		
		Choro	Aleatório	Silêncio
Real	Choro	1709	177	1
	Aleatório	180	1677	2
	Silêncio	0	6	1924
f1 score		93.49%		

Figura 10 - Matriz de confusão com IA embarcada em ambiente controlado

		Matriz de confusão		
		Predição		
		Choro	Aleatório	Silêncio
Real	Choro	48	34	0
	Aleatório	72	86	71
	Silêncio	0	0	49
f1 score		51.60%		

Os testes de acionamento do sistema foram realizados com diferentes estímulos. A simulação da campainha resultou na ativação do LED azul e do motor de vibração (Figura 7). Já na simulação do choro de bebê, o sistema acionou o LED vermelho e o alerta tátil de forma contínua (Figura 8). A prioridade foi dada ao evento da babá eletrônica, nos casos em que ambos os estímulos ocorriam simultaneamente.

4. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos indicam que a proposta de um sistema assistivo baseado em PLC e IA embarcada é tecnicamente viável e promissora para aplicação em ambientes residenciais voltados a pessoas com deficiência auditiva. A utilização da rede elétrica como meio de comunicação provou ser eficiente, com estabilidade e ausência de perdas de pacotes, mesmo em um ambiente com interferências eletromagnéticas típicas.

Comparando-se aos estudos analisados na revisão sistemática realizada por BENCO JUNIOR et al. (2024, p. 3), nota-se que a maior parte das soluções voltadas à automação assistiva para surdos utiliza redes sem fio, como Wi-Fi e Zigbee, que podem sofrer interferências e apresentam maiores exigências estruturais. O uso de PLC, como apresentado neste trabalho, oferece uma alternativa mais acessível e prática, eliminando a necessidade de cabeamento adicional, configuração, conectividade de rede local ou compartilhamento de dados pela internet.

A IA embarcada, embora tenha apresentado excelente desempenho em ambiente simulado (F1-score de 93%), enfrentou desafios após o embarque no ESP32, com redução do desempenho para 51%. Essa discrepância pode ser atribuída à limitação de processamento do microcontrolador, ruídos no ambiente físico e qualidade do microfone utilizado. Ainda assim, a IA demonstrou capacidade funcional na identificação de sons relevantes, especialmente o choro de bebê, validando o conceito de processamento na borda em soluções assistivas.

Outro ponto positivo está no tempo de resposta do sistema, inferior a dois segundos. Esse tempo é adequado para aplicações assistivas, permitindo que o usuário reaja rapidamente aos alertas visuais e táteis emitidos.

Entretanto, algumas limitações foram observadas. A principal está relacionada à sensibilidade da IA embarcada a ruídos externos e à precisão na diferenciação de sons similares. Além disso, o sistema foi validado em ambiente controlado, não refletindo integralmente as condições reais de uma residência com múltiplos cômodos, dispositivos ou ruídos variáveis.

A ausência de uma interface de configuração ou calibragem por parte do usuário também limita sua flexibilidade. Da mesma forma, embora a solução seja modular e escalável, foram testados apenas dois nós (entrada e saída), o que restringe a análise da escalabilidade do sistema em redes maiores.

Apesar dessas limitações, os resultados demonstram que o sistema possui potencial de aplicação real, podendo ser expandido para funcionalidades adicionais, como monitoramento de quedas ou integração com hubs de automação já existentes.

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo desenvolver um sistema assistivo inteligente com funcionalidades de babá eletrônica e campainha voltadas para pessoas com deficiência auditiva, utilizando automação residencial, PLC e inteligência artificial embarcada. Os resultados demonstraram que os objetivos foram parcialmente alcançados, validando a proposta de uma solução acessível, modular e de fácil instalação para ambientes residenciais.

O sistema desenvolvido apresentou funcionamento eficaz, sendo capaz de identificar eventos sonoros e responder com alertas visuais e táteis, contribuindo para maior segurança e autonomia de pessoas com deficiência auditiva. A comunicação via PLC mostrou-se estável, mesmo em rede elétrica residencial, confirmando sua viabilidade como alternativa às conexões sem fio convencionais.

A inteligência artificial baseada em árvore de decisão demonstrou bom desempenho no ambiente de simulação e funcionamento satisfatório no protótipo embarcado, embora com desempenho reduzido, indicando necessidade de melhorias na qualidade da captação sonora e na otimização do modelo para microcontroladores com recursos limitados.

A principal contribuição deste trabalho está na integração de tecnologias acessíveis e de baixo custo — como PLC e IA embarcada — em uma solução assistiva *plug and play*, alinhada aos princípios da acessibilidade, privacidade de dados e da inclusão digital. Além disso, o projeto oferece base para futuras soluções em domótica assistiva, com potencial para aplicação em outros contextos, como cuidado a idosos e monitoramento ambiental. Para estudos futuros, recomenda-se a expansão do sistema para múltiplos módulos, a realização de testes em ambientes residenciais reais, a implementação de uma interface para configuração do usuário e o aprimoramento do modelo de IA com uso de bases de dados mais robustas e técnicas de pré-processamento mais avançadas.

REFERÊNCIAS

- BENCO JUNIOR, W. et al. Automação residencial focada ao público deficiente auditivo: revisão sistemática. In: CONGRESSO BRASILEIRO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA – CO-BICET, 2024, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: [s.n.], 2024.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE (Brasil). *Manual de saúde auditiva*. Brasília: MS, 2023.
- OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. *Relatório mundial da audição*. Genebra: Organização Mundial da Saúde, 2023.

PNS – PESQUISA NACIONAL DE SAÚDE. *Características gerais da população e de domicílios*. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

SABINO SOARES, CC.; SILVA, LA.; FERNANDES, A.; VILLARRUBIA GONZÁLEZ, G.; LEITHARDT, V. R. Q.; DELCIO

PARREIRA, W. Intelligent sensors in assistive systems for deaf people: a comprehensive review. In: PEERJ COMPUT SCI. 2024.

FONSECA, E. et al. FSDnoisy18k. Zenodo.org. 2019. Disponível em: <https://zenodo.org/records/2529934>. Acesso em: 17 jul. 2024. FONSECA, E. et al. FSDKaggle2018. Zenodo.org. 2019. Disponível em: <https://zenodo.org/records/2552860>. Acesso em: 17 jul. 2024.

VERES, G. donateacry-corpus. Github.com. 2015. Disponível em: <https://github.com/gveres/donateacry-corpus>. Acesso em: 21 abr. 2024.

PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research, v. 12, p. 2825–2830, 2011. Disponível em: <https://jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html>. Acesso em: 28 abr. 2025.