

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



WILLEM EDMUNDO FELIPE

DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DE UM WEARABLE DE ACESSIBILIDADE AUDITIVA COM ESP32 E FREERTOS UTILIZANDO REDES DE PETRI

Ouro Preto

2026

Willem Edmundo Felipe

DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DE UM WEARABLE DE ACESSIBILIDADE AUDITIVA COM ESP32 E FREERTOS UTILIZANDO REDES DE PETRI

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Danny Augusto Vieira Tonidandel

Ouro Preto

2026

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos: Alguns sonhos parecem tão distantes quanto estrelas no céu. . . Outros surgem como montanhas a escalar. Mas há aqueles que, mesmo quando o caminho se faz escuro, acendem em nós uma chama que não se apaga, uma voz suave que sussurra: "Siga em frente". E assim, guiado por essa força invisível, que transforma fraqueza em coragem e dúvida em fé, eu segui. Hoje, sinto meu coração leve como uma pena ao vento, porque finalmente posso dizer: - Eu consegui! Não pelas minhas mãos sozinhas, mas pela graça que me sustentou quando minhas pernas tremiam; pela luz que iluminou meus passos quando eu já não enxergava o caminho; e pelo amor que me envolveu, transformando cada lágrima em força e cada tropeço em lição. Aos que estiveram ao meu lado, meu agradecimento eterno. Mas, acima de tudo, àquele que ouve o que as palavras não dizem, que vê o que os olhos não alcançam e que transforma o impossível em realidade, o meu mais profundo e humilde "obrigado". Com imenso amor, daquele que o tempo não apaga, agradeço cada instante de ternura e compreensão da minha esposa, a extraordinária Mirna, farol que me guiou mesmo nas marés mais revoltas. A ti, minha amada, que foste meu porto, silêncio e abrigo, deixo meu mais profundo reconhecimento. Ao meu pequeno e inspirador Arthur, razão da minha vida, agradeço por encher meus dias de luz e, mesmo sem perceber, ensinar-me sobre coragem, esperança e amor verdadeiro. Aos meus pais, Francisca e Dimas, e aos meus irmãos Wagner, Walkíria, João Paulo e Júnior, por cada palavra de força e gesto de apoio, minha eterna gratidão. Aos amigos Leandro e Walter, por dividirem o peso da caminhada com leveza e amizade sincera. À família Ouroloc, meu abrigo e meu riso nos dias mais difíceis. Este momento não é só meu. Ele pertence a todos que caminharam comigo. Aos mestres da UFOP que dividiram comigo um pouco de seu saber, que me inspiraram a seguir o meu propósito.

“A tecnologia sozinha não basta. É a tecnologia aliada às pessoas que produz resultados que fazem nossos corações cantarem.”(Steve Jobs)

Resumo

A acessibilidade auditiva constitui um aspecto fundamental para a promoção da autonomia, da segurança e da inclusão de pessoas com deficiência auditiva, especialmente em ambientes residenciais, nos quais sinais sonoros, como campainhas e alarmes, desempenham um papel importante na comunicação e na identificação de situações que exigem atenção. Nesse contexto, os avanços da Internet das Coisas *IoT* na área biomédica ampliam as possibilidades de desenvolvimento de tecnologias assistivas inteligentes, por meio da integração de sistemas embarcados, sensores, comunicação sem fio e dispositivos vestíveis capazes de monitorar eventos e fornecer respostas adaptadas às necessidades dos usuários. Diante dessa perspectiva, este trabalho tem como objetivo desenvolver e modelar um dispositivo vestível *wearable* de acessibilidade auditiva capaz de converter eventos sonoros em estímulos táteis por meio de vibração. A solução proposta é composta por dois módulos baseados no microcontrolador *ESP32*, sendo um transmissor responsável pela detecção dos eventos sonoros e um receptor integrado a uma pulseira vibratória, que se comunicam por meio do protocolo *ESP-NOW*, caracterizado pela baixa latência e pela independência de uma infraestrutura de rede Wi-Fi convencional. O software embarcado foi desenvolvido em linguagem *C/C++*, utilizando o sistema operacional de tempo real *FreeRTOS* para implementar tarefas concorrentes de comunicação, processamento e acionamento do atuador vibratório. Adicionalmente, empregou-se a modelagem formal por Redes de Petri para representar e analisar o comportamento concorrente do sistema, permitindo investigar propriedades como alcançabilidade, vivacidade, limitação e ausência de *deadlocks*. O protótipo físico foi construído com componentes de baixo custo e submetido a testes experimentais para avaliar a comunicação entre os módulos, o tempo de resposta, a confiabilidade da transmissão e a diferenciação dos padrões de vibração associados a eventos de campainha e alarme. Os resultados obtidos indicaram comunicação estável, tempo de resposta inferior a um segundo e funcionamento contínuo sem falhas durante os ensaios realizados, evidenciando a viabilidade técnica da solução proposta. Conclui-se que a integração entre tecnologias embarcadas, comunicação sem fio, sistemas operacionais de tempo real e modelagem por Redes de Petri apresenta potencial para o desenvolvimento de tecnologias assistivas acessíveis, contribuindo para a segurança, a autonomia e a inclusão de pessoas com deficiência auditiva. Além disso, a arquitetura desenvolvida permite perspectivas de expansão, incluindo a integração de sensores inteligentes, outros dispositivos conectados e algoritmos de reconhecimento automático de eventos sonoros, ampliando as possibilidades de aplicação da *IoT* no contexto biomédico.

Palavras-chave: Acessibilidade auditiva. Tecnologia assistiva. Dispositivo vestível. *ESP32*. *FreeRTOS*. *ESP-NOW*. Redes de Petri. Sistemas Embarcados. Internet das Coisas. *feedback* Tátil.

Abstract

Accessibility to auditory information in residential environments remains a significant challenge for people with hearing impairment, especially in situations involving critical signals such as doorbells and alarms, whose perception is essential for safety and independence. In this context, this work presents the development and modeling of a wearable assistive device capable of converting auditory events into tactile stimuli through vibration. The proposed solution consists of two modules based on the *ESP32* microcontroller: a transmitter responsible for detecting sound events and a receiver integrated into a vibrating wristband. Communication between the modules is established through the *ESP-NOW* protocol, which provides low latency and eliminates the need for conventional Wi-Fi network infrastructure. The embedded software was developed in *C/C++* using the *FreeRTOS* real-time operating system to implement concurrent tasks for communication, data processing, and vibration actuator control, ensuring deterministic behavior and real-time response. As a distinguishing feature of this work, Petri Net modeling was employed to formally represent, analyze, and validate the concurrent behavior of the system, enabling the verification of properties such as reachability, liveness, boundedness, and *deadlock* freedom, which are fundamental for critical embedded applications. A physical prototype was built using low-cost components and subjected to experimental tests to evaluate communication reliability between the modules, system response time, transmission reliability, and the effectiveness of vibration patterns designed to differentiate between doorbell and alarm events. The experimental results demonstrated stable communication, response times below one second, and continuous fault-free operation throughout the tests, confirming the technical feasibility of the proposed solution. It is concluded that the integration of embedded systems, wireless communication, real-time task scheduling, and Petri Net modeling provides a robust approach for the development of assistive technologies aimed at promoting autonomy and social inclusion for people with hearing impairment. Furthermore, the proposed architecture offers scalability for future integration with intelligent sensors, Internet of Things (IoT) platforms, and automatic sound recognition algorithms.

Key-words: Hearing accessibility. Assistive technology. *Wearable*. *ESP32*. *FreeRTOS*. *ESP-NOW*. Petri Nets. Embedded Systems. Internet of Things (IoT). Tactile *feedback*.

Lista de Figuras

Figura 1 Representação do sistema auditivo humano. 15
Figura 2 Protótipo físico do módulo transmissor. 19
Figura 3 Representação gráfica dos elementos de uma Rede de Petri 20
Figura 4 Exemplo de uma Rede de Petri lugar/transição 21

Figura 5 Fluxograma do Projeto. 23
Figura 6 Arquitetura geral do projeto. 24
Figura 7 Protótipo Montado. 26
Figura 8 Rede de Petri desenvolvida para representar o funcionamento completo do sistema. 28
Figura 9 Fluxograma dos Estados e Transições 34

Figura 10 Protótipo físico do módulo receptor vestível. 36

Lista de abreviaturas e siglas

P_i	Lugar *i* da Rede de Petri
T_i	Transição *i* da Rede de Petri
→	Arco direcionado
•	Marca (Token)
RTOS	Real-Time Operating System
IoT	Internet of Things

Sumário

1 Introdução 10
1.1 Objetivo geral 11
1.2 Objetivos específicos 11
1.3 Justificativa do trabalho 11
1.4 Estrutura do trabalho 12

2 Fundamentação Teórica 13
2.1 Tecnologia Assistiva 13
2.2 Sistema Auditivo e Deficiência 14
2.3 Dispositivos Vestíveis (*Wearable*) 16
2.4 Trabalhos relacionados 17
2.5 Sistemas Embarcados 18
2.6 Microcontrolador *ESP32* 18
2.7 Sistema Operacional *FreeRTOS* 19
2.8 Comunicação ESP-NOW 19
2.9 Redes de Petri 20

3 Metodologia 22
3.1 Arquitetura do Sistema 24
3.2 Desenvolvimento do Protótipo 25
3.2.1 Desenvolvimento do Software Embarcado 26
3.2.2 Comunicação entre os Módulos 27
3.3 Modelagem por Redes de Petri 27
3.4 Rede de Petri do sistema embarcado 29
3.4.1 Lugar inicial 29
3.4.2 Detecção do evento sonoro 29
3.4.3 Processamento utilizando FreeRTOS 29
3.4.4 Preparação da mensagem 30
3.4.5 Transmissão utilizando *ESP-NOW* 30
3.4.6 Recepção da mensagem 30
3.4.7 Execução concorrente dos alertas. 31
3.4.8 Sincronização das tarefas. 31
3.4.9 Retorno ao estado inicial. 31
3.4.10 Análise da Rede de Petri. 31

4 Resultados 36

4.1 Protótipo Desenvolvido 36
4.1.1 Testes Realizados e observações 37
4.2 Comunicação entre os Módulos 37
4.3 Execução Concorrente utilizando *FreeRTOS* 37
4.4 Validação da Modelagem utilizando Redes de Petri 37
4.5 Funcionamento do Sistema 38
4.6 Discussão dos resultados 38

5 Considerações finais e trabalhos futuros 40

Referências 43

APÊNDICE A Código-fonte do módulo transmissor 45

1 Introdução

O avanço das tecnologias embarcadas e dos sistemas inteligentes tem contribuído significativamente para o desenvolvimento de soluções voltadas à inclusão e acessibilidade. Entre essas tecnologias, os dispositivos vestíveis (*wearable*) destacam-se pela capacidade de integrar sensores, processamento de dados e mecanismos de interação em sistemas compactos e portáteis, permitindo aplicações em saúde, monitoramento, segurança e assistência pessoal. Segundo Norman (2013), tecnologias centradas no usuário devem buscar reduzir barreiras entre o indivíduo e o ambiente, tornando as interações mais intuitivas e acessíveis. No contexto da deficiência auditiva, a percepção de eventos sonoros representa um desafio significativo para a autonomia dos indivíduos. Sons provenientes de campainhas, alarmes de emergência, despertadores e notificações do ambiente possuem papel fundamental na segurança e execução das atividades diárias. Entretanto, pessoas com perda auditiva parcial ou total podem enfrentar dificuldades para perceber esses estímulos, tornando necessária a utilização de tecnologias assistivas capazes de converter informações sonoras em estímulos perceptíveis por outros sentidos. A tecnologia assistiva compreende produtos, metodologias e recursos desenvolvidos com o objetivo de ampliar capacidades funcionais e proporcionar maior independência aos usuários (BERSCH, 2017). Nesse cenário, soluções que utilizam estímulos táteis por vibração apresentam potencial para auxiliar pessoas com deficiência auditiva, pois permitem transformar eventos sonoros em sinais físicos facilmente identificáveis. Com o desenvolvimento de microcontroladores de baixo custo e elevado desempenho, tornou-se possível implementar sistemas embarcados capazes de processar informações em tempo real e executar múltiplas funções simultaneamente. Entre essas plataformas, o ESP32 destaca-se por oferecer recursos integrados de processamento, conectividade sem fio e baixo consumo energético, características importantes para aplicações vestíveis e sistemas de Internet das Coisas (MONK, 2017). Em sistemas embarcados que executam múltiplas tarefas concorrentes, a utilização de sistemas operacionais de tempo real torna-se essencial para garantir desempenho e previsibilidade. Segundo Barry (2018), sistemas operacionais de tempo real permitem o gerenciamento eficiente de tarefas, priorização de processos e sincronização entre eventos, tornando-se adequados para aplicações críticas que exigem respostas rápidas e confiáveis. Entretanto, sistemas concorrentes apresentam desafios relacionados ao compartilhamento de recursos, sincronização de processos e controle do fluxo de execução. Segundo Murata (1989), sistemas caracterizados por paralelismo, concorrência e compartilhamento de informações podem ser modelados por Redes de Petri, permitindo representar formalmente o comportamento dinâmico do sistema e analisar propriedades importantes, como sincronização, conflitos e possíveis bloqueios. Dessa forma, a utilização conjunta de ESP32, *FreeRTOS* e Redes de Petri possibilita não apenas o desenvolvimento de uma solução assistiva funcional, mas

também a modelagem formal do comportamento do sistema, aumentando sua confiabilidade e permitindo uma análise mais detalhada dos eventos concorrentes. Diante desse contexto, surge a seguinte questão de pesquisa: “Como desenvolver um *wearable* de acessibilidade auditiva capaz de converter eventos sonoros em *feedback* tátil em tempo real utilizando ESP32 e *FreeRTOS*, empregando Redes de Petri para modelar e analisar o comportamento concorrente do sistema?”.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver e modelar um *wearable* de acessibilidade auditiva de baixo custo, baseado no microcontrolador *ESP32* e no sistema operacional *FreeRTOS*, capaz de converter eventos sonoros domésticos em *feedback* tátil por vibração.

1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema embarcado baseado no *ESP32* para processamento e transmissão de eventos sonoros.
- Implementar tarefas concorrentes utilizando o *FreeRTOS*.
- Estabelecer a comunicação sem fio entre os módulos por meio do protocolo *ESP-NOW*.
- Modelar o comportamento do sistema utilizando Redes de Petri.
- Avaliar o desempenho do sistema quanto à sincronização, ao tempo de resposta e à confiabilidade.

1.3 Justificativa do trabalho

A dificuldade de acesso às informações sonoras em ambientes residenciais pode limitar a autonomia de pessoas com deficiência auditiva, especialmente diante de eventos cotidianos, como o acionamento de campainhas e alarmes. Nesse contexto, a Organização Mundial da Saúde destaca a importância das tecnologias assistivas para a reabilitação e para a participação das pessoas com perda auditiva nas atividades diárias (Organização Mundial da Saúde, 2026). Entre essas tecnologias, encontram-se dispositivos de alerta que sinalizam sons domésticos por meio de estímulos visuais ou vibratórios, permitindo que eventos sonoros sejam percebidos por outros sentidos (National Institute on Deafness and Other Communication Disorders (NIDCD), 2011). Dessa forma, o desenvolvimento de soluções vestíveis capazes de converter eventos sonoros em estímulos táteis apresenta-se como uma alternativa relevante para ampliar a acessibilidade e contribuir para a autonomia e a segurança no ambiente doméstico.

Nesse contexto, a utilização de dispositivos vestíveis associada a tecnologias embarcadas apresenta-se como uma alternativa para fornecer informações de maneira discreta e acessível.

O emprego de estímulos táteis por meio de vibração permite representar ao usuário diferentes eventos ocorridos no ambiente, sem depender exclusivamente da percepção sonora. Além disso, a utilização de componentes de baixo custo, como o microcontrolador *ESP32*, possibilita o desenvolvimento de uma solução compacta e com potencial de aplicação em diferentes ambientes residenciais.

A escolha do *FreeRTOS* e do protocolo de comunicação *ESP-NOW* está relacionada à necessidade de gerenciar tarefas concorrentes e estabelecer a comunicação entre os módulos transmissor e receptor. O *FreeRTOS* permite organizar e controlar a execução das tarefas do sistema, enquanto o *ESP-NOW* possibilita a comunicação sem fio entre os dispositivos. Por sua vez, a utilização das Redes de Petri permite representar formalmente o comportamento do sistema, contribuindo para a análise da sequência de execução, da concorrência e da sincronização entre os processos. Assim, o desenvolvimento deste trabalho justifica-se pela integração de tecnologias embarcadas, comunicação sem fio, processamento concorrente e *feedback* tátil em uma solução voltada à acessibilidade auditiva.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema, os objetivos do trabalho e sua organização. O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica, contemplando conceitos relacionados à acessibilidade auditiva, sistemas embarcados, *ESP32*, *FreeRTOS*, protocolo *ESP-NOW* e Redes de Petri. O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, o desenvolvimento do sistema e a modelagem proposta. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e a análise do desempenho do protótipo. Por fim, o quinto capítulo reúne as conclusões do trabalho, as limitações encontradas e as sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Os avanços tecnológicos têm ampliado as possibilidades de desenvolvimento de soluções voltadas à acessibilidade, permitindo a criação de dispositivos compactos, eficientes e adaptados às necessidades específicas dos usuários. No contexto da deficiência auditiva, essas soluções buscam facilitar o acesso a informações transmitidas por sinais sonoros, contribuindo para a percepção de eventos do ambiente e para a segurança nas atividades cotidianas.

Nesse cenário, recursos visuais e táteis podem ser empregados como alternativas para transmitir informações que, convencionalmente, dependem da audição. Entre essas possibilidades, o *feedback* tátil destaca-se por permitir a comunicação de informações por meio de estímulos vibratórios, de forma discreta e sem exigir atenção visual constante. A integração desse recurso a dispositivos vestíveis representa uma possibilidade para o desenvolvimento de soluções de acessibilidade auditiva, especialmente quando associada a sistemas compactos, de baixo custo e adaptados às necessidades dos usuários.

2.1 Tecnologia Assistiva

A tecnologia assistiva compreende recursos, metodologias, estratégias, produtos e serviços destinados a ampliar as capacidades funcionais de pessoas com deficiência, promovendo autonomia, independência e inclusão social (BERSCH, 2017). Sua aplicação busca minimizar barreiras que dificultam a realização de atividades cotidianas, favorecendo a participação dos indivíduos em diferentes contextos sociais.

No caso da deficiência auditiva, a dificuldade de perceber determinados sinais sonoros pode comprometer a identificação de eventos importantes, especialmente em situações relacionadas à comunicação e à segurança. Alarmes de emergência, campainhas, despertadores e notificações sonoras são exemplos de sinais que podem passar despercebidos por pessoas com perda auditiva. Nesse sentido, o desenvolvimento de soluções capazes de converter esses sinais em estímulos perceptíveis por outros sentidos constitui uma alternativa para ampliar o acesso às informações do ambiente.

Entre os recursos empregados para essa finalidade, o *feedback* tátil apresenta vantagens relacionadas à discrição e à portabilidade, além de possibilitar a transmissão de informações sem depender exclusivamente da percepção auditiva ou da atenção visual. Quando incorporado a dispositivos vestíveis, esse recurso permite fornecer alertas por meio de vibrações, favorecendo sua utilização em diferentes situações do cotidiano.

Além da funcionalidade, a usabilidade constitui um aspecto importante no desenvolvimento de tecnologias assistivas. Conforme discutido por Norman (2013), o projeto de sistemas deve considerar a facilidade de compreensão e utilização, de modo que a interação seja intuitiva e adequada às necessidades dos usuários. Dessa forma, a aplicação de estímulos vibratórios em dispositivos vestíveis apresenta-se como uma alternativa para o desenvolvimento de soluções voltadas à acessibilidade auditiva, contribuindo para a percepção de alertas e para a interação dos usuários com o ambiente.

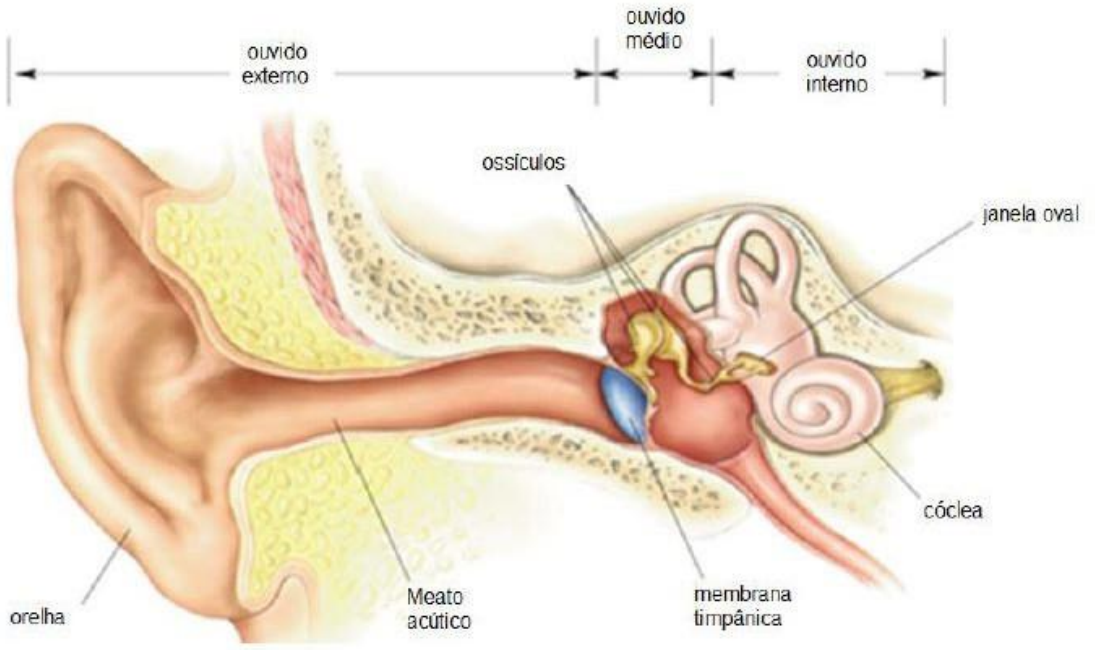
2.2 Sistema Auditivo e Deficiência

A compreensão do funcionamento do sistema auditivo humano constitui uma etapa fundamental para o desenvolvimento de tecnologias assistivas destinadas às pessoas com deficiência auditiva. Essas tecnologias buscam minimizar as limitações impostas pelas alterações no processo natural de percepção sonora, utilizando diferentes estratégias de compensação, como estímulos visuais, táteis ou dispositivos eletrônicos capazes de auxiliar na interpretação das informações presentes no ambiente.

O processo de audição humana envolve uma sequência complexa de eventos fisiológicos responsáveis pela conversão das ondas sonoras presentes no meio em sinais elétricos interpretáveis pelo sistema nervoso. De acordo com (National Institute on Deafness and Other Communication Disorders, 2016), a percepção sonora inicia-se com a captação das ondas acústicas pela orelha externa, seguida pela transformação dessas vibrações em impulsos elétricos que são conduzidos ao cérebro por meio do nervo auditivo, onde ocorre o processamento e a interpretação das informações sonoras.

O sistema auditivo humano é composto por três regiões principais: orelha externa, orelha média e orelha interna, conforme apresentado na Figura 1. A orelha externa é responsável pela captação e condução das ondas sonoras até o tímpano, enquanto a orelha média realiza a transmissão mecânica dessas vibrações por meio de pequenos ossículos denominados martelo, bigorna e estribo. Já a orelha interna contém a cóclea, estrutura responsável pela conversão das vibrações mecânicas em sinais elétricos que serão posteriormente enviados ao cérebro (National Institute on Deafness and Other Communication Disorders, 2016).

Figura 1 – Representação do sistema auditivo humano.



Fonte: (BEAR; CONNORS; PARADISO, 2008).

De forma simplificada, o processo auditivo pode ser descrito como segue:

As ondas sonoras presentes no ambiente são captadas pela orelha externa e conduzidas pelo canal auditivo até o tímpano. O tímpano, uma membrana fina e sensível às variações de pressão sonora, vibra de acordo com as características do sinal recebido. Essas vibrações são transmitidas aos ossículos da orelha média, compostos pelo martelo, bigorna e estribo. Os ossículos amplificam e conduzem mecanicamente as vibrações até a cóclea, localizada na orelha interna. Dentro dessa estrutura, os movimentos dos fluidos internos provocam deslocamentos da membrana basilar, responsável pela percepção de diferentes frequências sonoras. O movimento da membrana basilar estimula as células ciliadas presentes na cóclea, estruturas sensoriais responsáveis pela conversão da energia mecânica em sinais elétricos. A movimentação dessas células promove alterações bioquímicas que resultam na geração de impulsos elétricos, correspondentes às informações sonoras captadas pelo sistema auditivo. Esses impulsos são conduzidos pelo nervo auditivo até o cérebro, onde são processados e interpretados como sons reconhecíveis, permitindo a percepção da fala, ruídos ambientais e demais estímulos acústicos segundo (National Institute on Deafness and Other Communication Disorders, 2016).

Entretanto, alterações em qualquer uma das estruturas envolvidas nesse processo podem comprometer a capacidade de percepção sonora, resultando em diferentes graus e tipos de deficiência auditiva. De maneira geral, a deficiência auditiva pode ser classificada em três categorias principais: condutiva, sensório-neural e central.

A deficiência auditiva condutiva está relacionada a alterações na orelha externa ou média,

comprometendo a condução adequada das ondas sonoras até a orelha interna. Entre suas principais causas encontram-se o acúmulo excessivo de cerúmen, infecções, alterações anatômicas, perfurações no tímpano e presença de líquidos na região da orelha média (FARAHMAND et al., 2016). Nesse caso, a dificuldade está associada principalmente à transmissão mecânica do som, podendo, em muitos casos, ser tratada por meio de intervenções médicas ou dispositivos de amplificação sonora.

A deficiência auditiva sensório-neural ocorre quando há comprometimento das células sensoriais da cóclea ou do nervo auditivo, prejudicando a conversão ou transmissão dos sinais elétricos responsáveis pela comunicação entre o sistema auditivo periférico e o cérebro. Esse tipo de deficiência pode estar associado a fatores genéticos, envelhecimento natural, exposição prolongada a níveis elevados de pressão sonora, traumas físicos ou outras condições que afetem a estrutura interna do ouvido. Embora recursos tecnológicos, como aparelhos auditivos e implantes cocleares, possam proporcionar melhora significativa na percepção sonora, essa condição geralmente apresenta caráter permanente (FARAHMAND et al., 2016).

Por sua vez, a deficiência auditiva central está relacionada a alterações no processamento das informações sonoras pelo sistema nervoso central. Nesse caso, embora o ouvido e o nervo auditivo possam apresentar funcionamento adequado, o cérebro encontra dificuldades para interpretar corretamente os sinais recebidos, comprometendo a compreensão dos estímulos acústicos (FARAHMAND et al., 2016).

Diante desse cenário, torna-se evidente a importância das tecnologias assistivas voltadas à acessibilidade auditiva. Ao compreender as limitações impostas pelas diferentes formas de deficiência auditiva, torna-se possível desenvolver soluções tecnológicas capazes de substituir ou complementar a percepção sonora convencional. Nesse contexto, sistemas baseados em processamento digital de sinais, comunicação sem fio, dispositivos embarcados e estímulos alternativos, como vibração e sinais luminosos, representam alternativas promissoras para ampliar a autonomia e a inclusão das pessoas com deficiência auditiva.

2.3 Dispositivos Vestíveis (*Wearable*)

Dispositivos vestíveis, conhecidos como *wearable*, são sistemas eletrônicos desenvolvidos para serem utilizados junto ao corpo humano, permitindo monitoramento contínuo, processamento de informações e interação em tempo real com o usuário (SENEVIRATNE, 2017). Esses dispositivos são amplamente empregados em aplicações relacionadas à saúde, atividades esportivas, segurança, comunicação e acessibilidade.

A evolução dos sensores miniaturizados e das plataformas embarcadas de baixo consumo energético impulsionou o crescimento dessa tecnologia, tornando possível o desenvolvimento de soluções compactas e portáteis. Em aplicações assistivas, os *wearables* apresentam vantagens por fornecerem respostas imediatas ao usuário, principalmente por meio de motores vibratórios

capazes de transmitir informações de forma discreta. Além disso, esses dispositivos podem integrar tecnologias de comunicação sem fio, permitindo a troca de informações com sensores externos e outros sistemas inteligentes.

2.4 Trabalhos relacionados

Em 2019, (CONLEY et al., 2019) desenvolveu uma pulseira eletrônica vibratória destinada a auxiliar pessoas com deficiência visual e auditiva no recebimento e envio de alertas de emergência. O dispositivo utilizou comunicação sem fio via *ESP32* para receber notificações e acionar um mecanismo vibratório, permitindo que o usuário identifique situações de alerta sem depender exclusivamente de estímulos sonoros ou visuais. A solução foi implementada por meio de uma arquitetura composta por dois *werables* e um aplicativo móvel, demonstrando a aplicação de sistemas eletrônicos modulares em tecnologias assistivas.

Em 2021, (MACGAVIN; EDWARDS; GORLEWICZ, 2021) desenvolveu um dispositivo vestível háptico inspirado na comunicação Protactile, destinado principalmente a auxiliar a interação de pessoas surdocegas. O equipamento utilizou estímulos táteis de vibração, pressão e calor para representar diferentes elementos da comunicação interpessoal. A solução foi avaliada em três etapas experimentais, envolvendo participantes surdocegos e pessoas sem deficiência visual ou auditiva, demonstrando o potencial dos estímulos hápticos na representação de informações e no desenvolvimento de mecanismos alternativos de comunicação.

Em 2025, (CONLEY et al., 2019) apresentou o sistema *HapticHearing*, desenvolvido para complementar a percepção da fala em pessoas com perda auditiva leve a moderada. A solução utilizou um microfone para captar os sinais sonoros, realizou a extração de características do sinal de fala e converteu as informações processadas em estímulos transmitidos por oito atuadores vibrotáteis distribuídos em dispositivos vestíveis. Diferentemente de abordagens baseadas exclusivamente na substituição sensorial, o sistema buscou complementar a audição residual por meio de padrões táteis personalizados. Os testes de validação avaliaram diferentes configurações de posicionamento dos atuadores, demonstrando a influência da região de aplicação na percepção espacial dos estímulos.

Em 2023, desenvolveu-se, pela equipe MIRA, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), Campus Ouro Preto, por meio do programa Power4Girls, uma pulseira conectada a uma babá eletrônica, destinada a auxiliar mães com deficiência auditiva. O dispositivo foi projetado para identificar o choro de um bebê e transmitir alertas por meio de vibrações. O protótipo também foi concebido para sinalizar outros eventos cotidianos, como o acionamento de campainhas. A proposta utilizou materiais de baixo custo, demonstrando a aplicação de sistemas eletrônicos vestíveis no desenvolvimento de tecnologias assistivas Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (2023).

Os trabalhos apresentados abordam diferentes estratégias para a transmissão de informa-

ções por meio de estímulos táteis, evidenciando a aplicação de dispositivos vestíveis em soluções de acessibilidade. As propostas variam quanto aos recursos empregados, aos mecanismos de comunicação e ao processamento das informações recebidas. Em relação a essas soluções, o presente trabalho propõe uma arquitetura composta por dois módulos embarcados, responsáveis pela transmissão e recepção de comandos por meio do protocolo *ESP-NOW*. A execução das operações é organizada pelo sistema operacional de tempo real FreeRTOS, permitindo o gerenciamento concorrente das tarefas. Adicionalmente, as Redes de Petri são utilizadas para representar os estados, as transições, os mecanismos de sincronização e os ciclos de funcionamento da aplicação. Essa integração constitui o principal diferencial da arquitetura desenvolvida, reunindo comunicação sem fio, processamento concorrente e modelagem formal em um dispositivo vestível voltado à acessibilidade auditiva.

2.5 Sistemas Embarcados

Sistemas embarcados são sistemas computacionais dedicados ao controle ou monitoramento de funções específicas em equipamentos eletrônicos (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2007). Diferentemente dos computadores de uso geral, esses sistemas são desenvolvidos para executar tarefas específicas, respeitando restrições relacionadas ao processamento, memória, consumo de energia e tempo de resposta.

Segundo Santos (2023), aplicações embarcadas modernas frequentemente executam múltiplas tarefas simultaneamente, exigindo mecanismos eficientes de gerenciamento de recursos. Atualmente, sistemas embarcados estão presentes em diversas áreas, como automação industrial, equipamentos médicos, dispositivos móveis, Internet das Coisas e tecnologias assistivas.

2.6 Microcontrolador *ESP32*

O *ESP32*, desenvolvido pela Espressif Systems, é um microcontrolador amplamente utilizado em aplicações de sistemas embarcados e Internet das Coisas por integrar recursos de processamento e comunicação sem fio em um único dispositivo (Espressif Systems, 2025). Sua arquitetura dual-core, associada ao suporte às tecnologias Wi-Fi e Bluetooth, permite a execução de aplicações que exigem comunicação eficiente e resposta em tempo real.

Além disso, o *ESP32* possui baixo consumo energético e diversas interfaces de comunicação, características que o tornam adequado para dispositivos vestíveis e tecnologias assistivas de baixo custo.

Figura 2 – Protótipo físico do módulo transmissor.



Fonte: Autoria própria.

2.7 Sistema Operacional *FreeRTOS*

O *FreeRTOS* é um sistema operacional de tempo real *(Real-Time Operating System – RTOS)* amplamente empregado em sistemas embarcados devido à sua simplicidade, baixo consumo de memória e facilidade de implementação (BARRY, 2016). Seu principal objetivo é organizar a execução concorrente de tarefas, garantindo previsibilidade temporal e melhor utilização dos recursos do hardware.

Cada tarefa possui sua própria pilha, prioridade e estados de execução, permitindo que atividades como leitura de sensores, comunicação sem fio e acionamento de atuadores ocorram de maneira simultânea e organizada.

2.8 Comunicação ESP-NOW

O *ESP-NOW* é um protocolo de comunicação sem fio desenvolvido pela Espressif Systems para dispositivos da família *ESP32*. Diferentemente das redes Wi-Fi convencionais, sua comunicação ocorre diretamente entre dispositivos, dispensando a utilização de roteadores e reduzindo significativamente a latência e o consumo energético (Espressif Systems, 2025).

Essa característica torna o protocolo especialmente adequado para aplicações embarcadas,

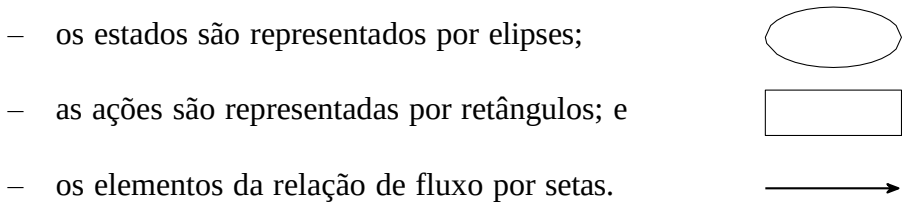
dispositivos vestíveis e sistemas que necessitam de comunicação rápida e confiável em tempo real.

2.9 Redes de Petri

As Redes de Petri constituem uma ferramenta matemática e gráfica destinada à modelagem, análise e validação de sistemas dinâmicos a eventos discretos, especialmente aqueles caracterizados por comportamentos concorrentes, assíncronos e dependentes de sincronização entre diferentes processos (MURATA, 1989). Sua estrutura formal é composta por quatro elementos fundamentais: lugares, transições, arcos direcionados e marcas (tokens), os quais permitem representar, respectivamente, estados do sistema, ocorrência de eventos, relações de dependência e evolução dinâmica dos processos modelados.

A representação gráfica das Redes de Petri utiliza uma notação específica para expressar seus elementos e as relações entre eles. Em uma representação genérica, os estados podem ser ilustrados por elipses, as ações por retângulos e as relações de fluxo por setas direcionadas, conforme apresentado na Figura 3. Essa convenção permite visualizar a sequência de eventos e as dependências entre os componentes do sistema. Entretanto, a forma geométrica dos elementos pode variar conforme o tipo de Rede de Petri adotado. Nas redes lugar/transição, por exemplo, os lugares são representados por círculos e as transições por barras ou retângulos estreitos. As marcas, representadas por pontos no interior dos lugares, indicam a distribuição dos recursos ou o estado atual do sistema. Essa notação específica é ilustrada na Figura 4.

Figura 3 – Representação gráfica dos elementos de uma Rede de Petri



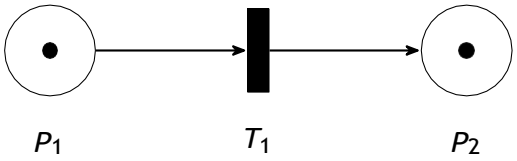
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Uma das principais características das Redes de Petri consiste na capacidade de associar uma representação visual intuitiva a métodos formais de análise matemática, possibilitando a avaliação de propriedades essenciais de sistemas complexos, como alcançabilidade, vivacidade, segurança, sincronização e ausência de bloqueios (*deadlocks*) (MURATA, 1989). Dessa forma, tornam-se uma ferramenta relevante para projetos que demandam elevado grau de previsibilidade, confiabilidade e controle sobre o comportamento operacional.

Historicamente, as Redes de Petri apresentam ampla aplicação na engenharia de automação industrial, sendo utilizadas na modelagem de sistemas de manufatura, linhas de produção automatizadas, sistemas de transporte, processos industriais e estratégias de controle baseadas

em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Nessas aplicações, sua capacidade de representar concorrência, compartilhamento de recursos, eventos condicionais e operações paralelas permite a análise e otimização de processos industriais antes mesmo de sua implementação física (GONÇALVES, 2025).

Figura 4 – Exemplo de uma Rede de Petri lugar/transição



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Historicamente, as Redes de Petri apresentam ampla aplicação na engenharia de automação industrial, sendo utilizadas na modelagem de sistemas de manufatura, linhas de produção automatizadas, sistemas de transporte, processos industriais e estratégias de controle baseadas em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Nessas aplicações, sua capacidade de representar concorrência, compartilhamento de recursos, eventos condicionais e operações paralelas permite a análise e otimização de processos industriais antes mesmo de sua implementação física (GONÇALVES, 2025).

Entretanto, a aplicabilidade das Redes de Petri ultrapassa os limites da automação industrial, uma vez que diversos sistemas computacionais modernos apresentam desafios semelhantes relacionados à coordenação de tarefas, gerenciamento de recursos e execução concorrente. Sistemas distribuídos, arquiteturas paralelas e aplicações baseadas em inteligência artificial, por exemplo, exigem mecanismos capazes de representar fluxos complexos de processamento, sincronização entre módulos e compartilhamento eficiente de recursos computacionais (BEEK; FANTECHI; SEMINI, 2019).

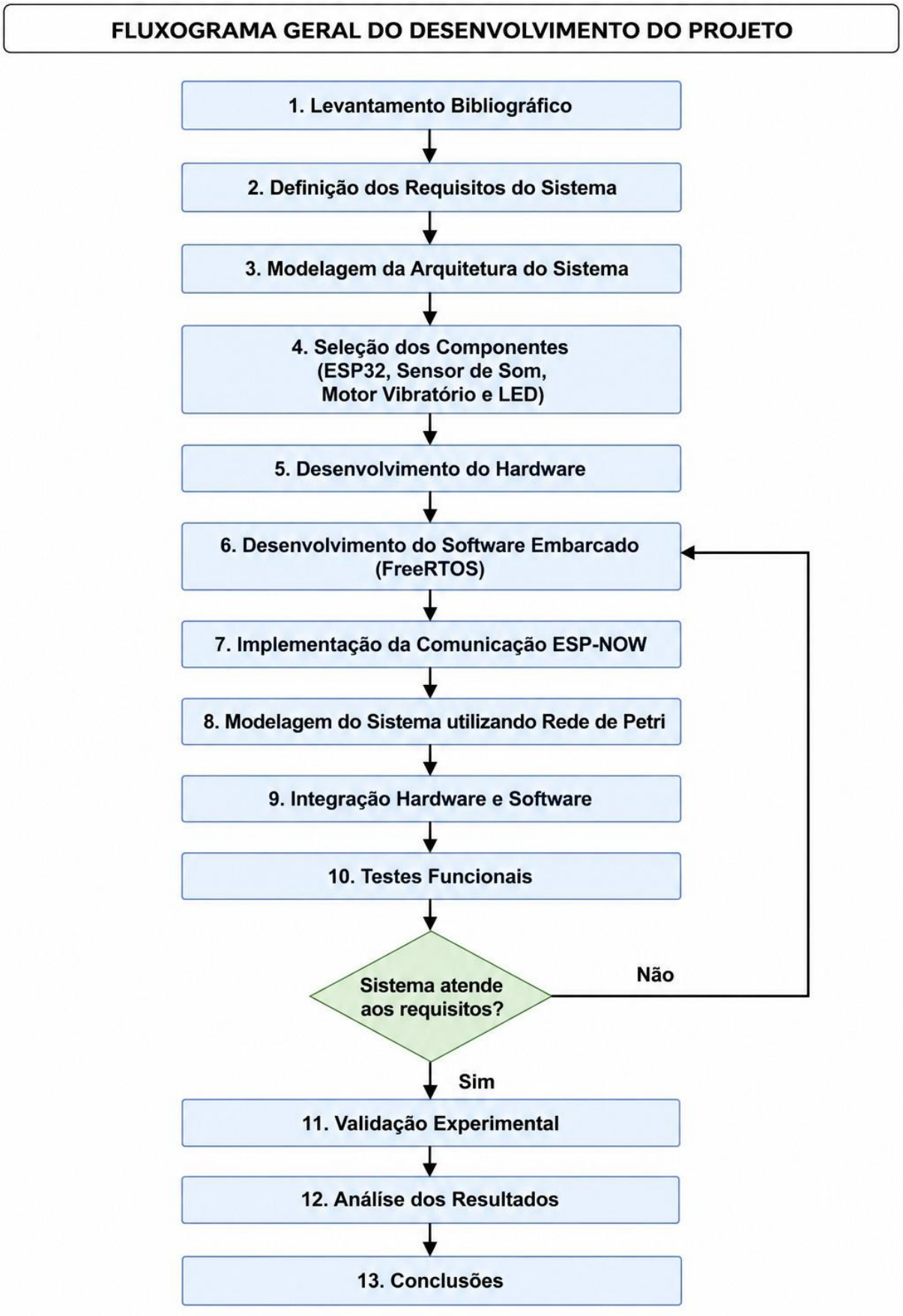
Nesse contexto, as Redes de Petri apresentam-se como uma abordagem adequada para a análise de sistemas embarcados e aplicações baseadas em sistemas operacionais de tempo real, como o *FreeRTOS*. A execução concorrente de tarefas, a comunicação entre processos, o gerenciamento de interrupções e a sincronização entre módulos são aspectos que podem ser representados por meio dessa modelagem formal, permitindo avaliar previamente possíveis conflitos e garantir maior confiabilidade ao sistema desenvolvido.

3 Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para o desenvolvimento do sistema embarcado proposto. O fluxograma apresentado na Figura 5 ilustra as etapas para a realização deste projeto, abrangendo a definição da arquitetura de hardware e software, a implementação dos módulos transmissor e receptor, a comunicação entre dispositivos utilizando o protocolo *ESP-NOW* e a modelagem formal do sistema por meio de Redes de Petri. Em seguida, são apresentados os procedimentos de implementação do software embarcado utilizando *FreeRTOS*, bem como os testes realizados para validação do funcionamento do sistema.

No presente trabalho, as Redes de Petri são empregadas como ferramenta de representação e análise do comportamento concorrente das tarefas executadas pelo *FreeRTOS*, possibilitando a modelagem do fluxo de eventos entre os módulos transmissor e receptor do sistema de acessibilidade auditiva proposto. A utilização dessa abordagem permite representar graficamente a interação entre os processos envolvidos, incluindo aquisição de sinais, processamento das informações, transmissão dos dados e geração dos estímulos de saída, contribuindo para a validação da arquitetura desenvolvida e para a verificação da correta sincronização entre os componentes do sistema.

Figura 5 – Fluxograma do Projeto.



Fonte: Autoria própria.

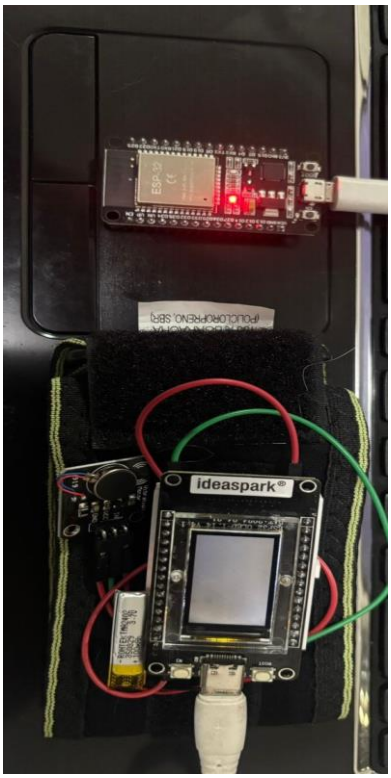
3.1 Arquitetura do Sistema

O sistema desenvolvido consiste em uma solução embarcada distribuída, composta por dois módulos *ESP32*, responsáveis pela transmissão, recepção e processamento de eventos sonoros simulados. Neste trabalho, não será abordada a captação direta de sinais sonoros. A simulação desses eventos será realizada por meio do teclado do computador, utilizando a tecla “A” para representar o acionamento do alarme e a tecla “C” para representar o acionamento da campainha. As informações correspondentes aos eventos simulados serão transmitidas ao módulo receptor por meio do protocolo de comunicação sem fio *ESP-NOW*.

O primeiro módulo atua como transmissor, sendo responsável pela leitura das entradas do teclado do computador por meio de uma comunicação serial e pelo envio das mensagens correspondentes aos eventos identificados. O segundo módulo corresponde ao dispositivo vestível, responsável por receber as mensagens enviadas pelo transmissor, processá-las e acionar os dispositivos de alerta destinados ao usuário.

A lógica de execução do sistema foi implementada utilizando o sistema operacional de tempo real *FreeRTOS*, que permite a execução concorrente de diferentes tarefas, contribuindo para a redução da latência e para uma maior previsibilidade temporal. Dessa forma, a arquitetura do sistema é constituída por dois módulos embarcados baseados no microcontrolador *ESP32*, interligados por meio do protocolo de comunicação sem fio *ESP-NOW*, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Arquitetura geral do projeto.



Fonte: Autoria própria.

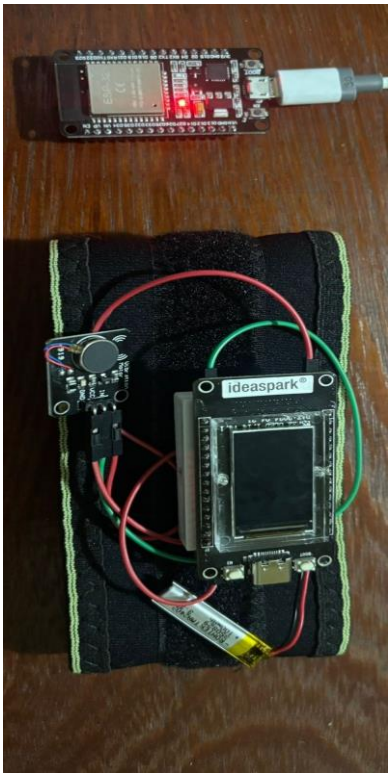
3.2 Desenvolvimento do Protótipo

O hardware foi desenvolvido utilizando módulos *ESP32* devido ao elevado poder de processamento, disponibilidade de interfaces de comunicação sem fio e compatibilidade com aplicações em Internet das Coisas. Conforme demonstrado na Figura 7 O sistema foi composto pelos seguintes elementos:

- 1 *ESP32* transmissor;
- 1 *ESP32* receptor;
- 1 Protoboard;
- 1 Bateria 3.7V 100mAh;
- 1 Computador para simulação dos Sinais Sonoros;
- 1 Motor vibratório;
- 1 Alimentação por bateria no módulo receptor.

O teclado via comunicação serial foi o responsável por enviar os dados, simulando eventos acústicos do ambiente. Após o processamento da informação pelo *ESP32* transmissor, o evento foi enviado ao módulo receptor, que executou os alertas correspondentes por meio do motor vibratório. Essa arquitetura permitiu a separação das funções de aquisição e notificação, reduzindo o processamento local de cada dispositivo e aumentando a modularidade da solução.

Figura 7 – Protótipo Montado.



Fonte: Autoria própria.

3.2.1 Desenvolvimento do Software Embarcado

O software foi desenvolvido em linguagem C/C++ utilizando a plataforma *PlatformIO* integrada ao *Visual Studio Code*. A utilização do *FreeRTOS* permitiu dividir o funcionamento do sistema em tarefas independentes, executadas de forma concorrente. Entre as principais tarefas implementadas destacam-se:

- Leitura do Sinal ;
- Processamento do evento detectado;
- Preparação da mensagem;
- Transmissão via *ESP-NOW*;
- Acionamento do motor vibratório.

O gerenciamento dessas tarefas pelo escalonador do *FreeRTOS* possibilitou reduzir o tempo de resposta do sistema e melhorar a organização do software.

3.2.2 Comunicação entre os Módulos

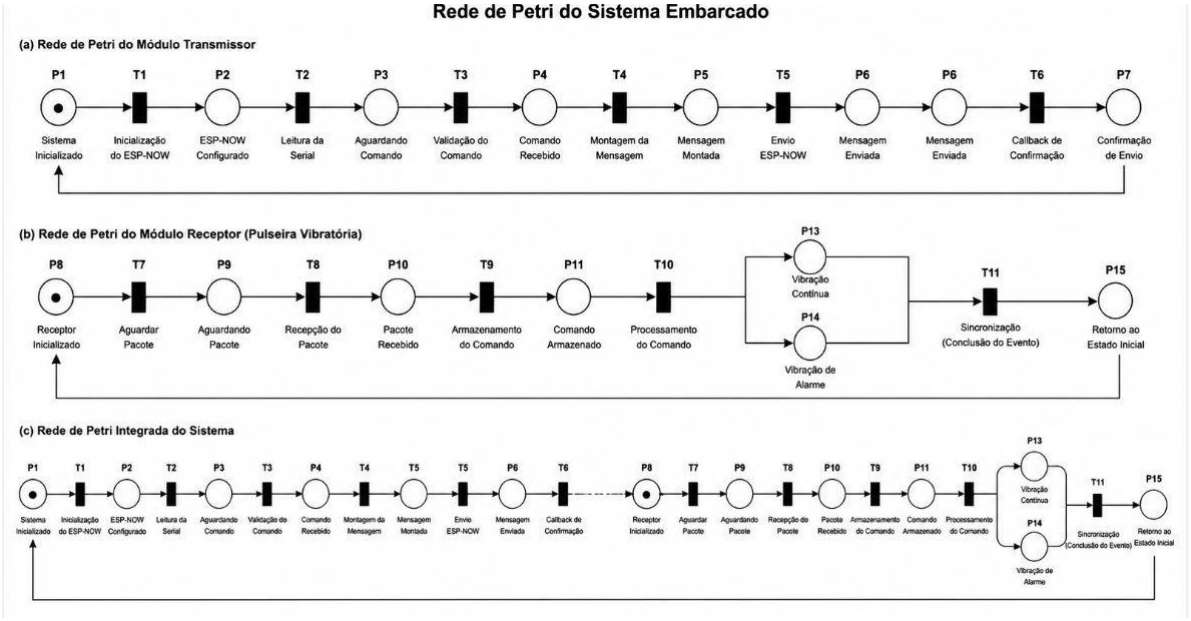
A comunicação entre os dispositivos foi realizada utilizando o protocolo *ESP-NOW*. Esse protocolo foi escolhido por permitir comunicação direta entre dispositivos *ESP32*, dispensando a utilização de roteadores Wi-Fi ou infraestrutura de rede convencional. Quando um evento sonoro é detectado pelo transmissor evidenciado na Figura 2, uma estrutura de dados contendo a identificação do evento é encapsulada e enviada ao receptor. Após o recebimento do pacote, o *ESP32* receptor interpreta o comando recebido e executa o padrão de alerta correspondente.

3.3 Modelagem por Redes de Petri

Durante o desenvolvimento do sistema embarcado verificou-se a necessidade de utilizar uma ferramenta capaz de representar formalmente o comportamento do sistema, descrevendo a sequência lógica de execução das tarefas conforme mostrado na Figura 8, os estados assumidos pelo dispositivo e as relações de sincronização entre as atividades executadas. Considerando essas necessidades, optou-se pela utilização das Redes de Petri como técnica de modelagem.

As Redes de Petri são amplamente utilizadas na representação de sistemas a eventos discretos, principalmente em aplicações que apresentam concorrência, paralelismo, sincronização e compartilhamento de recursos. Diferentemente de fluxogramas, que representam apenas uma sequência lógica de execução, as Redes de Petri permitem representar formalmente eventos que podem ocorrer simultaneamente, possibilitando uma análise mais detalhada do comportamento do sistema antes de sua implementação. No sistema desenvolvido neste trabalho, essa técnica mostrou-se adequada devido à arquitetura do software embarcado. Como o processamento foi implementado utilizando o sistema operacional *FreeRTOS*, diversas tarefas são executadas de forma concorrente, exigindo um modelo capaz de representar essa execução paralela. Além disso, a modelagem permitiu verificar a sequência de funcionamento do sistema, desde a simulação de um evento sonoro pelo teclado até o acionamento dos dispositivos de alerta presentes no módulo vestível.

Figura 8 – Rede de Petri desenvolvida para representar o funcionamento completo do sistema.



Fonte: Autoria própria.

3.4 Rede de Petri do sistema embarcado

.

Pode-se observar que a rede foi construída de maneira sequencial até o instante da recepção da mensagem pelo módulo receptor. A partir desse ponto ocorre uma ramificação da rede, permitindo que os dois mecanismos de alerta sejam executados simultaneamente, característica fundamental da aplicação desenvolvida. A modelagem foi dividida em três etapas principais:

- Detecção e processamento do evento;
- Transmissão da informação;
- Execução simultânea dos alertas.

3.4.1 Lugar inicial

O funcionamento da rede inicia-se no lugar P1, denominado Sistema Inicial. Esse lugar representa o estado de repouso do dispositivo, no qual todas as tarefas do sistema encontram-se aguardando a ocorrência de um novo evento. Nesse estado, o protótipo permanece realizando continuamente a aquisição dos sinais provenientes do ambiente, enquanto o microcontrolador executa apenas as tarefas de monitoramento implementadas no *FreeRTOS*. A existência desse estado inicial garante que o sistema permaneça permanentemente disponível para detectar novos eventos, característica indispensável para aplicações assistivas em tempo real. Quando um som é simulado por meio do teclado, por meio da ativação de uma tecla específica, ocorre a habilitação da transição T1.

3.4.2 Detecção do evento sonoro

A transição T1 representa a detecção de um evento sonoro simulado pelo teclado através de uma tecla, por meio de comunicação serial, este sinal é enviado ao módulo transmissor. Essa transição somente é habilitada quando o nível de sinal é enviado pelo teclado simulando sinal sonoro. Após o disparo de T1, a marca é transferida para o lugar P2, denominado Som identificado. Esse lugar representa o instante em que o sistema confirma a existência de um evento válido e inicia seu processamento. A separação entre a detecção e o processamento foi adotada para representar claramente que a simples aquisição do sinal não implica imediatamente na geração do alerta. Antes disso, o evento necessita ser tratado pelo software embarcado.

3.4.3 Processamento utilizando FreeRTOS

O processamento do evento é representado pela transição T2. Essa transição simboliza a execução das tarefas responsáveis pelo tratamento da informação adquirida pelo. Durante

essa etapa, o *FreeRTOS* realiza o escalonamento das tarefas responsáveis pela análise do evento detectado. A utilização do sistema operacional de tempo real torna possível executar diferentes tarefas de forma concorrente, mantendo tempos previsíveis de resposta e reduzindo atrasos na execução do sistema. Após o disparo de T2, a marca é transferida para o lugar P3, denominado Evento classificado. Esse lugar representa o instante em que o processamento foi concluído e o evento encontra-se apto para ser enviado ao dispositivo receptor.

3.4.4 Preparação da mensagem

Após a classificação do evento, ocorre o disparo da transição T3. Essa transição representa a preparação da estrutura de dados que será enviada por meio do protocolo *ESP-NOW*. Durante essa etapa são organizadas todas as informações necessárias para a comunicação entre os dispositivos. Embora a mensagem possua poucos bytes, essa etapa foi representada separadamente na Rede de Petri por constituir uma atividade distinta dentro do software embarcado. Após a conclusão dessa etapa, a marca alcança o lugar P4, denominado Mensagem pronta. Esse lugar representa que todas as informações necessárias para a transmissão encontram-se devidamente preparadas.

3.4.5 Transmissão utilizando *ESP-NOW*

A transmissão da mensagem é representada pela transição T4. Nessa etapa ocorre o envio das informações do *ESP32* transmissor para o *ESP32* receptor utilizando o protocolo *ESP-NOW*. A escolha desse protocolo ocorreu devido à sua baixa latência, baixo consumo energético e comunicação direta entre dispositivos, dispensando a utilização de roteadores ou pontos de acesso Wi-Fi. Após o envio da mensagem, a marca alcança o lugar P5, denominado Dados transmitidos. Esse estado indica que a informação já foi enviada pelo transmissor e encontra-se disponível para recepção.

3.4.6 Recepção da mensagem

A transição T5 representa a recepção da mensagem pelo dispositivo vestível. Quando essa transição dispara, significa que o pacote enviado foi recebido corretamente pelo *ESP32* receptor. Após sua execução, a marca é posicionada em P6, denominado Dados recebidos. Esse lugar representa um dos pontos mais importantes da rede, pois a partir dele inicia-se o comportamento concorrente do sistema. Enquanto todas as etapas anteriores ocorreram de maneira sequencial, a partir de P6 duas transições tornam-se simultaneamente habilitadas. Essa característica representa uma das principais vantagens da utilização das Redes de Petri, permitindo modelar formalmente atividades paralelas.

3.4.7 Execução concorrente dos alertas.

Após o recebimento de uma mensagem, o sistema permite que duas ações sejam iniciadas de forma concorrente. Na Rede de Petri, esse comportamento é representado pela habilitação simultânea das transições T6 e T7. A transição T6 representa o acionamento do motor vibratório. Quando essa transição é disparada, a marca é deslocada para o lugar P7, denominado Vibração, indicando que o motor está ligado e que o usuário está recebendo um alerta por meio de estímulo tátil. Simultaneamente, a transição T7 representa o acionamento do alerta visual. Após seu disparo, a marca é deslocada para o lugar P8, denominado Alerta Visual, indicando que esse recurso também foi ativado.Dessa maneira, a presença de marcas nos lugares P7 e P8 representa que os dois alertas podem permanecer ativos simultaneamente, sem que a execução de um dependa da conclusão do outro.Na implementação prática, esse comportamento está relacionado ao conceito de concorrência do FreeRTOS, que permite organizar diferentes tarefas para executar suas respectivas funções de maneira independente. Assim, a Rede de Petri oferece uma representação formal do paralelismo previsto na arquitetura do sistema, facilitando a compreensão da relação entre os estados e as ações executadas.

3.4.8 Sincronização das tarefas.

Após a execução dos dois alertas ocorre a sincronização do sistema através da transição T8. Essa transição somente pode disparar quando existem marcas simultaneamente em P7 e P8. Isso significa que tanto o alerta vibratório quanto o alerta visual devem ter sido concluídos. Essa característica impede que o sistema finalize o processamento antes da execução completa dos dois mecanismos de notificação. A sincronização representada por T8 garante consistência ao funcionamento do sistema, evitando estados inconsistentes durante a operação. Após o disparo de T8, a marca é deslocada para o lugar P9, denominado Evento concluído.

3.4.9 Retorno ao estado inicial.

O encerramento do ciclo operacional é representado pela transição T9. Essa transição representa a finalização completa do processamento do evento detectado. Após seu disparo, a marca retorna ao lugar inicial P1, reiniciando o ciclo de funcionamento do sistema. Essa realimentação caracteriza um sistema cíclico, permitindo que novos eventos sejam processados continuamente sem necessidade de reinicialização do equipamento. Do ponto de vista operacional, isso significa que, imediatamente após concluir um alerta, o dispositivo retorna ao estado de monitoramento do ambiente, permanecendo preparado para detectar novos eventos sonoros.

3.4.10 Análise da Rede de Petri.

A Rede de Petri desenvolvida representa de forma fiel o comportamento do sistema embarcado implementado neste trabalho, conforme ilustrado na Figura 8 . A modelagem foi

estruturada em dois módulos concorrentes, correspondentes ao transmissor e ao receptor, interligados pelo lugar P15, que representa o canal de comunicação *ESP-NOW*. Essa organização evidencia tanto a sequência lógica das operações quanto a sincronização entre os dispositivos, permitindo descrever formalmente o fluxo de comunicação e processamento das mensagens.

No módulo transmissor, o processamento começa com a inicialização do protocolo *ESP-NOW* (T1), seguida pela leitura periódica da interface serial (T2). Após a recepção de um comando válido (T3), a mensagem é estruturada (T4) e transmitida ao dispositivo receptor (T5). O disparo da transição T5 produz simultaneamente uma marca em P6, indicando que o pacote foi enviado, e outra em P15, representando sua disponibilização no canal de comunicação. Em seguida, a confirmação do envio é realizada por meio do *callback OnDataSent* (T6), que conduz o sistema ao estado de confirmação (P7). A realimentação entre P7 e T2 estabelece um ciclo contínuo de operação, permitindo que o transmissor permaneça permanentemente apto a receber novos comandos a cada intervalo de aproximadamente 50 ms, comportamento equivalente ao executado pela tarefa responsável pela leitura serial no *FreeRTOS*.

O módulo receptor inicia sua execução com a configuração do *ESP-NOW* (T7), permanecendo em estado de espera até que um pacote esteja simultaneamente disponível no canal (P15) e o receptor esteja preparado para recebê-lo (P9). Essa sincronização é formalmente representada pela transição T8, que somente é habilitada quando ambas as condições são satisfeitas, modelando com precisão o mecanismo de comunicação assíncrona implementado pelo protocolo *ESP-NOW*. Após a recepção da mensagem, o conteúdo é validado e armazenado (T9), habilitando a seleção da ação correspondente ao comando recebido.

Dependendo do conteúdo da mensagem, duas trajetórias distintas podem ser executadas. Quando o comando corresponde ao acionamento contínuo da campainha, a transição T10 conduz o sistema ao estado P13, mantendo o motor vibratório continuamente acionado. Alternativamente, quando o comando corresponde ao modo de alarme, a transição T11 conduz a execução ao estado P14, responsável pelo controle do ciclo temporizado de vibração.

O lugar P14 representa o comportamento cíclico do alarme, no qual duas transições temporizadas alternam sucessivamente entre os estados de vibração e pausa. A transição T12 mantém o motor acionado durante três segundos, enquanto a transição T13 representa uma pausa de dois segundos com o motor desligado. Esse ciclo é repetido por cinco iterações consecutivas, sendo encerrado pela transição T14, que retorna a marca para P12, indicando que o motor foi desligado e que o sistema voltou ao estado de repouso, permanecendo novamente apto para receber novos comandos.

Os parâmetros temporais e os padrões de acionamento do motor vibratório para cada modalidade de evento são sintetizados na Tabela 1. Essa representação permite visualizar as diferenças entre o acionamento contínuo da campainha e o funcionamento intermitente do modo de alarme.

Tabela 1 – Padrões do Feedback Tátil

Evento	Motor ligado	Motor desligado	Repetições
Campainha	Contínuo	–	Até o reset
Alarme	3 segundos	2 segundos	5 ciclos

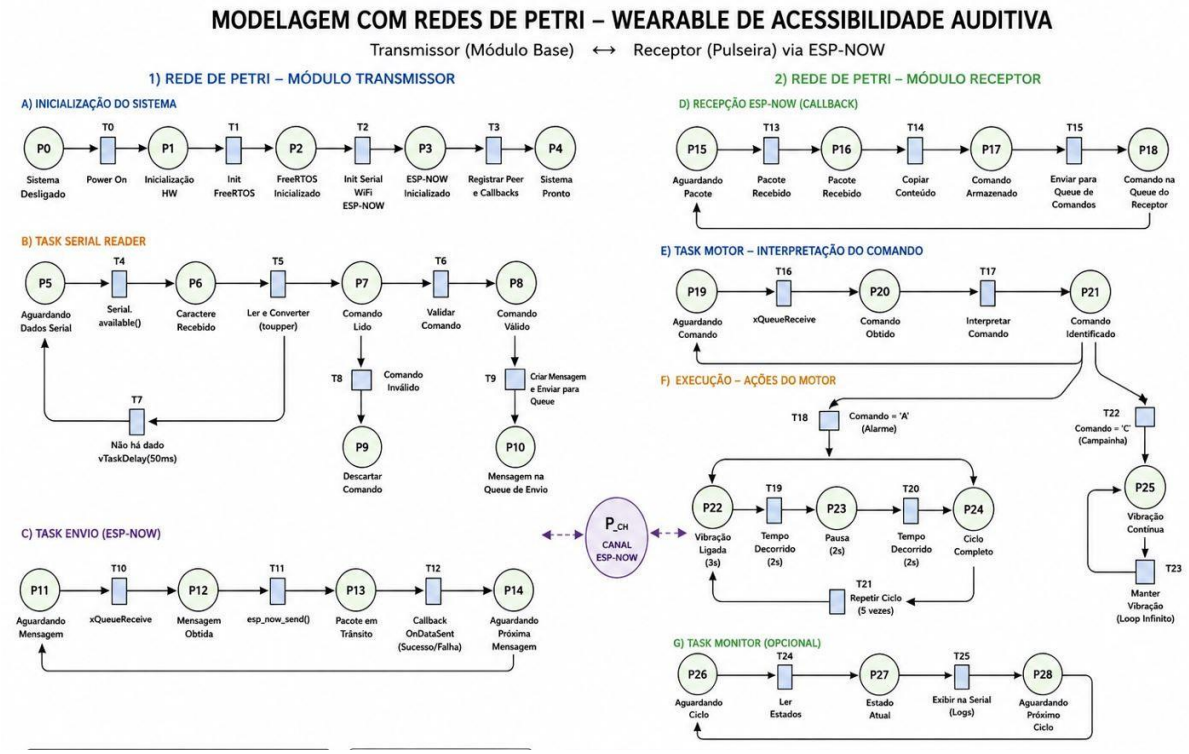
Fonte: Autoria própria.

Sob o ponto de vista da teoria de Redes de Petri, a modelagem apresenta propriedades importantes para sistemas embarcados de comunicação em tempo real. A análise de alcançabilidade demonstra que todos os lugares da rede podem ser atingidos a partir da marcação inicial, garantindo que todos os estados previstos sejam efetivamente executáveis. A vivacidade da rede é assegurada pela realimentação existente no transmissor, que mantém continuamente habilitada a leitura de novos comandos, enquanto o receptor permanece ativo sempre que novas mensagens são disponibilizadas no canal *ESP-NOW*. A propriedade de segurança também é preservada, uma vez que todos os lugares são limitados a uma única marca, impedindo o acúmulo de mensagens e evitando situações de sobrecarga ou inconsistência no processamento.

Outro aspecto relevante é a representação explícita da concorrência entre as tarefas do sistema. O transmissor e o receptor operam de forma independente e simultânea, reproduzindo a arquitetura multitarefa implementada no *FreeRTOS*. Enquanto o transmissor permanece em seu ciclo contínuo de leitura e envio de comandos, o receptor pode executar os ciclos de vibração conforme apresentado na Tabela 1, do alarme sem interferir no funcionamento da tarefa transmissora. Essa característica evidencia a capacidade da Rede de Petri em representar sistemas distribuídos e concorrentes, permitindo visualizar claramente os pontos de sincronização e de comunicação entre processos paralelos.

Além de constituir uma ferramenta formal para a validação lógica do sistema, a Rede de Petri estabeleceu uma correspondência direta com a máquina de estados implementada no software embarcado, facilitando a compreensão do comportamento global da aplicação. Dessa forma, a modelagem contribuiu tanto para a documentação da arquitetura quanto para a verificação das propriedades de sincronização, concorrência e repetitividade do sistema, reduzindo ambiguidades durante o desenvolvimento e oferecendo uma base consistente para futuras expansões da solução proposta, conforme apresentado na Figura 9

Figura 9 – Fluxograma dos Estados e Transições



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Propriedades formais da Rede de Petri do sistema proposto

Rede de Petri do Wearable de Acessibilidade Auditiva	
Propriedade	**Análise da Rede**
Alcançabilidade	Todos os lugares (P0 a P28) são alcançáveis a partir da marcação inicial, representando todas as etapas de inicialização, comunicação, processamento e atuação do sistema embarcado.
Concorrência	As tarefas *Serial Reader*, *Envio ESP-NOW*, *Recepção*, *Motor* e *Monitor* executam de forma concorrente, refletindo a arquitetura multitarefa implementada com o *FreeRTOS*.
Sincronização	A comunicação entre transmissor e receptor é sincronizada pelo lugar compartilhado que representa o Canal *ESP-NOW*, garantindo que o processamento da mensagem somente ocorra após o recebimento do pacote enviado.
Determinismo	As etapas sequenciais de inicialização, leitura serial, envio da mensagem e processamento do pacote possuem apenas uma transição habilitada por vez, assegurando comportamento determinístico durante a execução normal do sistema.
Vivacidade	Os ciclos de retorno presentes nas tarefas de leitura serial, envio, recepção, monitoramento e no ciclo temporizado do alarme garantem que o sistema permaneça continuamente apto a processar novos eventos, caracterizando uma rede viva.
Segurança	Todos os lugares são limitados a uma única marca (rede 1-limitada), impedindo o acúmulo simultâneo de estados e evitando inconsistências durante a comunicação e a execução das tarefas.
Ausência de *(deadlock*	Não existem estados sem saída. Após cada transmissão, recepção ou execução do motor vibratório, a rede retorna aos estados de espera, permitindo a operação contínua do dispositivo.
Conflitos Controlados	A única decisão ocorre durante a interpretação do comando recebido, direcionando a execução para o modo *Alarme* (’A’) ou *Campainha* (’C’). Essa escolha é mutuamente exclusiva, não caracterizando conflito estrutural na rede.
Temporização	O padrão de vibração do alarme é representado por um ciclo temporizado de 3s ligado e 2s desligado, repetido cinco vezes, modelando o comportamento temporal implementado no firmware do *wearable*.

4 Resultados

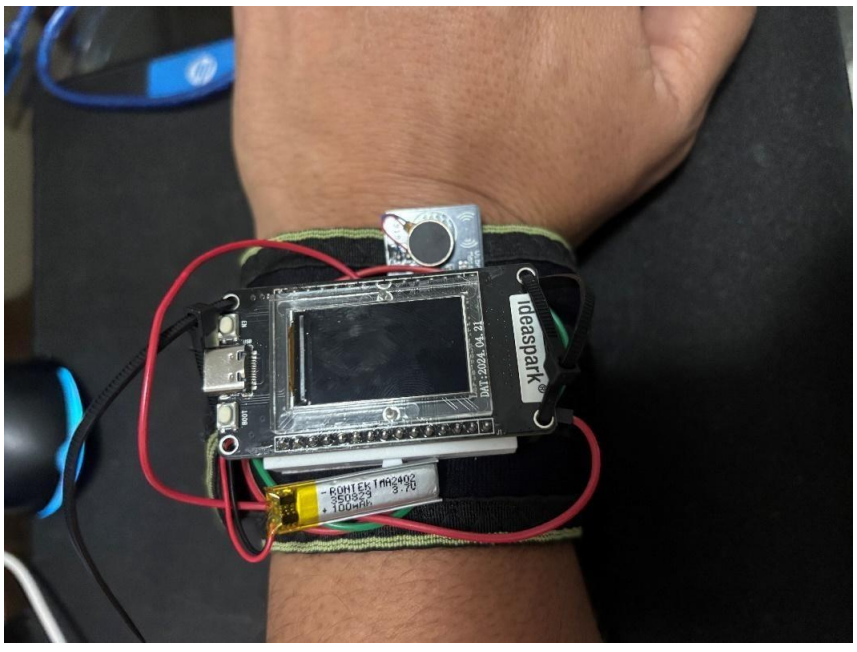
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento do sistema proposto. Inicialmente é descrito o protótipo físico desenvolvido, seguido da validação da comunicação entre os módulos, da execução concorrente das tarefas utilizando o *FreeRTOS* e da modelagem do comportamento do sistema por meio das Redes de Petri. Ao final, são discutidos os resultados obtidos, evidenciando a viabilidade da solução proposta para aplicações de tecnologia assistiva de baixo custo destinadas a pessoas com deficiência auditiva.

4.1 Protótipo Desenvolvido

Após a definição da arquitetura do sistema, realizou-se a construção do protótipo composto por dois módulos independentes: o módulo transmissor e o módulo receptor. Ambos foram desenvolvidos utilizando placas *ESP32* devido ao seu elevado poder de processamento, baixo consumo energético e suporte nativo à comunicação sem fio.

O módulo transmissor foi responsável pela identificação dos eventos sonoros e pelo envio das informações através do protocolo *ESP-NOW*. Já o módulo receptor permaneceu continuamente aguardando novas mensagens, processando os eventos recebidos e acionando o motor vibratório conforme o padrão previamente definido.

Figura 10 – Protótipo físico do módulo receptor vestível.



Fonte: Disponibilizado pelo autor.

4.1.1 Testes Realizados e observações

Os testes realizados evidenciaram que a bateria de 3.7mAh não forneceu energia suficiente para alimentar o módulo receptor, equipado com *ESP32* e display LCD. Por esse motivo, optou-se pela alimentação direta por meio de um módulo de 5 V do Arduino, garantindo maior estabilidade no fornecimento de tensão. Após essa adequação, ambos os módulos apresentaram funcionamento estável durante os testes, mantendo a comunicação contínua entre o transmissor e o receptor.

4.2 Comunicação entre os Módulos

A comunicação foi implementada utilizando o protocolo *ESP-NOW*, permitindo troca direta de mensagens entre os dispositivos sem necessidade de roteadores ou pontos de acesso Wi-Fi. Durante os testes observou-se elevada estabilidade na transmissão dos pacotes, com baixa latência e reduzido consumo energético. Sempre que um evento era identificado pelo módulo transmissor, a mensagem era encaminhada imediatamente ao módulo receptor. A utilização do protocolo mostrou-se adequada para aplicações embarcadas de tempo real, uma vez que reduziu significativamente o tempo entre a detecção do evento e a resposta tátil percebida pelo usuário.

4.3 Execução Concorrente utilizando *FreeRTOS*

Um dos principais objetivos deste trabalho consistiu na utilização do sistema operacional *FreeRTOS* para gerenciamento das tarefas executadas pelo *ESP32*. Durante a implementação foram desenvolvidas tarefas independentes para:

- Monitoramento dos Eventos;
- Comunicação *ESP-NOW*;
- Processamento das Mensagens;
- Acionamento do motor Vibratório.

4.4 Validação da Modelagem utilizando Redes de Petri

A Rede de Petri desenvolvida foi utilizada para representar formalmente o comportamento concorrente do sistema. A figura 8 apresenta o modelo utilizado neste trabalho. A análise da rede demonstra que o sistema inicia sua execução no lugar P1, correspondente ao estado de espera pelo monitoramento dos eventos. Após a ocorrência de um evento sonoro, a transição T1 é habilitada, permitindo que o token avance sucessivamente pelos estados responsáveis pelo

processamento do evento, transmissão da mensagem, recepção pelo módulo receptor e acionamento do atuador vibratório. No lugar P6 observa-se uma ramificação da rede, representando duas possibilidades distintas de processamento. Dependendo do evento recebido, o fluxo pode seguir pelas transições T6 ou T7, alcançando respectivamente os lugares P7 e P8. Ambos os fluxos convergem posteriormente na transição T8, demonstrando o mecanismo de sincronização existente no sistema. Após a execução do padrão de vibração correspondente, o token alcança o lugar P9. Finalmente, por meio da transição T9, o sistema retorna ao estado inicial P1, caracterizando um comportamento cíclico adequado para aplicações embarcadas que permanecem continuamente em operação.

A modelagem permitiu verificar visualmente o fluxo de execução das tarefas, além de representar adequadamente aspectos relacionados à concorrência, sincronização e retorno ao estado inicial. Cada tarefa foi executada de forma concorrente, permitindo que diferentes operações fossem realizadas simultaneamente sem comprometer o desempenho do sistema. A utilização do escalonador do *FreeRTOS* permitiu distribuir adequadamente o tempo de processamento entre as tarefas, reduzindo atrasos e aumentando a responsividade do dispositivo. Durante todos os testes não foram observados bloqueios, perda de mensagens ou interrupções que comprometessem o funcionamento do sistema.

4.5 Funcionamento do Sistema

Durante os testes experimentais o funcionamento do sistema ocorreu conforme previsto pela modelagem desenvolvida. Inicialmente, o módulo transmissor permaneceu monitorando continuamente a ocorrência de eventos sonoros. Após a identificação de um evento, a informação foi processada e transmitida ao módulo receptor utilizando o protocolo *ESP-NOW*. Ao receber a mensagem, o receptor identificou o tipo de evento e acionou o motor vibratório utilizando o padrão correspondente. Concluído o acionamento, o sistema retornou automaticamente ao estado de espera, permanecendo preparado para processar novos eventos. Esse ciclo repetiu-se continuamente durante todos os testes realizados.

4.6 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos demonstram que a arquitetura proposta apresentou desempenho compatível com os objetivos estabelecidos neste trabalho.A utilização do *ESP32* possibilitou elevado desempenho computacional aliado ao baixo custo de implementação, tornando o sistema financeiramente acessível quando comparado a soluções comerciais existentes. O protocolo *ESP-NOW* apresentou comunicação rápida e confiável entre os dispositivos, dispensando infraestrutura adicional de rede. A utilização do *FreeRTOS* permitiu organizar adequadamente as tarefas concorrentes, simplificando o desenvolvimento do software embarcado e aumentando sua robustez. Da mesma forma, a utilização das Redes de Petri mostrou-se uma ferramenta

eficiente para representar o comportamento do sistema, permitindo compreender de forma clara a sequência de eventos, a sincronização entre tarefas e o fluxo completo de funcionamento do dispositivo.

Por fim, o protótipo desenvolvido demonstrou a viabilidade da proposta como uma tecnologia assistiva de baixo custo destinada a pessoas com deficiência auditiva, podendo futuramente incorporar novos sensores, diferentes padrões de vibração e mecanismos adicionais de comunicação, ampliando suas possibilidades de utilização em ambientes domésticos e urbanos.

5 Considerações finais e trabalhos futuros

O desenvolvimento do sistema proposto permitiu validar a viabilidade da utilização de uma arquitetura distribuída baseada em microcontroladores *ESP32* para aplicações de acessibilidade auditiva. A integração entre o protocolo de comunicação *ESP-NOW*, o sistema operacional *FreeRTOS* e a modelagem por Redes de Petri resultou em uma solução capaz de detectar eventos, transmitir informações e gerar notificações táteis de forma rápida, organizada e confiável.

Os ensaios experimentais demonstraram que a comunicação entre os módulos transmissor e receptor ocorreu de maneira estável durante todo o período de funcionamento do protótipo. O protocolo *ESP-NOW* apresentou desempenho compatível com aplicações em tempo real, permitindo a troca direta de mensagens entre os dispositivos sem a necessidade de infraestrutura de rede Wi-Fi convencional. Essa característica reduziu significativamente a latência da comunicação, possibilitando que os comandos enviados pelo transmissor fossem recebidos quase instantaneamente pelo módulo vestível.

A arquitetura baseada em *FreeRTOS* também apresentou resultados satisfatórios. A divisão do software em tarefas independentes permitiu que as atividades de leitura dos comandos, processamento das mensagens, comunicação sem fio e acionamento do motor vibratório fossem executadas de forma concorrente, sem comprometer a responsividade do sistema. Durante os testes não foram observadas interrupções, bloqueios ou perda de mensagens, evidenciando que o escalonamento das tarefas ocorreu de maneira adequada e que a utilização de prioridades contribuiu para manter o comportamento previsível do sistema.

Outro aspecto relevante refere-se ao padrão de vibração implementado para diferenciar os eventos monitorados. O sistema foi capaz de distinguir dois tipos de notificações: um padrão de vibração contínua destinado ao acionamento da campainha e um padrão temporizado, composto por cinco ciclos de três segundos de vibração seguidos por dois segundos de pausa, destinado aos alarmes. Essa diferenciação permitiu que o usuário identificasse o tipo de evento sem a necessidade de sinais visuais ou sonoros adicionais, atendendo ao objetivo de fornecer uma interface tátil simples e intuitiva.

A modelagem por Redes de Petri mostrou-se compatível com o comportamento observado durante a implementação prática. A rede representou corretamente a sequência de inicialização dos módulos, a preparação das mensagens, o envio pelo protocolo *ESP-NOW*, a recepção pelo módulo vestível e o acionamento do motor vibratório. A utilização do lugar P15 como representação do canal de comunicação permitiu modelar formalmente a sincronização entre transmissor e receptor, evidenciando que o processamento da mensagem somente ocorre

quando ambos os dispositivos se encontram preparados para realizar a comunicação.

Do ponto de vista da análise formal, verificou-se que a Rede de Petri atende às principais propriedades esperadas para sistemas embarcados concorrentes. A análise de alcançabilidade demonstrou que todos os estados previstos podem ser atingidos a partir da marcação inicial, garantindo cobertura completa do comportamento operacional. A propriedade de vivacidade foi observada pela existência dos ciclos de realimentação presentes tanto no transmissor quanto no receptor, assegurando que o sistema permaneça continuamente disponível para processar novos eventos. Da mesma forma, a limitação da rede foi preservada, uma vez que cada lugar admite apenas uma marca, evitando acúmulo de mensagens ou estados inconsistentes durante a execução.

A correspondência entre a Rede de Petri e a máquina de estados desenvolvida também contribuiu para validar a implementação do software. Enquanto a máquina de estados descreve a evolução lógica das tarefas executadas pelo firmware, a Rede de Petri representa formalmente os mecanismos de concorrência, sincronização e compartilhamento de recursos. Essa equivalência facilitou a verificação da consistência entre o modelo conceitual e o comportamento observado no protótipo físico, reduzindo ambiguidades durante o desenvolvimento.

Outro resultado importante foi a modularidade da arquitetura proposta. A separação entre os módulos transmissor e receptor permite futuras expansões do sistema sem alterações significativas na estrutura básica de funcionamento. Novos sensores podem ser incorporados ao módulo transmissor para identificar diferentes tipos de eventos sonoros, enquanto novos atuadores podem ser adicionados ao dispositivo vestível para ampliar as possibilidades de notificação ao usuário. Essa característica evidencia o potencial de escalabilidade da solução e sua adequação para aplicações em Internet das Coisas (IoT).

Sob o ponto de vista da tecnologia assistiva, os resultados obtidos demonstram que o protótipo atende ao propósito de converter informações sonoras em estímulos táteis, oferecendo uma alternativa de baixo custo para pessoas com deficiência auditiva. A utilização de componentes amplamente disponíveis no mercado, associada ao emprego de software livre e protocolos de comunicação eficientes, torna a solução economicamente viável e tecnicamente consistente.

De forma geral, os resultados experimentais confirmam que os objetivos estabelecidos neste trabalho foram alcançados. O sistema apresentou comunicação estável, resposta compatível com aplicações em tempo real, execução concorrente eficiente das tarefas implementadas no *FreeRTOS* e comportamento coerente com a modelagem realizada por Redes de Petri. Entretanto, algumas limitações devem ser consideradas, especialmente em relação à fonte de energia elétrica do dispositivo, uma vez que o funcionamento contínuo dos módulos eletrônicos e do motor vibratório representa um fator relevante para o consumo da bateria. Além disso, aspectos como a otimização do consumo energético e a avaliação da autonomia em diferentes condições de utilização podem ser aprofundados em trabalhos futuros. Apesar dessas limitações, a arquitetura proposta constitui uma base sólida para o desenvolvimento de dispositivos vestíveis de acessibili-

dade auditiva. Como possibilidades de expansão, destacam-se a implementação de algoritmos de reconhecimento automático de sons, a integração com sensores inteligentes, a conectividade com plataformas de Internet das Coisas (IoT) e o desenvolvimento de novas estratégias de feedback tátil, ampliando sua aplicabilidade em ambientes residenciais, institucionais e urbanos.

Referências

BARRY, R. Mastering the freertos real time kernel. 2016. 2016. Citado na página 19.

BARRY, R. Dominando o kernel de tempo real do freertos. *Real Time Engineers Ltd*, 2018. 2018. Citado na página 10.

BEAR, M. F.; CONNORS, B. W.; PARADISO, M. A. *Neurociências: Desvendando o Sistema Nervoso*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2008. Citado na página 15.

BEEK, M. H. T.; FANTECHI, A.; SEMINI, L. *From Software Engineering to Formal Methods and Tools, and Back: Essays Dedicated to Stefania Gnesi on the Occasion of Her 65th Birthday*. [S.l.]: Springer Nature, 2019. Citado na página 21.

BERSCH, R. *Introdução à Tecnologia Assistiva*. Porto Alegre: CEDI, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 13.

CONLEY, K. et al. Vibration alert bracelet for notification of the visually and hearing impaired. *Journal of Open Hardware*, 2019. v. 3, n. 1, p. 1–11, 2019. Citado na página 17.

Espressif Systems. *ESP-IDF Programming Guide*. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://docs-.espressif.com/projects/esp-idf/>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

FARAHMAND, R. B. et al. The audiometric and mechanical effects of partial ossicular discontinuity. *Ear and Hearing*, 2016. Lippincott Williams & Wilkins, v. 37, n. 2, p. 206–215, 2016. Citado na página 16.

GONÇALVES, M. J. M. Redes de petri aplicadas à otimização do treinamento de redes neurais distribuídas. 2025. 2025. Citado na página 21.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. *Elas são POWERS! Equipe do IFMG vence edição de programa da embaixada americana*. 2023. https://www2.ifmg.edu.br/portal/noticias/equipe-do-campus-ouro-preto-vence-edicao-de-programa-da-embaixada-amer Acesso em: 1 nov. 2026. Citado na página 17.

MACGAVIN, B.; EDWARDS, T.; GORLEWICZ, J. L. A protactile-inspired wearable haptic device for capturing the core functions of communication. *IEEE Transactions on Haptics*, 2021. v. 14, n. 2, p. 279–284, 2021. Citado na página 17.

MONK, S. *Programando o ESP32 em MicroPython*. Nova York: McGraw-Hill Education, 2017. Citado na página 10.

MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 1989. IEEE, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 20.

National Institute on Deafness and Other Communication Disorders. *Quick Statistics About Voice, Speech, Language*. 2016. Disponível em: <https://www.nidcd.nih.gov/health/statistics-/quick-statistics-voice-speech-language>. Acesso em: 2026-07-17. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

National Institute on Deafness and Other Communication Disorders (NIDCD). *Speech and Language Developmental Milestones*. U.S. Department of Health and Human Services, National Institutes of Health, 2011. Acessado em: 19 out. 2026. Disponível em: <https://www.nidcd.nih.gov/health/speech-and-language>. Citado na página 11.

NORMAN, D. A. *The Design of Everyday Things*. New York: Basic Books, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 14.

Organização Mundial da Saúde. *Nome do Relatório ou Diretriz Específica da OMS*. Genebra, 2026. Acessado em: 20 de outubro de 2026. Disponível em: <https://who.int>. Citado na página 11.

SANTOS, D. S. d. Registro de acesso a salas de descanso monitorado por sistemas embarcados e internet das coisas. 2023. UFMA, 2023. Citado na página 18.

SENEVIRATNE, S. Uma pesquisa sobre dispositivos vestíveis e desafios. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017. 2017. Citado na página 16.

TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. *Digital Systems*. [S.l.]: Monroe Community College, 2007. Citado na página 18.

APÊNDICE A – Código-fonte do módulo transmissor

Este apêndice apresenta o código-fonte desenvolvido para o módulo transmissor do sistema de acessibilidade auditiva proposto neste trabalho. O software foi implementado em linguagem C/C++, utilizando a plataforma Arduino para o microcontrolador ESP32, juntamente com o sistema operacional de tempo real *FreeRTOS* e o protocolo de comunicação sem fio *ESP-NOW*.

O programa é responsável pela leitura dos comandos enviados pela interface serial, pela validação dos dados recebidos, pelo encapsulamento da mensagem em uma estrutura de comunicação e pelo envio das informações ao módulo receptor utilizando o protocolo *ESP-NOW*. Além disso, o software emprega tarefas concorrentes do *FreeRTOS* para separar as funções de leitura serial, transmissão dos dados e monitoramento do estado do sistema, garantindo maior organização do código e melhor desempenho da aplicação.

A Listagem A.1 apresenta o código-fonte completo dos 2 módulos Transmissor/Receptor.

```
1  TCC - DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DE UM WEARABLE DE ACESSIBILIDADE AUDITIVA COM
       ESP32 E FREERTOS UTILIZANDO REDES DE PETRI
2   Autor: Willem Edmundo Felipe
3
4  C d i g o transmissor
5  #include <Arduino.h>
6  #include <WiFi.h>
7  #include <esp_now.h>
8  #include <esp_wifi.h>
9
10 // MAC do receptor
11 uint8_t receiverMAC[] = {0x0C, 0x8B, 0x95, 0x71, 0xB7, 0x74};
12
13 // estrutura da mensagem
14 typedef struct {
15   char comando; // 'A' ou 'C'
16 } msg_t;
17
18 msg_t msg;
19
20 // callback de envio
21 void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
22   Serial.print("Envio: ");
23   Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "SUCESSO" : "FALHA");
24 }
25
26 // tarefa que l   serial e envia comandos (FreeRTOS)
27 void TaskSerialReader(void *pvParameters) {
```

```
28    (void) pvParameters;
29    for (;;) {
30      if (Serial.available()) {
31        char c = Serial.read();
32        if (c == 'A' || c == 'a' || c == 'C' || c == 'c') {
33          msg.comando = (char)toupper(c);
34          esp_err_t res = esp_now_send(receiverMAC, (uint8_t*)&msg, sizeof(msg));
35          if (res == ESP_OK) {
36            Serial.print("Enviado comando: ");
37            Serial.println(msg.comando);
38          } else {
39            Serial.print("Erro esp_now_send(): ");
40            Serial.println((int)res);
41          }
42        }
43      }
44      vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(50));
45    }
46  }
47
48  void setup() {
49    Serial.begin(115200);
50    delay(100);
51
52    // inicializa WiFi em modo STA (necess rio para ESP-NOW)
53    WiFi.mode(WIFI_STA);
54
55    // inicializa ESP-NOW
56    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
57      Serial.println("Erro ao iniciar ESP-NOW");
58      while (true) { vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(1000)); }
59    }
60
61    // registra callback de envio
62    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);
63
64    // adiciona peer (receptor)
65    esp_now_peer_info_t peerInfo = {};
66    memcpy(peerInfo.peer_addr, receiverMAC, 6);
67    peerInfo.channel = 0;     // 0 = default; se quiser usar outro canal, configure
68    peerInfo.encrypt = false;
69
70    if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
71      Serial.println("Falha ao adicionar peer");
72      // n o trava; pode ser que o peer exista
73    }
74
75    Serial.println("Transmissor pronto. Digite 'A' (alarme) ou 'C' (campainha) no
        Serial.");
76    // Cria task que l   a serial
77    xTaskCreatePinnedToCore(TaskSerialReader, "SerialReader", 2048, NULL, 1, NULL, 1);
78  }
79
80  void loop() {
81  }
82
83  C digo receptor
```

```
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131 void onReceive(const uint8_t *mac, const uint8_t *incomingData, int len)  {
132   memcpy(&msg, incomingData, sizeof(msg));
133   ultimoComando = msg.comando;
134
135   Serial.print("Comando recebido: ");
136   Serial.println(ultimoComando);
137 }
138
139 void setup() {
140   Serial.begin(115200);
```

```
141
142   WiFi.mode(WIFI_STA);
143   if (esp_now_init() != ESP_OK) {
144     Serial.println("Erro ao iniciar ESP-NOW");
145     return;
146   }
147
148   esp_now_register_recv_cb(onReceive);
149
150   // Cria a task do motor
151   xTaskCreate(TaskMotor, "TaskMotor", 4096, NULL, 1, NULL);
152 }
153
154 void loop() {
155   vTaskDelay(1000 / portTICK_PERIOD_MS);
156 }
```

Listing A.1 – Código-fonte completo do módulo transmissor ESP32