

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - HABILITAÇÃO EM
SISTEMAS ELETRÔNICOS

JOÃO VICTOR LIMA FERRAREZI

ANÁLISE DE UMA REDE ESP WIFI MESH PARA UTILIZAÇÃO EM
INSTITUIÇÕES DE LONGA PERMANÊNCIA PARA IDOSOS

Juiz de Fora
2025

JOÃO VICTOR LIMA FERRAREZI

**ANÁLISE DE UMA REDE ESP WIFI MESH PARA UTILIZAÇÃO EM
INSTITUIÇÕES DE LONGA PERMANÊNCIA PARA IDOSOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade em Engenharia da Universidade
Federal de Juiz de Fora como requisito parcial
à obtenção do título de Engenheiro Eletricista
com ênfase em Sistemas Eletrônicos.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Rodrigues Manso

Juiz de Fora
2025

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

FERRAREZI, JOÃO VICTOR LIMA.

ANÁLISE DE UMA REDE ESP WIFI MESH PARA UTILIZAÇÃO
EM INSTITUIÇÕES DE LONGA PERMANÊNCIA PARA IDOSOS /
JOÃO VICTOR LIMA FERRAREZI. – 2025.

49 f. : il.

Orientador: Leandro Rodrigues Manso

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – Universidade Federal de
Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA - HABILITAÇÃO EM SISTEMAS ELETRÔNICOS, 2025.

1. ESP32. 2. Rede Mesh. 3. Internet das coisas. I. Silva, Leandro
Rodrigues Manso, II. Prof. Dr.

JOÃO VICTOR LIMA FERRAREZI

**ANÁLISE DE UMA REDE ESP WIFI MESH PARA UTILIZAÇÃO EM
INSTITUIÇÕES DE LONGA PERMANÊNCIA PARA IDOSOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade em Engenharia da Universidade
Federal de Juiz de Fora como requisito parcial
à obtenção do título de Engenheiro Eletricista
com ênfase em Sistemas Eletrônicos.

Aprovado em 20 de março de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leandro Rodrigues Manso Silva - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Álvaro Augusto Machado de Medeiros
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Fernando José de Almeida Andrade
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico o presente trabalho à minha mãe, Ana Paula, ao meu pai, Paulino, à minha irmã, Laiza e aos meus avós. Agradeço pelo amor, compreensão e apoio!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por me abençoar e permitir que coisas maravilhoas aconteçam em minha vida.

À minha família em geral, minha base, meus amores, meu tudo. Em especial, à minha mãe, minha melhor amiga e maior inspiração. Ao meu pai, meu exemplo, amigo mais fiel e porto seguro. E à minha irmã, a pessoa que faltava para minha vida ser perfeita. Sem o apoio, os conselhos e a força de vocês, nada disso seria possível.

Ao meu orientador, Leandro Manso, que me guiou e auxiliou com sabedoria e comprometimento, não só nesta, mas também em outras etapas desta jornada acadêmica.

Ao PET Elétrica, que foi uma parte essencial da minha trajetória, proporcionando experiências enriquecedoras, aprendizado além da sala de aula e momentos inesquecíveis.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

O presente trabalho apresenta de forma detalhada e didática a escolha, desenvolvimento e implementação de uma rede MESH baseada na tecnologia WI-FI, aplicada em Instituições de Longa Permanência para Idosos (ILPIs). Este projeto visa garantir melhorias na comunicação, facilidades para os funcionários, residentes e familiares, além de uma eficiente captação de informações referentes ao dia a dia da clínica, que posteriormente poderão servir de base para tomadas de decisão, dinâmicas de trabalho e até mesmo redução de custos operacionais.

São abordados diversos aspectos como um breve estudo das tecnologias disponíveis, detalhamento do hardware escolhido, o microcontrolador ESP-32, já embarcado com a tecnologia WI-FI e fabricado pela empresa Espressif, responsável também pelo framework oficial para o desenvolvimento (ESP-IDF). Explicações dos algoritmos desenvolvidos e suas relações com a área da Internet das Coisas (IoT), a prototipagem de um microsistema que simula a rede, além da realização de diversas análises de confiabilidade, atualização, alcance, viabilidade de implementação e comparação com outras redes e tecnologias.

Os resultados demonstram que a rede MESH utilizando o hardware ESP-32 é extremamente útil, simples e aplicável não só em ambientes como clínicas, mas também em diversas outras áreas e ambientes que necessitam de comunicação dinâmica, obtenção de informações e que não dispõem de grandes investimentos iniciais.

Palavras-chave: ESP32. ESPRESSIF. Internet das Coisas. Rede Mesh.

ABSTRACT

This work presents a detailed and didactic description of the selection, development, and implementation of a MESH network based on WI-FI technology, applied in an ILPI. This project aims to ensure improvements in communication, facilitate the work of staff and benefit patients, and efficiently capture information related to the day-to-day operations of the hospital or clinic, which can subsequently serve as a basis for decision-making, work dynamics, and even cost reduction.

Various aspects will be addressed, including a brief study of the available technologies, detailed description of the chosen hardware, the ESP-32 microcontroller, already equipped with WI-FI technology and manufactured by Espressif, which is also responsible for the official development framework (ESP-IDF). Explanations of the developed algorithms and their intimate relationships with the Internet of Things (IoT) field, prototyping of a micro-system that simulates the network, and various analyses such as reliability, usability, range, implementation feasibility, and comparisons with other networks and technologies will also be covered.

The results demonstrate that the MESH network using the ESP-32 hardware is extremely useful, simple, and applicable not only in clinics but also in various other areas and settings that require dynamic communication, information capture, and do not have large initial investments.

Keywords: ESP32. ESPRESSIF. Internet of Things. Mesh Network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ponto a ponto	16
Figura 2 – Barramento	16
Figura 3 – Anel	17
Figura 4 – Estrela	17
Figura 5 – Mesh	18
Figura 6 – DA16200	21
Figura 7 – Raspberry Pi Pico W	22
Figura 8 – ESP-8266	22
Figura 9 – ESP-32	22
Figura 10 – Representação da estrutura da rede ESP-WIFI-MESH	26
Figura 11 – Representação Auto-organização	26
Figura 12 – Exemplo de eleição do nó raiz	27
Figura 13 – Auto-recuperação de falha do nó raiz	28
Figura 14 – Auto-recuperação de falha do nó pai intermediário	28
Figura 15 – Versões ESP32	29
Figura 16 – Página principal da aplicação	35
Figura 17 – Configuração de Rede	36
Figura 18 – Informações da Rede Mesh	37
Figura 19 – Mais aplicações	38
Figura 20 – Local fechado de teste	40
Figura 21 – Monitor na inicialização da rede	42
Figura 22 – Monitor na adição de um nó próximo	43
Figura 23 – Monitor na adição de um novo nó distante	43
Figura 24 – Monitor na remoção de um nó pai na segunda camada	44
Figura 25 – Monitor na adição de um dispositivo igualmente espaçado entre os nós	44
Figura 26 – Monitor na eleição de um novo nó raiz	45
Figura 27 – Modificações na estrutura da Rede Mesh de acordo com os cenários de teste	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo Topologias de Rede	19
Tabela 2 – Tabela de Arquiteruras Mesh	20
Tabela 3 – Tabela de Comparação dos SoCs	23
Tabela 4 – Tabela de Comparação das versões do ESP32	29
Tabela 5 – Funções principais para implementação	31
Tabela 6 – Principais arquivos de código-fonte	39
Tabela 7 – Resultados local aberto	41
Tabela 8 – Resultados local fechado	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPU	Central Processing Unit
dBm	Decibel Miliwatt
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GPIO	General Purpose Input/Output
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
IDE	Integrated Development Environment
ILPI	Instituições de Longa Permanência para Idosos
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
LoRa	Long Range
NVS	Non-Volatile Storage
OTA	Over-The-Air
PCB	Printer Circuit Board
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
Socs	System-on-Chips
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa do Trabalho	12
1.2	Objetivo	12
1.3	Estrutura do Trabalho	13
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
2.1	Tecnologias de Comunicação Sem Fio	14
2.1.1	Redes de Curta Distância	14
2.1.1.1	WPAN	14
2.1.1.2	WLAN	14
2.1.2	Redes de Longo Alcance	14
2.1.2.1	Rede LoRa	15
2.1.2.2	Rede 5G	15
2.2	Topologias de Rede	16
2.2.1	Ponto a ponto	16
2.2.2	Barramento	16
2.2.3	Anel	17
2.2.4	Estrela	17
2.2.5	Mesh	18
2.2.5.1	Arquitetura de uma Rede Mesh	19
2.2.5.2	Algumas aplicações da Rede Mesh	20
2.3	Hardwares	21
2.4	Atualização OTA	23
2.5	ESP-IDF	24
2.5.1	Protocolo ESP-WIFI-MESH	24
2.5.1.1	Estrutura da rede ESP-WIFI-MESH	25
2.5.1.2	Auto-organização	26
2.5.1.3	Auto-recuperação	27
3	DESENVOLVIMENTO	29
3.1	Implementação da Rede ESP-WIFI-MESH	30
3.1.1	Implementação básica	30
3.1.2	Aperfeiçoamento da aplicação	34
4	RESULTADOS	40
4.1	Alcance	40
4.2	Funcionalidades da Rede Mesh	41
4.3	Resultados do ponto de vista das ILPIs	45
5	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

O significativo aumento da população idosa, aliado às mudanças nas estruturas familiares e às dificuldades em garantir cuidados especializados em casa, tem levado muitas famílias a optarem pelas Instituições de Longa Permanência para Idosos (ILPIs) (FABRÍCIO; SARAIVA; FEITOSA, 2018). Nesse cenário, surgem novas necessidades de modernização e aprimoramento das formas de acompanhamento e comunicação entre todos os envolvidos: familiares, profissionais de saúde e a gestão da instituição. Em particular, a tecnologia surge como uma aliada fundamental para resolver os desafios de interação e monitoramento.

Quando se trata de comunicação e tecnologia, as soluções possíveis são diversas, mas este trabalho propõe a adoção de soluções que se caracterizem por baixo custo, fácil implementação, manutenção simples e integração com a Internet das Coisas (IoT). Este foco permitirá otimizar a gestão das ILPIs, melhorar a qualidade de vida dos idosos e facilitar o acompanhamento por parte dos familiares.

A primeira camada de comunicação abordada é a interação entre o idoso e o cuidador. Nas ILPIs, não é comum a designação de um cuidador exclusivo para cada idoso. E de acordo com a Resolução (nº 502, de 27 de maio de 2021) e na situação do idoso com maior grau de dependência, para cada 6 idosos se faz necessário um cuidador. Nesse contexto, a comunicação ativa, confiável e com diferentes formas de “chamada”, queda, pressão de um botão, comando de voz, dentre outros, se torna crucial para garantir o bem-estar dos idosos.

A segunda camada de comunicação envolve a integração de sensores vitais, que possibilitam o acompanhamento remoto da saúde do idoso pelos familiares. Esses sensores permitirão a coleta de dados, promovendo aos familiares uma sensação de proximidade e segurança, mesmo à distância.

Por fim, a camada de gestão analisa o uso dos dados acumulados para otimizar rotinas, criar relatórios detalhados e, assim, possibilitar uma redução nos custos operacionais, ao mesmo tempo em que melhora o cuidado prestado aos residentes. A análise de dados pode ser uma ferramenta poderosa para uma gestão mais eficiente e humanizada das ILPIs.

Este trabalho, portanto, propõe explorar como essas camadas de comunicação e monitoramento tecnológico podem ser implementadas de maneira acessível e eficaz, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida dos idosos e a otimização dos processos administrativos nas ILPIs.

1.1 Justificativa do Trabalho

A implementação de uma rede mesh utilizando microcontroladores ESP32 para comunicação interna e integrada a sistemas IoT em Instituições de Longa Permanência para Idosos (ILPIs) é uma solução inovadora e com grandes ganhos. Diversos fatores que vão das melhorias na qualidade do atendimento até a eficiência operacional da instituição, justificam o trabalho.

Pontos importantes que corroboram com a justificativa e a escolha do sistema são:

- O monitoramento constante dos residentes garante sua saúde e bem-estar. A integração a dispositivos IoT permite a coleta em tempo real de dados vitais. Deste modo, essa abordagem possibilita a detecção precoce de alterações na saúde dos idosos, permitindo intervenções mais rápidas e reduzindo riscos de complicações.
- A tecnologia mesh, implementada com microcontroladores ESP32, oferece uma infraestrutura de rede robusta e escalável, diferentemente de outras topologias, nas quais a falha de um único ponto pode comprometer toda a comunicação. Isso assegura que, mesmo em caso de falha de um dispositivo, a rede continue operando eficientemente, garantindo a continuidade dos serviços essenciais.
- Outro ponto fundamental é o baixo custo e a versatilidade do ESP32, tornando-o ideal para projetos de IoT em larga escala. Sua capacidade de conectividade Wi-Fi e Bluetooth facilita a integração com diversos sensores e dispositivos. Além disso, a economia gerada pela redução de cabos e infraestrutura física torna o projeto financeiramente atrativo.
- A utilização da rede mesh aprimora a comunicação entre a equipe da ILPI, permitindo a troca rápida de informações. Alertas e notificações podem ser enviados em tempo real, agilizando a tomada de decisões e a coordenação das atividades diárias. Dessa forma, a eficiência operacional reflete um atendimento mais ágil e com maior qualidade para os residentes.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar uma rede Wi-Fi Mesh utilizando microcontroladores da família ESP32, melhorando a comunicação e a gestão de informações em uma clínica de longa permanência para idosos. O projeto consiste em criar uma infraestrutura robusta e escalável que permita a transmissão eficiente de dados em tempo real, facilitando o monitoramento de saúde, a gestão de recursos e a integração entre dispositivos.

O estudo busca avaliar a viabilidade técnica da solução, detalhando sua implementação e performance em termos de cobertura e estabilidade. Além disso, são analisadas

possíveis melhorias, considerando aspectos como atualizações e integração com outras tecnologias IoT.

Em resumo, este trabalho propõe uma solução tecnológica que não apenas moderniza a infraestrutura de comunicação das ILPIs, mas também eleva a qualidade do cuidado oferecido aos residentes. A combinação da rede mesh com o ESP32 e sistemas IoT representa um avanço significativo no desenvolvimento de um ambiente mais tecnológico, eficiente e centrado no bem-estar dos idosos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado e desenvolvido em 5 capítulos distintos, cada um tratando aspectos fundamentais ao tema. A seguir, serão apresentadas breves descrições sobre o conteúdo abordado em cada capítulo, fornecendo assim uma visão geral da organização e do desenvolvimento do trabalho.

- Capítulo 1 - Introdução e justificativa do trabalho: apresenta argumentos que demonstram a importância e relevância do tema.
- Capítulo 2 - Fundamentação Teórica e revisão bibliográfica: conceitos fundamentais dos protocolos de comunicação, com destaque especial para o Wi-Fi. Além disso, são abordados os principais conceitos sobre redes de comunicação, incluindo suas arquiteturas, modos de operação e aplicações em diversos cenários.
- Capítulo 3 - A implementação de uma rede mesh: aplica a teoria apresentada em capítulos anteriores do trabalho, demonstrando sua implementação.
- Capítulo 4 - Resultados: análise dos resultados obtidos na aplicação prática do capítulo anterior.
- Capítulo 5 - Conclusão: Discussões sobre possíveis melhorias e um resumo dos principais resultados obtidos das análises dos capítulos anteriores.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Tecnologias de Comunicação Sem Fio

As tecnologias de comunicação sem fio utilizam ondas eletromagnéticas para a transmissão de dados. As principais diferenças entre essas tecnologias está na cobertura e na forma de modulação do sinal, que pode ocorrer por variação de amplitude, frequência ou fase (DIAS; SADOK, 2001). Essas redes sem fio são amplamente empregadas em diversas aplicações, desde comunicações pessoais até infraestruturas industriais e hospitalares.

2.1.1 Redes de Curta Distância

As redes sem fio de curta distância são utilizadas principalmente para conectar dispositivos em pequenos ambientes. Dentre as mais conhecidas, estão as redes WPAN (Wireless Personal Area Network) e WLAN (Wireless Local Area Network).

2.1.1.1 WPAN

As redes WPAN (Wireless Personal Area Network) são caracterizadas por um alcance reduzido e baixo consumo de energia. Definidas pelo padrão IEEE 802.15, essas redes são projetadas para operar em curtas distâncias, geralmente até 10 metros, e podem alcançar velocidades até 1 Mbps (SOOMRO; CAVALCANTI, 2007). O Bluetooth é um dos principais exemplos de tecnologia WPAN, sendo amplamente utilizado para comunicação entre dispositivos móveis, wearables e sensores IoT.

2.1.1.2 WLAN

As redes WLAN (Wireless Local Area Network) são definidas pelo padrão IEEE 802.11. Com um alcance típico de até 70 metros em ambientes internos e 250 metros em espaços abertos, essas redes podem atingir velocidades de transmissão de até 600 Mbps (SOOMRO; CAVALCANTI, 2007). As WLANs são utilizadas em diversos ambientes, como residências, escritórios, escolas e hospitais, proporcionando conectividade de alta velocidade sem a necessidade de cabos físicos.

2.1.2 Redes de Longo Alcance

Para aplicações que exigem maior cobertura, tecnologias de redes sem fio de longo alcance são essenciais. Entre as principais, as mais conhecida são as redes LoRa e 5G (CARDOSO et al., 2022).

2.1.2.1 Rede LoRa

A tecnologia LoRa (Long Range), desenvolvida pela empresa francesa Semtech, é amplamente utilizada em aplicações de Internet das Coisas (IoT). Essa tecnologia opera utilizando a modulação de espectro espalhado por chirp (Chirp Spread Spectrum - CSS), permitindo a transmissão de dados em longas distâncias, mesmo em ambientes com obstáculos físicos (RUDIGER, 2021).

As principais vantagens, segundo Jebril et al. (2018), da rede LoRa incluem:

- Baixo consumo de energia: Permite que dispositivos conectados operem por anos com uma única bateria.
- Uso de frequências não licenciadas: Reduz os custos de implementação, pois não há necessidade de pagar taxas de espectro.
- Alta cobertura: Superior a redes Wi-Fi, possibilitando comunicação entre dispositivos IoT distribuídos.

No entanto, a tecnologia LoRa, também segundo Jebril et al. (2018), apresenta algumas limitações:

- Baixa taxa de transmissão de dados: Quando comparada ao Wi-Fi e 5G, a LoRa não é indicada para aplicações que exigem alta velocidade de comunicação.
- Custo elevado em larga escala: Apesar de econômica para pequenos projetos, sua implementação pode se tornar cara em aplicações de grande porte.

2.1.2.2 Rede 5G

A tecnologia 5G, introduzida em 2018, representa a quinta geração das redes móveis. Com o avanço da IoT, houve um aumento significativo na demanda por dispositivos conectados, desde aplicações domésticas até industriais, tornando a rede 5G essencial para suportar essas conexões (SPADINGER, 2024).

Os principais benefícios da rede 5G, segundo Do et al. (2020), incluem:

- Alta velocidade de transmissão: Pode atingir até 10 Gbps, tornando-a dez vezes mais rápida que as redes 4G.
- Baixa latência: Enquanto as redes 4G apresentam latências de aproximadamente 200 milissegundos, o 5G propõe reduzir esse tempo para apenas 1 milissegundo, permitindo comunicação quase instantânea.
- Maior capacidade de dispositivos conectados: Suporta um grande número de dispositivos simultaneamente, essencial para ambientes urbanos e industriais.

Embora a tecnologia 5G ofereça ótimas vantagens, sua implementação enfrenta desafios como o alto custo de infraestrutura (SPADINGER, 2024).

2.2 Topologias de Rede

Nesta seção, é realizada uma breve comparação entre as principais topologias de rede, abordando as diferentes formas de organização física e lógica dos dispositivos dentro de uma rede. São analisadas também as diferentes funções que cada componente pode desempenhar, considerando suas características e aplicações específicas.

2.2.1 Ponto a ponto



Figura 1 – Ponto a ponto

Nesta configuração, apresentada na Figura 1, dois dispositivos são conectados diretamente, estabelecendo um link exclusivo de comunicação (KUROSE; ROSS, 2012). É a forma mais simples de conexão, adequada para redes pequenas ou comunicação direta entre dois sistemas. Sua simplicidade facilita a implementação, mas não é escalável para redes maiores.

2.2.2 Barramento

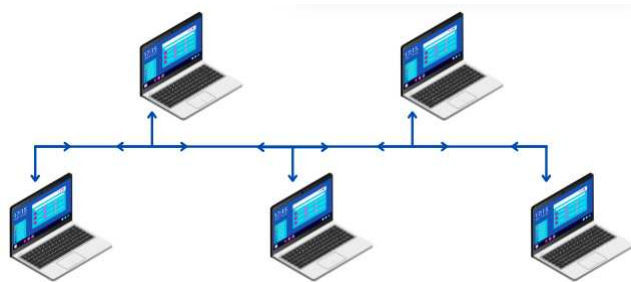


Figura 2 – Barramento

Como ilustrado na Figura 2, os dispositivos são conectados a um único cabo central, conhecido como barramento. Os dados transmitidos por um dispositivo são compartilhados por todo o barramento e podem ser recebidos por todos os outros dispositivos (KUROSE; ROSS, 2012). Embora seja fácil de implementar e necessite de menos cabos, existem algumas desvantagens, como colisões de dados e comprometimento de toda a rede caso aconteça algo com o barramento.

2.2.3 Anel

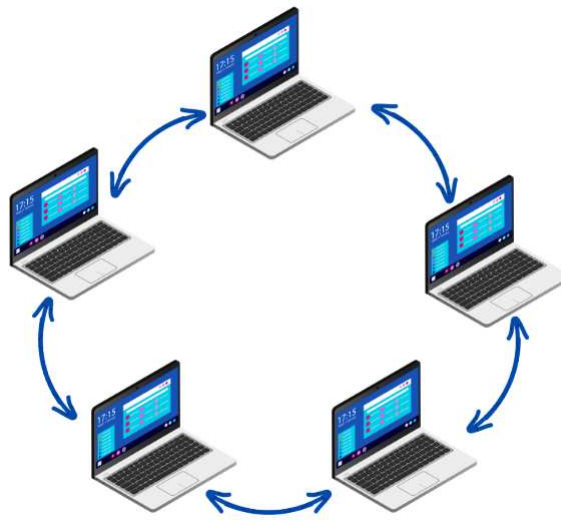


Figura 3 – Anel

Os dispositivos são conectados em uma formação circular, como pode ser observado na Figura 3, onde cada dispositivo está ligado ao próximo, formando um tipo de anel (KUROSE; ROSS, 2012). Os dados circulam em uma direção específica (unidirecional ou bidirecional). Essa topologia pode evitar colisões de dados, mas qualquer problema em um único dispositivo ou na conexão pode interromper toda a rede.

2.2.4 Estrela

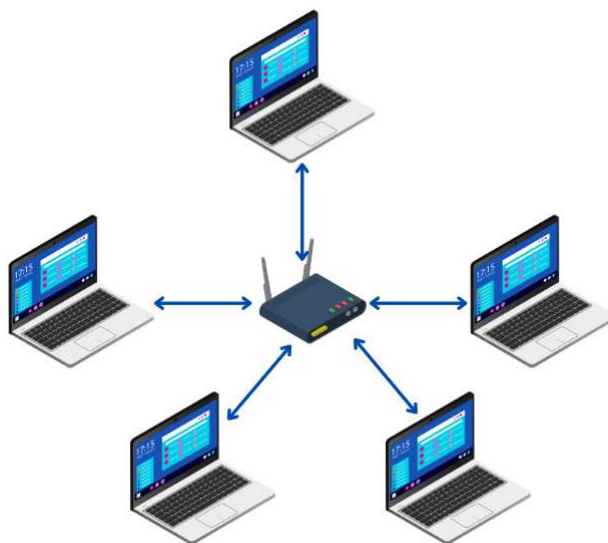


Figura 4 – Estrela

Mostrada na Figura 4, essa é a topologia mais comum na atualidade (ALENCAR, 2016), onde todos os dispositivos são conectados a um dispositivo central, como um switch ou roteador. Este dispositivo por sua vez gerencia e controla todo o tráfego da rede. Essa topologia facilita a detecção de falhas e a adição ou remoção de novos dispositivos, mas é extremamente dependente do dispositivo central, que caso apresente alguma falha, afeta toda a rede.

2.2.5 Mesh

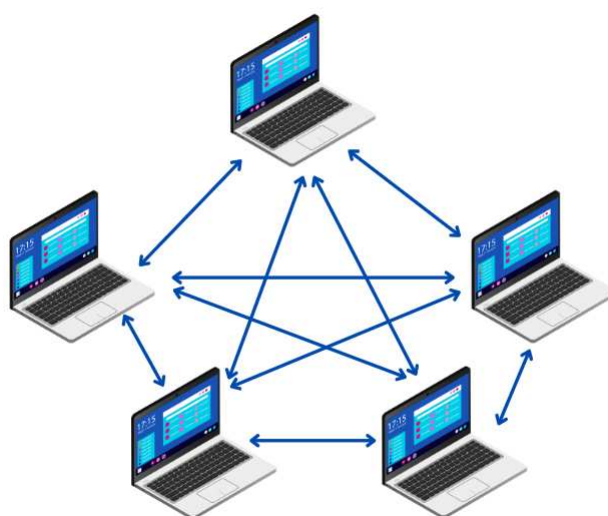


Figura 5 – Mesh

Finalmente chegamos a topologia base do projeto, apresentada na Figura 5, que consiste em cada dispositivo conectado a vários outros, criando assim múltiplos caminhos para os dados. Estrutura que proporciona uma enorme redundância e robustez, que em casos de falhas de conexão garante que os dados possam continuar por outros caminhos (SECCO, 2019). É uma topologia extremamente confiável, que no geral apresenta como desvantagem a possível complexidade de implementação, que por sua vez tem sido cada vez mais facilitada com a popularização da topologia/tecnologia.

A Tabela 1 a seguir apresenta de forma resumida as principais vantagens, desvantagens e aplicações de cada topologia apresentada anteriormente.

Tabela 1 – Comparativo Topologias de Rede

Topologia	Vantagens	Desvantagens	Aplicação
Ponto a ponto	Simplicidade na configuração e baixo custo	Não escalável e limitada aos dois pontos	Compartilhamento de arquivos diretamente entre computadores sem a necessidade de um servidor central.
Barramento	Fácil de implementar e requer poucos cabos	Colisões de dados e falha no cabo principal compromete toda rede	Sistemas de comunicação em veículos.
Anel	Pouca ocorrência de colisões	Falha em um dispositivo afeta toda a rede e dificuldade em adicionar ou remover dispositivos	Amplamente utilizada em redes industriais
Estrela	Fácil de gerenciar e detectar falhas e a adição ou remoção de dispositivos não afeta a rede	Dependência do dispositivo central	Configuração típica das redes locais.
Mesh	Alta redundância, tolerância a falhas e roteamento dinâmico de dados	Pode ser difícil de configurar e pode apresentar latência entre nós distantes	Sistemas de automação residencial que utilizam dispositivos IoT.

2.2.5.1 Arquitetura de uma Rede Mesh

Para uma melhor compreensão das possibilidades e vantagens da utilização de uma rede Mesh Wi-Fi, é importante entender a definição de cada dispositivo, o papel que desempenham dentro da rede e as possíveis rotinas adotadas para diferentes situações.

Cada dispositivo em uma rede mesh é tratado como nó e por sua vez, cada nó atua simultaneamente como roteador e ponto de acesso. Eles se comunicam entre si para transmitir dados, permitindo que o sinal seja propagado por toda a rede. Essa comunicação inter-nós é fundamental para a robustez e eficiência da rede (BAUER, 2012). Sendo assim, como cada nó pode ter as duas atuações além ainda de dispositivos que apenas acessam os serviços e recursos (nó cliente), obtemos as possíveis arquiteturas combinando essas funcionalidades (BASUMALLICK, 2022):

- Full Mesh: Todos os nós da rede estão diretamente conectados entre si. Isso significa que cada nó pode se comunicar com qualquer outro nó sem nós intermediários.
- Partial Mesh: Aqui, apenas alguns nós estão diretamente conectados entre si, enquanto outros dependem de nós intermediários para a comunicação.
- Híbrida: Nessa arquitetura, observamos um sistema de comunicações com e sem

fio que combina dois tipos diferentes de nós. O nó mesh híbrido que cobre uma área usando uma interface com fio, enquanto demais nós se comunicam por meio da interface sem fio.

- Hierárquica: Aqui, os nós são organizados em níveis hierárquicos, onde existem os nós principais (gateways ou nós centrais) que coordenam a comunicação entre os demais nós “menores”, da rede.

Além das diferentes formas de estruturação, as redes mesh possuem rotinas fundamentais e extremamente úteis para seu funcionamento. A auto-configuração permite que os dispositivos se detectem e se configurem automaticamente, facilitando a instalação e expansão da rede. Já a auto-recuperação reconfigura as rotas de dados em caso de falhas, garantindo a continuidade da transmissão.

A Tabela 2 abaixo apresenta resumidamente as principais vantagens, desvantagens e aplicações para cada arquitetura de uma Rede Mesh.

Tabela 2 – Tabela de Arquiteruras Mesh

Arquitetura	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Full Mesh	Alta confiabilidade, redundância, baixa latência e melhor distribuição de carga.	Maior consumo de energia e processamento	Redes industriais e ambientes críticos.
Partial Mesh	Bom custo-benefício, redução da complexidade e boa redundância.	Pode ter maior latência.	Escritórios e pequenas empresas.
Híbrida	Menos sobrecarga para os clientes, boa eficiência na transmissão e facilidade de expansão.	Pode ter pontos de falha centralizados.	Casas inteligentes
Hierárquica	Melhor escalabilidade e pode integrar diferentes tecnologias	Pode ser difícil de configurar	Cidades inteligentes, IoT e redes de longa escala

2.2.5.2 Algumas aplicações da Rede Mesh

Além da aplicação proposta em Instituições de Longa Permanência para Idosos (ILPIs), a tecnologia de rede Mesh se destaca e se aplica em diversos outros cenários, proporcionando conectividade estável, abrangente e confiável. Seu uso se justifica tanto em situações especiais quanto no cotidiano, garantindo comunicação eficiente mesmo em ambientes desafiadores.

- Em cenários militares, as redes mesh são empregadas para estabelecer comunicações seguras em áreas de conflito (SOUZA, 2015). Sua capacidade de auto-recuperação e adaptação a mudanças no ambiente as torna ideais para operações táticas, garantindo que as unidades mantenham comunicação mesmo em condições hostis.
- Nas Cidades Inteligentes as redes mesh são utilizadas para interconectar dispositivos IoT em áreas urbanas, auxiliando na gestão de semáforos, iluminação pública, sistemas de vigilância e em outros serviços municipais (ANTUNES, 2012).
- Nos ambientes domésticos e corporativos as redes mesh estão cada vez mais populares, melhorando, principalmente, a cobertura do Wi-Fi, garantindo uma conexão estável em todas as áreas.

2.3 Hardwares

Para implementar uma rede Mesh Wi-Fi de baixo custo, é necessário conhecer e escolher SoCs (*System on Chip*) que sejam acessíveis, apresentem bom desempenho e suportem as funcionalidades necessárias para redes Mesh, como por exemplo protocolos de roteamento dinâmico e múltiplas interfaces de rede, para que os dispositivos sirvam tanto como roteadores como pontos de acesso. Sendo assim, seguem algumas opções mais comuns existentes no mercado.

- DA16200: Apesar de ser mais caro que os demais SoCs que serão listados, o DA16200, desenvolvido pela *Dialog Semiconductor*, é um SoC projetado para aplicações que exigem conectividade Wi-Fi, mas com consumo de energia extremamente baixo, permitindo assim que os dispositivos funcionem por longos períodos com baterias de pequena capacidade (DA16200-THREADX-EVALUATION-KIT, 2022). Abaixo podemos ver uma board produzida pela SparkFun que utiliza o SoC DA16200.

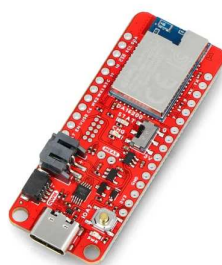


Figura 6 – DA16200

- Raspberry Pi Pico W: É uma versão extremamente nova, mostrada na Figura 7, lançada em 2024, evolução do Raspberry Pi Pico que adiciona a ele a conectividade Wi-Fi (PICO-SERIES, 2024), facilitando o desenvolvimento de projetos ligados a

IoT e dispositivos inteligentes. Apesar de ser um hardware recentemente lançado, já se apresenta como uma boa opção para diversos projetos.



Figura 7 – Raspberry Pi Pico W

- ESP8266: Desenvolvido pela *Espressif Systems*, é um microcontrolador de 32 bits com conectividade Wi-Fi integrada (ESP8266-SERIES, 2020), amplamente utilizado em diversos projetos devido ao seu baixo custo e versatilidade. Essa ampla utilização cria uma enorme comunidade que se apoia e possibilita o surgimento de grandes projetos. A Figura 8 mostra o ESP-8266 em um dos seus layouts mais comuns.

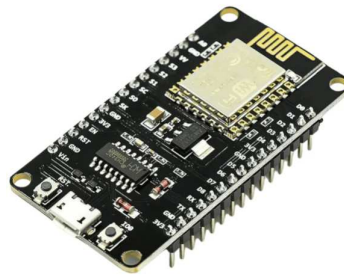


Figura 8 – ESP-8266

- ESP32: Também desenvolvido pela Espressif Systems, é uma evolução do ESP8266 e carrega uma ligeira semelhança física, como pode ser visto na Figura 9. Oferece processador *dual-core*, suporte a Wi-Fi e Bluetooth, além de maior capacidade de memória, funcionalidades adicionais (ESP32-SERIES, 2025) e custos extremamente competitivos. Assim como o irmão mais velho, tem uma enorme comunidade que se apoia e desenvolve projetos extremamente robustos e aplicados em diversas situações.



Figura 9 – ESP-32

Agora que os SoCs foram apresentados de forma geral, a Tabela 3 apresenta as principais especificações técnicas de cada dispositivo.

Tabela 3 – Tabela de Comparação dos SoCs

Informação	DA16200	Rasp. Pi Pico W	ESP8266	ESP32
Núcleo	ARM Cortex-M4F	Dual-core ARM Cortex-M0+	Tensilica Xtensa LX106	Dual-core Tensilica Xtensa LX6
Frequência de Clock	160 MHz	Até 133 MHz	80/160 MHz	Até 240 MHz
Memória RAM	512 KB	264 KB	160 KB	520 KB
Memória Flash	8 MB	2 MB	Precisa de flash externa	Precisa de flash externa
GPIOs	14	26	Até 17	Até 36
Interfaces	SPI, I2C, UART, ADC	SPI, I2C, UART, ADC, PWM	SPI, I2C, UART, ADC	SPI, I2C, UART, ADC, DAC, PWM, CAN
Consumo de Energia	Ultra baixo	Moderado	Moderado a alto	Moderado a alto
Conectividade	Wi-Fi 2.4 GHz	Wi-Fi 2.4 GHz	Wi-Fi 2.4 GHz	Wi-Fi 2.4 GHz e Bluetooth

2.4 Atualização OTA

Quando se fala de projetos que envolvem múltiplos dispositivos, que é exatamente o caso de uma rede mesh, surge uma preocupação pertinente que é a atualização e configuração eficiente desses equipamentos. Realizar ajustes manuais em cada dispositivo é um processo moroso e em determinados casos impraticável. Sendo assim, é fundamental adotar um método que permita a atualização e configuração remota, o que garante uma manutenção simplificada do sistema.

Over-the-Air (OTA) é um método de “distribuição” digital que permite a atualização remota de software, configurações e outros dados em dispositivos eletrônicos, sem a necessidade de algum tipo de conexão física (SHAVIT; GRYC; MIUCIC, 2007). Essas atualizações são transmitidas por meio de redes sem fio, como Wi-Fi ou dados móveis, garantindo que os dispositivos estejam sempre atualizados com as melhorias e correções mais recentes.

O mecanismo OTA exige que o software e o hardware existentes no dispositivo de destino sejam compatíveis com o recurso. O novo *software* é transferido para o dispositivo, instalado e colocado em uso.

Além de atualizações de software, a tecnologia OTA é extremamente utilizada em projetos de Internet das Coisas (IoT) para gerenciamento remoto, configuração e

atualizações de dispositivos, permitindo que eles recebam novos *softwares*, *firmwares* ou configurações de forma eficiente e sem intervenção física (CORREIA, 2021).

2.5 ESP-IDF

O ESP-IDF (*Espressif IoT Development Framework*) é o *framework* oficial de desenvolvimento para os microcontroladores ESP32. Ele fornece um ambiente completo para programação, compilação e depuração de *firmware*. Permite o desenvolvimento eficiente e facilitado de diversas aplicações para os dispositivos (ESPRESSIF, 2023).

O *framework* inclui bibliotecas, APIs e ferramentas que auxiliam no desenvolvimento de aplicações embarcadas, oferecendo suporte a recursos essenciais como conectividade Wi-Fi, Bluetooth, diversos protocolos de comunicação, gerenciamento de energia, segurança e ainda conta com suporte para OTA (*Over-the-Air*), tratado na seção anterior.

É amplamente utilizado no desenvolvimento de projetos relacionados com automação residencial, dispositivos industriais, sensores inteligentes, sistemas de monitoramento remoto e projetos de redes mesh. Por ser compatível com o *FreeRTOS*, permite a criação de aplicações robustas e com alto desempenho.

A utilização do ESP-IDF (*Espressif IoT Development Framework*) é altamente recomendável para projetos que envolvem redes mesh. Sendo o *framework* oficial da Espressif recebe atualizações regulares, garantindo suporte contínuo e melhorias constantes. Além disso, o ESP-IDF inclui suporte nativo para ESP-WIFI-MESH, permitindo a implementação facilitada de redes mesh com recursos atualizados e uma ampla documentação.

Além do ESP-IDF a Espressif também oferece o ESP-MDF (*Espressif Mesh Development Framework*), um *framework* voltado para soluções mesh. No entanto, este *framework* tem recebido poucas atualizações nos últimos anos. Diversos usuários relataram a ausência de novas versões, levantando assim questões sobre a continuidade de seu desenvolvimento.

2.5.1 Protocolo ESP-WIFI-MESH

O ESP-WIFI-MESH é um protocolo de rede desenvolvido pela *Espressif Systems* que organiza dispositivos em uma topologia mesh utilizando a funcionalidade simultânea de ponto de acesso (modo AP) e estação (*station*) presente nos SoCs da Espressif. Essa estrutura permite que diversos dispositivos, chamados de nós, se conectem sob uma única rede local sem fio (WLAN), cobrindo amplas áreas físicas, tanto internas quanto externas, sem a necessidade de uma infraestrutura Wi-Fi específica.

Dentre as características fundamentais do ESP-WIFI-MESH estão os recursos de auto-configuração e auto-recuperação, já explicadas em seções anteriores, mas que no geral significa que a rede pode se configurar e manter autonomamente. Além disso, trata-se de

uma rede de múltiplos saltos (*multi-hop*), na qual os nós não só transmitem seus próprios pacotes, mas também funcionam como retransmissores para outros nós (ESPRESSIF, 2023). Isso garante que existindo um caminho na camada física entre dois nós, eles irão se comunicar, mesmo sem estarem diretamente conectados.

O ESP-WIFI-MESH é altamente escalável, suportando até 1000 nós em uma única rede (ESPRESSIF, 2023), o que o torna extremamente adequado para aplicações que exigem cobertura em larga escala, como automação residencial, cidades inteligentes e sistemas de monitoramento em geral. Além disso, ele pode ser utilizado para melhorar a abrangência do Wi-Fi em ambientes domésticos, garantindo uma cobertura de sinal mais uniforme.

2.5.1.1 Estrutura da rede ESP-WIFI-MESH

A ESP-WIFI-MESH adota a topologia mesh hierárquica, na qual cada nó se conecta diretamente aos seus vizinhos. Essa estrutura permite que a rede cubra áreas significativamente maiores, já que os dispositivos podem se comunicar mesmo sem estarem ao alcance direto de um ponto central. Além disso, essa configuração distribui a carga de comunicação entre os nós, reduzindo a possibilidade de sobrecarga que ocorre quando um único ponto central gerencia todas as conexões (ESPRESSIF, 2023).

Em uma rede ESP-WIFI-MESH, como pode ser visto na Figura 10, os nós desempenham diferentes funções para garantir a conectividade e eficiência da rede. Os principais tipos de nós são:

- *Nó Raiz (Root Node)*: Este nó está no topo da hierarquia da rede e atua como a ponte de comunicação entre a rede mesh e a rede local sem fio (WLAN). Ele é responsável por gerenciar o tráfego de dados entre os nós internos e dispositivos externos à rede mesh.
- *Nó Pai Intermediário (Intermediate Parent Node)*: São nós que possuem sub-redes conectadas a eles. Eles servem como intermediários, encaminhando dados entre seus nós filhos e o nó raiz, contribuindo para a estrutura hierárquica da rede.
- *Leaf Node*: Estes são os dispositivos finais ou periféricos na rede, localizados nas extremidades da topologia. Eles geralmente não possuem nós filhos e se comunicam principalmente com seu nó pai para transmitir e receber dados.
- *Idle Node*: São dispositivos que, por estarem fora do alcance do sinal ou devido à rede ter atingido o número máximo de camadas configuradas, não estão conectados à rede mesh ativa. Eles permanecem em espera até que possam se integrar à rede.

Cada tipo de nó desempenha um papel essencial na formação, manutenção e eficiência da rede ESP-WIFI-MESH, garantindo comunicação confiável e abrangente entre os dispositivos conectados (ESPRESSIF, 2023).

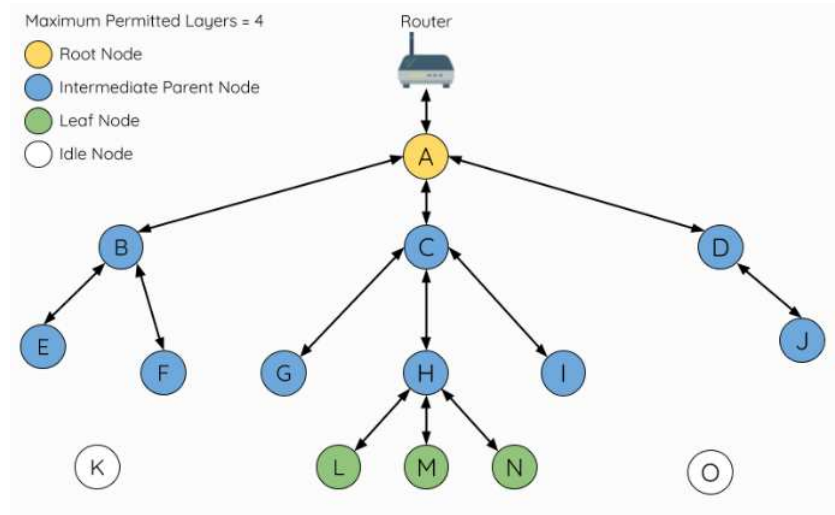


Figura 10 – Representação da estrutura da rede ESP-WIFI-MESH

2.5.1.2 Auto-organização

O ESP-WIFI-MESH por padrão, se auto-organiza, permitindo que cada nó “escolha” quem será o nó pai e o nó raiz de acordo com eleições baseadas na potência do sinal (RSSI) (MAIA, 2022). Essa “arrumação”, resumidamente apresentada na Figura 11, é dinâmica e os dispositivos se ajustam de acordo com a variação do sinal. A rede estando estruturada através da auto-organização, garante um menor número de camadas, que por sua vez necessita de cada vez menos processamento o que evita possíveis sobrecargas no sistema.

A auto-organização pode ser vista principalmente em duas situações, na seleção automática do nó raiz e na seleção do nó pai.

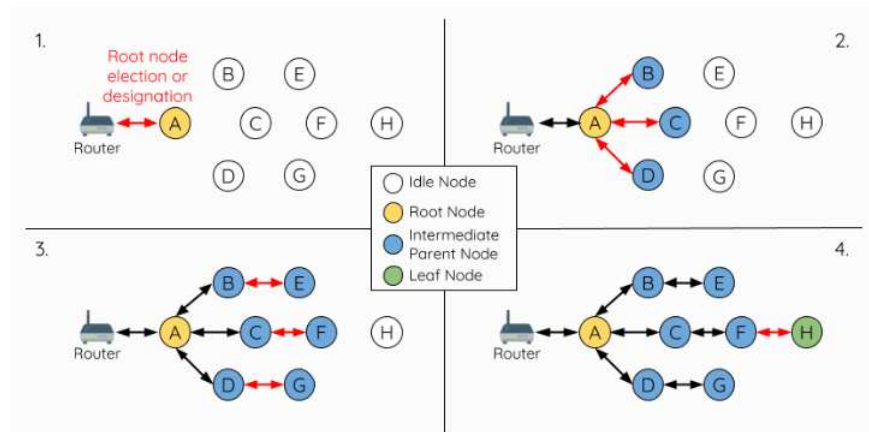


Figura 11 – Representação Auto-organização

- A seleção automática do nó raiz, mostrada na Figura 12, ocorre por meio de um

processo de eleição entre os nós ociosos, baseado na intensidade do sinal(RSSI). Cada nó transmite seu endereço MAC e o valor RSSI em relação ao roteador. Os nós monitoram simultaneamente os valores dos demais nós e ao detectarem um nó com RSSI superior, retransmitem essa informação, efetivamente votando no nó com sinal mais forte. Após um determinado número de iterações (10 por padrão), o nó que tiver uma porcentagem de votos acima de um limite estabelecido (90% por padrão) é eleito como o nó raiz(esp)

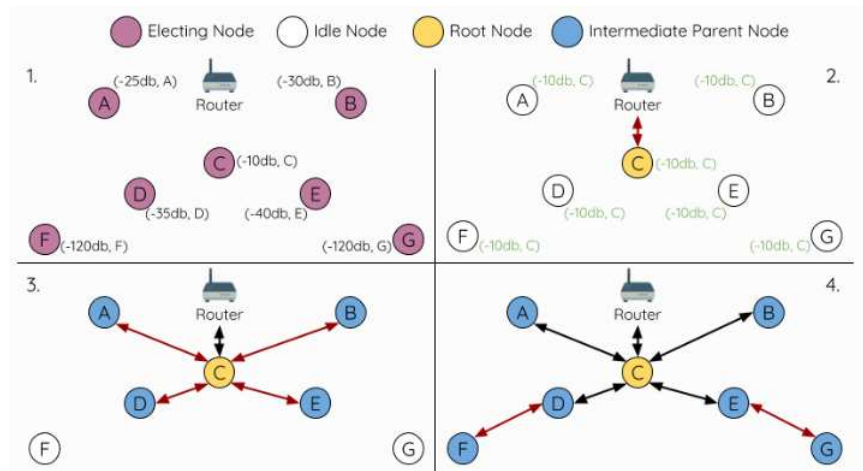


Figura 12 – Exemplo de eleição do nó raiz

- Cada nó seleciona de forma autônoma com qual nó pai potencial formará uma conexão upstream. O nó pai selecionado de forma autônoma é conhecido como o nó pai preferencial. Os critérios usados para selecionar o nó pai preferencial são projetados para reduzir o número de camadas na rede ESP-WIFI-MESH e equilibrar o número de conexões downstream entre os nós pai potenciais (ESP)

2.5.1.3 Auto-recuperação

ESP-WIFI-MESH é uma rede de autocorreção, sendo assim, pode encontrar e corrigir falhas nas conexões. As falhas ocorrem principalmente quando um nó pai com um ou mais nós filhos é interrompido ou quando a conexão entre um nó pai e seus nós filhos se torna instável. Os nós filhos no ESP-WIFI-MESH selecionarão um novo nó pai e formarão uma conexão upstream com ele para manter a interconectividade da rede. O ESP-WIFI-MESH pode lidar com falhas de nó raiz e falhas de nó pai intermediário (MAIA, 2022).

- Se houver algum problema com o nó raiz, como representado na Figura 13, os nós conectados a ele, segunda camada, detectam imediatamente a falha. Após várias tentativas fracassadas de conexão entre os nós da segunda camada e o nó raiz, inicia-se uma nova rodada de eleição do nó raiz. O nó da segunda camada com

o RSSI com roteador mais forte será eleito como o novo nó raiz, enquanto os nós restantes da segunda camada formarão uma conexão upstream com o novo nó raiz (ou um nó pai vizinho, em caso de nós mais distantes).

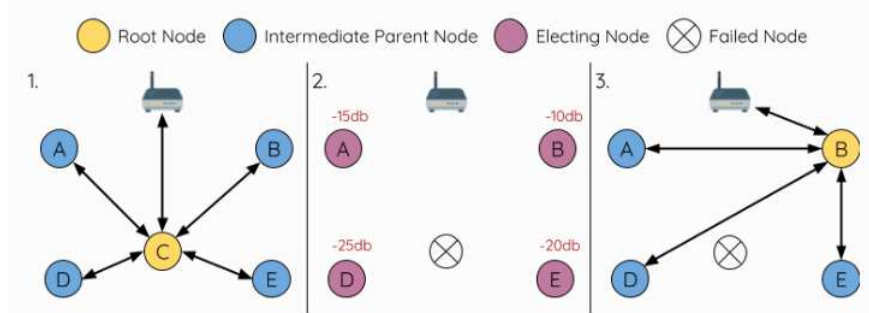


Figura 13 – Auto-recuperação de falha do nó raiz

- Se um nó pai intermediário apresenta algum problema, os nós filho desconectados tentarão inicialmente se reconectar com o nó pai. E novamente após várias tentativas fracassadas de reconexão, cada nó filho começará a procurar possíveis nós pai.

Havendo nós pai disponíveis, cada nó filho selecionará individualmente um novo nó pai preferencial e formará uma conexão upstream com ele, como visto na Figura 14. Caso não haja outros nós pai potenciais para um nó filho específico, ele permanecerá ocioso indefinidamente.

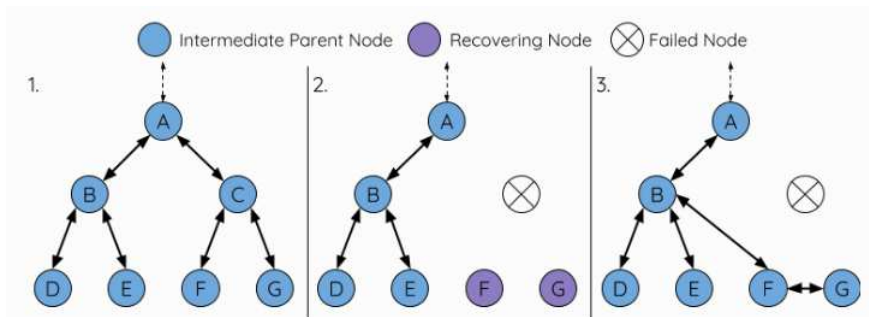


Figura 14 – Auto-recuperação de falha do nó pai intermediário

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será apresentada a implementação, de uma rede ESP-WIFI-MESH, utilizando diferentes versões do ESP32, SoC previamente introduzido no capítulo anterior. O desenvolvimento será realizado por meio do Visual Studio Code (VSCode), da Microsoft, utilizando o framework ESP-IDF, que também já foi abordado anteriormente.

O ESP32 está disponível em diversas versões que atendem a diferentes objetivos e apresentam variações físicas em seu layout. Para a implementação da rede Wi-Fi Mesh, são utilizadas três variantes: o ESP32 genérico, Figura 15(a), o ESP32-C3 Mini, Figura 15(b), e o Wemos D1, Figura 15(c). A utilização dessas variantes explora diferentes características e comportamentos de cada um na rede ESP-WIFI-MESH, analisando a requisitos como: desempenho, alcance e compatibilidade. As principais características técnicas dos outros ESP-32 estão presentes na Tabela 4.

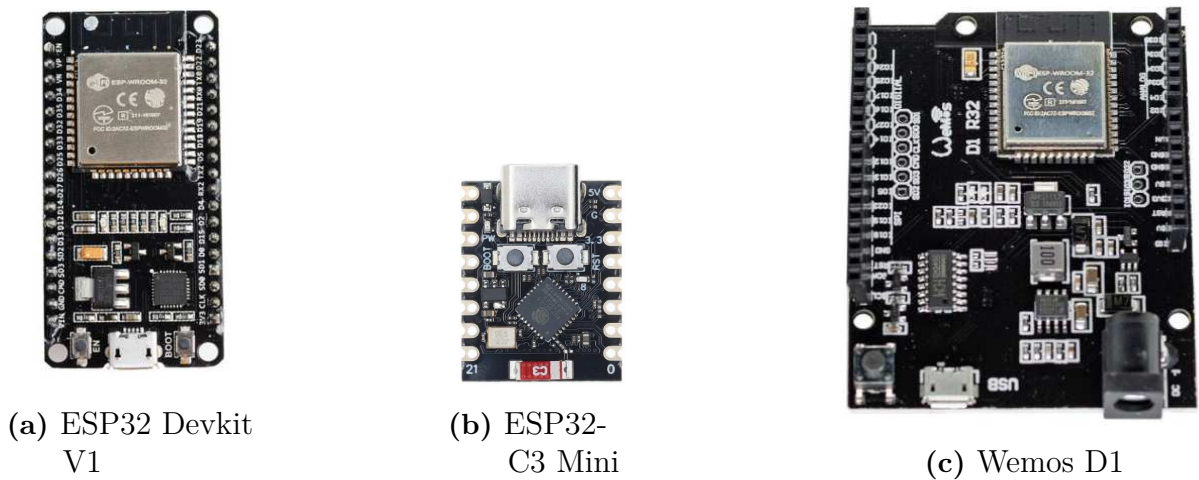


Figura 15 – Versões ESP32

Tabela 4 – Tabela de Comparação das versões do ESP32

Informação	ESP32-C3 Mini	Wemos D1 / ESP32 Devkit V1
Núcleo	RISC-V 32-bit single-core	Dual-core Tensilica Xtensa LX6
Frequência de clock máx	160 MHz	240 MHz
Memória RAM	400 KB SRAM, 384 KB ROM	520 KB
Memória Flash	4 MB	4 MB
GPIOs	15	26
Interfaces	UART, SPI, I2C	SPI, I2C, I2S, IR, UART, PWM
Consumo de Energia	Moderado	Moderado a alto
Conectividade	Wi-Fi 2.4 GHz e Bluetooth	Wi-Fi 2.4 GHz e Bluetooth

3.1 Implementação da Rede ESP-WIFI-MESH

Utilizando o *framework* ESP-IDF, da Espressif, são expostos dois exemplos de implementação de uma rede ESP-WIFI-MESH em que o primeiro exemplo demonstrará de forma simplificada os principais recursos disponíveis nas bibliotecas, ressaltando a facilidade de implementação e as inúmeras possibilidades. Já no segundo exemplo são explorados recursos mais avançados, resultando em uma solução mais robusta, mas com maiores exigências técnicas, tanto em relação à eficácia, confiabilidade e compatibilidade do código quanto às especificações do *hardware*.

3.1.1 Implementação básica

A implementação mais básica busca demonstrar o poder e a facilidade de se iniciar uma rede ESP-WIFI-MESH utilizando o *framework* ESP-IDF e suas bibliotecas. Neste tópico são mostrados as principais funções e blocos de códigos que são fundamentais também para implementações mais avançadas.

A Tabela 5 apresenta as funções que facilitam a implementação. Como se trata de uma aplicação mais básica, algumas definições, como o nó raiz e as credenciais de rede, são aplicadas diretamente no código, exigindo assim um conhecimento prévio sobre como desenvolver utilizando o ESP-IDF, para realizar determinadas modificações.

Tabela 5 – Funções principais para implementação

Função	Ação
<i>esp __mesh __init()</i>	Esta função deve ser chamada antes de qualquer outra função relacionada ao mesh. Ela configura e inicializa as estruturas internas necessárias para o funcionamento da rede mesh.
<i>esp __mesh __set __config()</i>	Esta função define as configurações da rede mesh, como o ID da rede mesh, o canal, o tipo de dispositivo e outras opções de configuração.
<i>esp __mesh __start()</i>	Esta função inicia a rede mesh com as configurações definidas. Após chamar esta função, o dispositivo tentará se conectar à rede mesh e começar a comunicação com outros dispositivos.
<i>esp __mesh __set __self __organized()</i>	Esta é a função que define se a rede mesh deve se auto-organizar.
<i>esp __mesh __send()</i>	Esta função é usada para enviar pacotes de dados para outros dispositivos na rede mesh, sendo possível especificar o destino do pacote ou enviá-lo para todos os dispositivos.
<i>esp __mesh __recv()</i>	Função usada para receber pacotes de dados enviados por outros dispositivos na rede mesh. Ela pode ser usada em um loop para receber dados continuamente.
<i>esp __mesh __stop()</i>	Esta função interrompe a rede mesh e desativa a funcionalidade mesh no dispositivo.
<i>esp __mesh __deinit()</i>	Libera os recursos alocados pela rede mesh e deve ser chamada quando a rede mesh não for mais necessária.

Utilizando das funções apresentadas anteriormente, o código pode ser dividido em três blocos principais:

- Bloco 1, mostrado abaixo, responsável pela criação das funções que lidam com os possíveis eventos relacionados às conexões entre os ESPs e o roteador, assim como os eventos da rede mesh em si, como conexões e desconexões de um nó.

```
1 // EVENTOS WIFI
2 static void wifi_event_handler(void* arg, esp_event_base_t
   event_base, int32_t event_id, void* event_data) {
3     ESP_LOGI("WI-FI", "Tentativa de conexao a rede Wi-Fi");
4     if (event_base == WIFI_EVENT && event_id ==
       WIFI_EVENT_STA_START) {
5         esp_wifi_connect();
6         ESP_LOGI("WI-FI", "Conexao com Wi-Fi realizada com
           sucesso!");
```

```

7     } else if (event_base == WIFI_EVENT && event_id ==
        WIFI_EVENT_STA_DISCONNECTED) {
8         esp_wifi_connect();
9         ESP_LOGI("WI-FI", "Conexao Wi-Fi perdida");
10    }
11 }
12
13 // EVENTOS MESH
14 static void mesh_event_handler(void* arg, esp_event_base_t
    event_base, int32_t event_id, void* event_data)
15 {
16     if (event_base == MESH_EVENT && event_id ==
        MESH_EVENT_STARTED) {
17         ESP_LOGI("Rede-Mesh", "Rede ESP-WIFI-MESH iniciada");
18     } else if (event_base == MESH_EVENT && event_id ==
        MESH_EVENT_STOPPED) {
19         ESP_LOGI("Rede-Mesh", "Rede ESP-WIFI-MESH parada");
20     }
21     if(event_base == MESH_EVENT && event_id ==
        MESH_EVENT_CHILD_CONNECTED){
22         ESP_LOGI("Rede-Mesh", "Parent node conectado");
23     }else{
24         ESP_LOGI("Rede-Mesh", "Parent node desconectado");
25     }
26 }

```

- Bloco 2, observado abaixo, encapsula as configurações iniciais para a conexão ao roteador e as definições da rede mesh, como por exemplo o tipo do nó e os identificadores da rede mesh.

```

1 void config_mesh(char* router_ssid, char* router_password,
    char* mesh_password)
2 {
3     //INICIALIZACAO DO SISTEMA E CONFIG DE INTERFACE DE REDE
4     ESP_ERROR_CHECK(esp_netif_init());
5     ESP_ERROR_CHECK(esp_event_loop_create_default());
6     ESP_ERROR_CHECK(esp_netif_create_default_wifi_mesh_netifs
        (&netif_sta, NULL));
7
8     // INICIALIZACAO WIFI
9     wifi_init_config_t config = WIFI_INIT_CONFIG_DEFAULT();
10    ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_init(&config));

```

```

11     ESP_ERROR_CHECK(esp_event_handler_register(WIFI_EVENT,
12         ESP_EVENT_ANY_ID, &wifi_event_handler, NULL));
13     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_storage(WIFI_STORAGE_FLASH));
14     ;
15     ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_start());
16
17     // INICIALIZACAO MESH
18     ESP_ERROR_CHECK_WITHOUT_ABORT(esp_mesh_init());
19     ESP_ERROR_CHECK(esp_event_handler_register(MESH_EVENT,
20         ESP_EVENT_ANY_ID, &mesh_event_handler, NULL));
21
22     // CONFIGURACOES MESH
23     mesh_cfg_t cfg = MESH_INIT_CONFIG_DEFAULT();
24     uint8_t mesh_id[6]={0x12, 0x34, 0x56, 0x78, 0x9A, 0xBC};
25     memcpy((uint8_t *) &cfg.mesh_id, mesh_id, 6);
26     memcpy((uint8_t *) &cfg.mesh_ap.password, mesh_password,
27         strlen(mesh_password));
28
29     // CREDENCIAIS DO ROTEADOR
30     cfg.channel = 0;
31     cfg.router.ssid_len = strlen(router_ssid);
32     memcpy((uint8_t *) &cfg.router.ssid, router_ssid, cfg.
33         router.ssid_len);
34     memcpy((uint8_t *) &cfg.router.password, router_password,
35         strlen(router_password));
36
37     ESP_ERROR_CHECK(esp_mesh_set_config(&cfg));
38
39     esp_mesh_set_self_organized(true);
40 }

```

- Bloco 3, apresentado abaixo, responsável pela inicialização, chamada das funções definidas nos blocos anteriores e envio das mensagens.

```

1 void app_main(void) {
2     //CHAMADA DAS CONFIGURACOES
3     config_mesh("Ferrarezi", "familia123!", "123456");
4
5     //INICIA A REDE MESH
6     ESP_ERROR_CHECK(esp_mesh_start());
7
8     //CONFIGURACAO E ENVIO DAS MENSAGENS
9     mesh_addr_t dest_addr;

```

```

10     const char *msg = "Eu sou seu pai";
11
12     mesh_data_t data = {
13         .data = (uint8_t *)msg,
14         .size = strlen(msg)
15     };
16
17     esp_mesh_send(&dest_addr, &data, NULL, 0);
18
19     //MENSAGENS RECEBIDAS
20     rcv = esp_mesh_recv(&rcv_addr, NULL, 0);
21     if(rcv.status == ESP_OK) {
22         ESP_LOGI("MENSAGEM", "Mensagem recebida: %.*s\n", rcv
                .data);
23     }
24 }

```

De forma geral, a aplicação é responsável por criar uma rede mesh que periodicamente, recebe e envia mensagens entre seus nós. Além disso, mantém uma rotina de busca por novos nós e realiza os ajustes de forma automática, como já foi citado em seções anteriores. Todos os eventos de comunicação e rotina da rede mesh podem ser acompanhados através do monitor serial.

A simplicidade do código e uso moderado dos recursos do ESP, permitem que ele apresente uma boa compatibilidade entre os SoCs da Espressif, funcionando perfeitamente não apenas no ESP32 genérico, mas também no ESP32-C3 mini. Lembrando que o ESP32-C3 possui menos recursos.

3.1.2 Aperfeiçoamento da aplicação

Analisando a implementação apresentada no tópico anterior, fica mais que claro o poder do ESP-IDF no desenvolvimento de uma rede mesh. Porém, além dos recursos necessários para a estruturação da rede, é possível e fundamental adicionar melhorias, como a visualização das informações, a flexibilidade na configuração dos dispositivos e a capacidade de atualização via OTA (*Over-the-Air*), já explicada no capítulo anterior. Sendo assim, neste tópico será desenvolvida, com base no projeto *ESP32 Mesh Control*, uma implementação mais avançada, adicionando as novas funcionalidades e criando um sistema mais completo que será testado e analisado no próximo capítulo.

O funcionamento se dará da seguinte forma: ao iniciar o ESP32 irá verificar na memória NVS (*Non-Volatile Storage*) se há alguma credencial da rede Wi-Fi salva. Caso nada seja encontrado, o ESP32 entrará no modo Ponto de Acesso (AP), em que é hospedada

uma página principal, conforme a Figura 16. Essa página disponibiliza todos os recursos da aplicação, mas em primeiro caso, no qual não há uma rede previamente configurada, será necessário acessar a opção "Configurações de Rede".



Figura 16 – Página principal da aplicação

Nesse momento, como mostrado na Figura 17, o usuário pode inserir as credenciais do roteador e configurar a rede mesh que será iniciada. Vale destacar que todos os dispositivos ESP32 utilizarão o mesmo código e por isso todo dispositivo que não tem a rede salva na memória NVS, deverá passar por esse processo de configuração inicial antes de fazer parte da rede mesh.

UFJF

TCC: ESP-WIFI-MESH

+ Controle da Rede Mesh

+ Envio de Mensagens

- Configurações de Rede

Configuração Roteador

SSID:

Ferrarezi

Senha:

.....

☐ Ver Senha

Configuração da Rede Mesh

Mesh ID:

77-77-77-77-77-77

Senha Mesh:

.....

☐ Ver Senha

Atualizar Config

Figura 17 – Configuração de Rede

Com pelo menos dois dispositivos conectados à rede, já é possível acessar a principal funcionalidade da aplicação: o "Controle da Rede Mesh", ilustrado na Figura 18. Nessa interface, são exibidas informações importantes sobre a rede e seus respectivos nós, são elas: as conexões entre os nós, um identificador personalizado para cada dispositivo, o endereço MAC de cada nó, a camada da rede à qual pertence e o status do botão de cada ESP. Essas informações garantem o monitoramento da estrutura da rede mesh.

UFJF

TCC: ESP-WIFI-MESH

- Controle da Rede Mesh

Nós da Rede Mesh

[Atualizar](#)[Visualização em árvore](#)

ID	Nó	Parent	Camada	Versão	Botão
A	9D:ED:7C	Roteador WiFi	1	0.15	false
B	80:5A:A8	9D:ED:7C	2	0.15	true
C	75:C8:28	9D:ED:7C	2	0.15	false

[+ Envio de Mensagens](#)[+ Configurações de Rede](#)[+ Atualização de Firmware](#)

Figura 18 – Informações da Rede Mesh

Além de possibilitar a configuração e o monitoramento da rede ESP-WIFI-MESH de forma simples, a aplicação oferece outras duas funcionalidades importantes. Uma é o Envio de Mensagens, conforme a Figura 19(a), que possibilita o envio de mensagens personalizadas para os nós. E a outra é a Atualização de *Firmware*, mostrada na Figura 19(b), que permite a atualização via OTA.

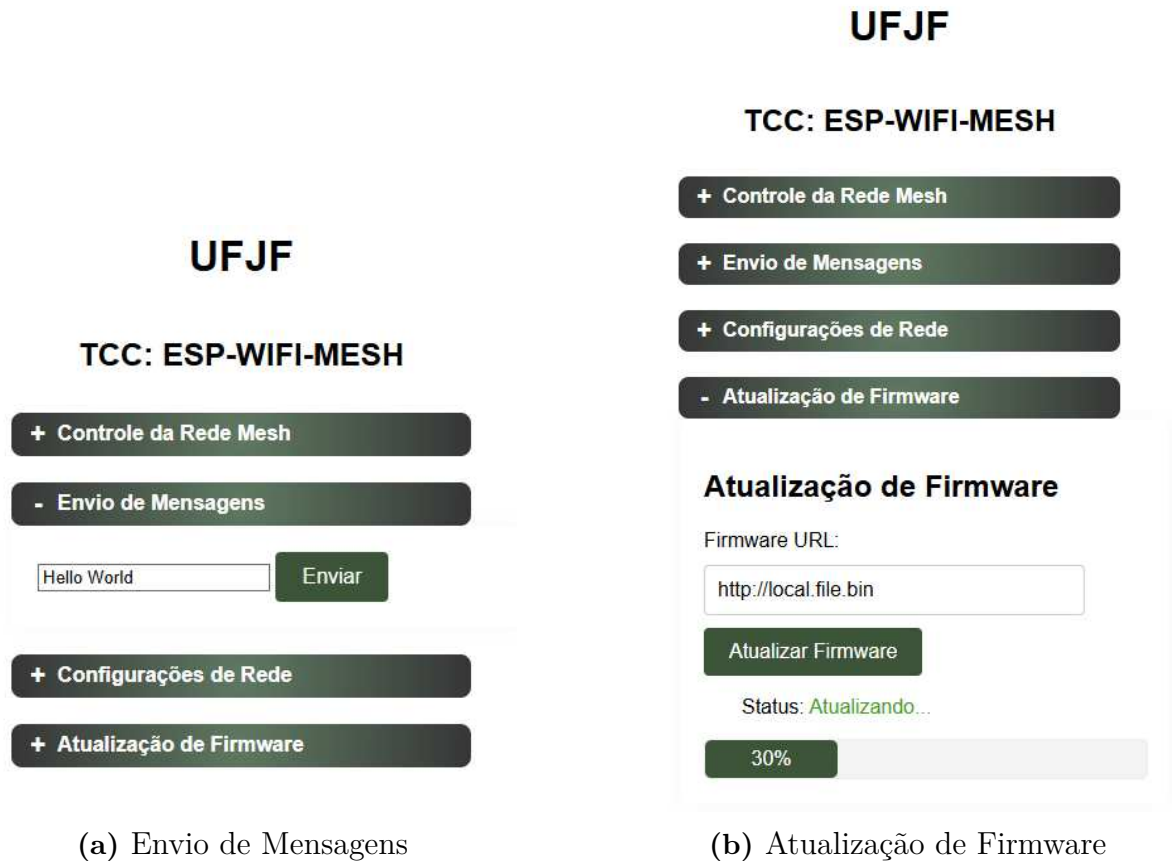


Figura 19 – Mais aplicações

Os arquivos que constituem esta aplicação estão detalhados na Tabela 6. Cada arquivo de código-fonte é responsável por uma das funcionalidades apresentadas anteriormente. Sendo assim, qualquer modificação além das funcionalidades atualmente disponíveis na aplicação deve ser feita por meio da criação de um novo arquivo de código-fonte ou pela alteração dos arquivos existentes.

Tabela 6 – Principais arquivos de código-fonte

Código-Fonte	Atribuição
<i>app_config.c</i>	Aqui são feitas as principais configurações, relacionadas principalmente com credências de rede e armazenamento na memória.
<i>config_ip_addr.c</i>	Aqui estão as configurações relacionadas com o endereço IP, necessário para visualização da página HTML criada.
<i>html_macros.h</i>	Código responsável pela redução do HTML.
<i>main.c</i>	Arquivo principal, onde são chamados todos os recursos necessários para o funcionamento do projeto.
<i>mesh_network.c</i>	Acontece o gerenciamento da rede mesh, onde estão as funções necessárias para o funcionamento da rede mesh
<i>mesh_tree.c</i>	Aqui estão as funções responsáveis por criar a estrutura em árvore que será visualizada na página HTML.
<i>ota.c</i>	Funções e rotinas responsáveis pela implementação da atualização de firmware via OTA.
<i>utils.c</i>	Funções uteis de forma geral que são aproveitadas em todos os outros códigos
<i>web_server.c</i>	Implementação do servidor Web, onde estão implementadas as funções que serão chamadas nos scripts da página web para retornarem as informações necessárias.
<i>web_socket.c</i>	Implementação de soquete da Web, ou seja, possibilita a comunicação entre o ESP e a aplicação web.
<i>min_index.html</i>	HTML responsável por construir a visualização web e chamada das funções da aplicação.
<i>min_mesh_graph.html</i>	HTML que constroi a visualização em árvore da aplicação.

4 RESULTADOS

Com a aplicação aprimorada da rede ESP-WIFI-MESH desenvolvida e compreendida, é possível realizar testes e análises em diferentes cenários do cotidiano que dependem dos recursos oferecidos pela implementação. Os testes são focados principalmente nos seguintes cenários:

- Alcance: Determinar a distância máxima com e sem obstáculos, até termos um idle-node, ou seja, um dispositivo que não consegue estabelecer nenhuma conexão.
- Autoconfiguração e Auto-organização: Avaliar o comportamento da rede diante da adição e remoção de nós, verificando sua capacidade de reorganização dinâmica e manutenção de conexões.

Esses testes permitirão validar o desempenho da rede em diferentes condições e isso garante sua eficiência e confiabilidade.

4.1 Alcance

Os testes de alcance são realizados para dois ambientes diferentes, um aberto e outro com diversos obstáculos, como mostra a Figura 20.



Figura 20 – Local fechado de teste

Para os testes de alcance, é utilizado um botão touch, já integrado a alguns pinos do ESP32, implementado por meio de uma função que ao ser pressionado retornava via monitor serial a potência do sinal (RSSI) em relação ao nó raiz.

No ambiente fechado, o ESP raiz é mantido na sala, próximo ao roteador, local indicado com o círculo azul na Figura 20. Enquanto isso, o segundo ESP é movido para

diferentes cômodos, junto ao notebook para permitir a leitura das informações via conexão serial sempre que o botão touch é pressionado.

Seguindo exatamente a mesma lógica do teste em ambiente fechado, o teste em ambiente aberto se diferenciou apenas pelo fato de que o segundo ESP se afasta em uma área sem obstáculos do nó raiz.

Com isso, são obtidos os valores apresentados na Tabela 7 para o ambiente aberto e na Tabela 8 para o ambiente fechado.

Tabela 7 – Resultados local aberto

Distância (m)	Potência do sinal (dBm)
0	-10
3	-43
8	-53
13	-57
20	-69
50	-88

Tabela 8 – Resultados local fechado

Cômodo	Distância (m)	Potência do sinal (dBm)
Sala	1	-12
Quarto	2	-54
Cozinha	3	-44
Escritório	5	-67
Banheiro	6	-72

Como esperado, as barreiras no ambiente fechado impactaram significativamente na potência do sinal entre os ESPs. Existem diversas estratégias para contornar esse problema, desde soluções simples como o reposicionamento do nó raiz, até alternativas como a substituição dos dispositivos por modelos compatíveis com maior alcance e provavelmente maior custo.

Porém, considerando a arquitetura da rede ESP-WIFI-MESH, a simples adição de mais nós é suficiente para garantir uma comunicação estável. Mesmo que ainda haja perdas de potência no sinal, não são significativas a ponto de ser um problema na comunicação.

4.2 Funcionalidades da Rede Mesh

Antes de observar os recursos da rede em atividade é necessário relembrar os cenários em que cada uma das rotinas acontece, para que assim seja possível simular situações que validem os testes.

- **Formação Inicial da Rede:** Quando os dispositivos são ligados, eles iniciam um processo de descoberta para se conectar a outros nós próximos, estabelecendo automaticamente a topologia da rede mesh.
- **Alterações na Topologia:** Se um nó é adicionado, removido ou se desloca dentro da área de cobertura, a rede ajusta sua estrutura para manter a conectividade e otimizar as rotas de comunicação.
- **Falhas de Conexão:** Quando um nó perde a conexão com seu nó pai (parent node), ele buscará um novo nó pai para restabelecer sua ligação à rede, garantindo a continuidade do fluxo de dados.
- **Otimização:** Periodicamente, a rede avalia a qualidade das conexões e pode realocar nós para melhorar a eficiência da rede.

Relembrados os cenários de ocorrência de cada recurso, os resultados são acompanhados através do console (monitor serial) e pela geração da árvore de nós, também implementada na aplicação avançada da rede ESP-WIFI-MESH.

Na Figura 21, é possível observar, por meio dos Logs, a obtenção das credenciais via NVS, a conexão com o roteador e a inicialização da rede mesh.

```

I (853) wifi_init: rx ba win: 6
I (853) wifi_init: tcpip mbox: 32
I (853) wifi_init: udp mbox: 6
I (863) wifi_init: tcp mbox: 6
I (863) wifi_init: tcp tx win: 5760
I (873) wifi_init: tcp rx win: 5760
I (873) wifi_init: tcp mss: 1440
I (873) wifi_init: WiFi IRAM OP enabled
I (883) wifi_init: WiFi RX IRAM OP enabled
I (883) phy_init: phy_version 4840,a40f0ac,Aug 16 2024,16:48:06
I (973) phy_init: Saving new calibration data due to checksum failure or outdated calibration data, mode(0)
I (1043) wifi:mode : sta (cc:db:a7:9d:ed:7c) + softAP (cc:db:a7:9d:ed:7d)
I (1043) wifi:enable tsf
I (1053) wifi:Total power save buffer number: 16
I (1053) wifi:Init max length of beacon: 752/752
I (1053) wifi:Init max length of beacon: 752/752
I (1063) mesh: <nvs>read layer:1
I (1063) mesh: <nvs>read assoc:1
I (1063) wifi:Set ps type: 0, coexist: 0

I (1083) wifi:Total power save buffer number: 16
I (1343) wifi:mode : sta (cc:db:a7:9d:ed:7c)
I (1353) mesh: <MESH_NWK_LOOK_FOR_NETWORK>need_scan:0x3, need_scan_router:0x0, look_for_nwk_count:1
I (1353) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_MESH_STARTED>ID:77:77:77:77:78
I (1353) MESH_NETWORK: mesh starts successfully, heap:168620, root not fixed<0>(tree), ps:0
I (1373) main_task: Returned from app_main()
I (5573) mesh: [S2]Ferrarezi, 80:ea:0b:6b:ac:d1, channel:4, rssi:-53

```

Figura 21 – Monitor na inicialização da rede

Abaixo, na Figura 22, os Logs registram a adição de um novo dispositivo à rede. Nesse momento, também é possível observar o início da troca contínua de mensagens entre os nós e a atualização da árvore mesh.

```

I (893553) wifi:new:<4,1>, old:<4,1>, ap:<4,1>, sta:<4,0>, prof:4
I (893553) wifi:station: 58:bf:25:80:5a:a8 join, AID=1, bgn, 40U
I (893583) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_PS_CHILD_DUTY>cidx:0, 58:bf:25:80:5a:a8, duty:0
W (893593) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_ROUTING_TABLE_ADD>add 1, new:2, layer:1
I (893613) mesh: <nvs>write assoc:1
I (893613) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_CHILD_CONNECTED>aid:1, 58:bf:25:80:5a:a8
I (893673) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","parent_addr":"cc:db:a7:9d:ed:7c","layer":2,"fw_ver":"0.15"}
W (893673) MESH_TREE: Tree Updated, Node Count: 2
W (893683) MESH_TREE: [1] root:90:ED:7C, layer:1, fw_ver:0.15
W (893683) MESH_TREE: [2] node:80:5A:A8, parent:90:ED:7C, layer:2, fw_ver:0.15
I (903673) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","parent_addr":"cc:db:a7:9d:ed:7c","layer":2,"fw_ver":"0.15"}

```

Figura 22 – Monitor na adição de um nó próximo

Por fim, na Figura 23, é possível ver a adição de um nó mais distante do nó raiz, porém mais próximo do dispositivo adicionado anteriormente. Isso resulta em uma configuração de três camadas, já que o novo nó se conecta ao dispositivo mais próximo e não diretamente ao nó raiz. Mesmo que a conexão direta com o nó raiz seja uma possibilidade, sua potência de sinal é relativamente menor.

```

I (2457383) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","parent_addr":"cc:db:a7:9d:ed:7c","layer":2,"fw_ver":"0.15"}
I (2466433) MESH_NETWORK: Recv from 0c:b8:15:75:c8:28: {"msg_id":1,"node_addr":"0c:b8:15:75:c8:28","parent_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","layer":3,"fw_ver":"0.15"}
W (2466443) MESH_TREE: Tree Updated, Node Count: 3
W (2466443) MESH_TREE: [1] root:90:ED:7C, layer:1, fw_ver:0.15
W (2466453) MESH_TREE: [2] node:80:5A:A8, parent:90:ED:7C, layer:2, fw_ver:0.15
W (2466453) MESH_TREE: [3] node:75:C8:28, parent:80:5A:A8, layer:3, fw_ver:0.15
I (2467393) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","parent_addr":"cc:db:a7:9d:ed:7c","layer":2,"fw_ver":"0.15"}
W (2469283) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_ROUTING_TABLE_ADD>add 1, new:3, layer:1
I (2476433) MESH_NETWORK: Recv from 0c:b8:15:75:c8:28: {"msg_id":1,"node_addr":"0c:b8:15:75:c8:28","parent_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","layer":3,"fw_ver":"0.15"}
I (2477413) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8"}

```

Figura 23 – Monitor na adição de um novo nó distante

Partindo da rede com três camadas criada nos testes de auto-configuração, é possível desenvolver os testes de auto-organização.

A primeira etapa do teste consiste em remover o ESP32 da segunda camada e acompanhar via monitor serial a nova estrutura que se formará. Os resultados podem ser observados na Figura 24, em que o nó da terceira camada passa a se conectar diretamente ao nó raiz. Confirmando o comportamento mencionado anteriormente, em que mesmo tendo alcance para se conectar ao nó raiz desde o início, "escolheu" estabelecer uma conexão com o dispositivo mais próximo, priorizando a rota mais eficiente.

```

W (5623073) wifi:inactive timer: now=4f196187 last_rx_time=4e6501a3 diff=2e2d, aid[1]58:bf:25:80:5a:a8 leave
I (5623083) wifi:station: 58:bf:25:80:5a:a8 leave, AID = 1, reason = 4, bss_flags is 658531, bss:0x3ffdee64
I (5623083) wifi:new:<4,0>, old:<4,1>, ap:<4,1>, sta:<4,0>, prof:4
I (5623093) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_CHILD_DISCONNECTED>aid:1, 58:bf:25:80:5a:a8
W (5623103) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_ROUTING_TABLE_REMOVE>remove 2, new:1, layer:1
W (5623103) MESH_TREE: Tree Updated, Node Count: 1
I (5623123) mesh: <nvs>write assoc:0
W (5623123) MESH_TREE: [1] root:9D:ED:7C, layer:1, fw_ver:0.15
I (5623133) mesh: [scan]new scanning time:300ms, beacon interval:100ms
I (5633143) mesh: [scan]new scanning time:600ms, beacon interval:300ms
I (5717173) wifi:new:<4,1>, old:<4,0>, ap:<4,1>, sta:<4,0>, prof:4
I (5717183) wifi:station: 0c:b8:15:75:c8:28 join, AID=1, bgn, 40U
I (5717193) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_PS_CHILD_DUTY>cidx:0, 0c:b8:15:75:c8:28, duty:0
W (5718203) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_ROUTING_TABLE_ADD>add 1, new:2, layer:1
I (5718223) mesh: <nvs>write assoc:1
I (5718223) mesh: <nvs>write assoc:1
I (5718223) mesh: <nvs>write assoc:1
I (5718223) mesh: <nvs>write assoc:1
I (5718223) mesh: <nvs>write assoc:1
I (5718223) mesh: <nvs>write assoc:1
I (5718223) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_CHILD_CONNECTED>aid:1, 0c:b8:15:75:c8:28

```

Figura 24 – Monitor na remoção de um nó pai na segunda camada

Agora o nó removido é readicionado, posicionado de maneira igualmente espaçada entre o nó raiz e o nó filho. Essa nova adição gera novos logs, apresentados na Figura 25. Neste teste, observa-se claramente o novo rearranjo da rede, em que os dois dispositivos estão conectados diretamente ao nó raiz e com isso, a terceira camada é eliminada, demonstrando mais uma vez a capacidade e eficiência da rede mesh de se reorganizar.

```

I (5912153) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_CHILD_CONNECTED>aid:2, 58:bf:25:80:5a:a8
I (5912203) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","parent_addr":"I
(5912203) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","parent_addr":"c
c:db:a7:9d:ed:7c","layer":2,"fw_ver":"0.15"}
I (5912203) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","parent_addr":"
cc:db:a7:9d:ed:7c","layer":2,"fw_ver":"0.15"}
I (5912203) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","parent_addr":"
cc:db:a7:9d:ed:7c","layer":2,"fw_ver":"0.15"}
I (5912203) MESH_NETWORK: Recv from 58:bf:25:80:5a:a8: {"msg_id":1,"node_addr":"58:bf:25:80:5a:a8","parent_addr":"
cc:db:a7:9d:ed:7c","layer":2,"fw_ver":"0.15"}
W (5912213) MESH_TREE: Tree Updated, Node Count: 3
W (5912213) MESH_TREE: [1] root:9D:ED:7C, layer:1, fw_ver:0.15
W (5912223) MESH_TREE: [2] node:75:C8:28, parent:9D:ED:7C, layer:2, fw_ver:0.15
W (5912233) MESH_TREE: [3] node:80:5A:A8, parent:9D:ED:7C, layer:2, fw_ver:0.15

```

Figura 25 – Monitor na adição de um dispositivo igualmente espaçado entre os nós

Por fim, como último teste de auto-organização é retirado o nó raiz para que um nó mais próximo ao roteador seja eleito. Atráves da Figura 26 é possível acompanhar os votos, a eleição do novo nó raiz, a conexão direta ao roteador e a reinicialização da rede Mesh. A segunda linha apresnta o último momento da votação, onde é possível observar o nó candidato, e a porcentagem dos votos.

```

I (104299) mesh: [SCAN][ch:4]AP:4, other(ID:0, RD:0), MAP:1, idle:1, candidate:1, root:0, topMAP:0[c:2,i:1][80:ea:0b:6b:ac:d1]router found<
I (104309) mesh: [SCAN:10/10]rc[128][0c:b8:15:75:c8:29,-64], self[0c:b8:15:75:c8:28,-67,reason:2,votes:1,idle][mine:1,voter:1(1.00)percent:1.00][128,1,0c:b8:15:75:c8:29,-64/3]
I (104319) mesh: [scan]new scanning time:300ms, beacon interval:100ms
I (104339) mesh: [DONE]connect to router:Ferrarezi, channel:4, rssi:-49, 80:ea:0b:6b:ac:d1[layer:0, assoc:0], my_vote_num:1/voter_num:1, rc[0c:b8:15:75:c8:29,-64/3]
I (104759) wifi:new:<4,1>, old:<4,0>, ap:<4,1>, sta:<4,0>, prof:4
I (104759) wifi:state: init -> auth (b0)
I (104769) wifi:state: auth -> assoc (0)
I (104779) wifi:state: assoc -> run (10)
I (104889) wifi:connected with Ferrarezi, aid = 22, channel 4, BW20, bssid = 80:ea:0b:6b:ac:d1
I (104889) wifi:security: WPA2-PSK, phy: bgn, rssi: -69
I (104889) wifi:pm start, type: 0

I (104889) wifi:dp: 1, bi: 102400, li: 3, scale listen interval from 307200 us to 307200 us
[0:32mI (104899) MESH_NETWORK: <WIFI_EVENT_STA_CONNECTED>[0m
I (104909) mesh: [scan]new scanning time:600ms, beacon interval:300ms
I (104929) mesh: <cnvs>write layer:1
I (104929) mesh: <flush>upstream packets, connections(max):2, waiting:0, upQ:0
[0:32mI (104929) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT_PARENT_CONNECTED>layer:2-->1, parent: sta80:ea:0b:6b:ac:d0/ ap80:ea:0b:6b:ac:d1 <ROOT>, ID:77:77:77:77:77:78, duty:0[0m
I (104939) wifi:I (104929) mesh: <flush>root
AP's beacon interval = 102400 us, DTIM period = 1
I (104939) mesh: [TXQ]<max:128>up(0, be:0), down(0, be:0), mgmt:0, xon(req:0, rsp:0), bcast:0, wnd(0, parent:cc:db:a7:9d:ed:7d)
I (104959) mesh: [RXQ]<max:128 = cfg:128 + extra:0>self:0, <max:128 = cfg:128 + extra:0>tods:0
[0:32mI (104939) MESH_NETWORK: <MESH_EVENT TODS REACHABLE>state:0[0m

```

Figura 26 – Monitor na eleição de um novo nó raiz

A Figura 27 expõe de forma visual toda a construção e reestruturação da rede nos testes de funcionalidades da rede mesh.

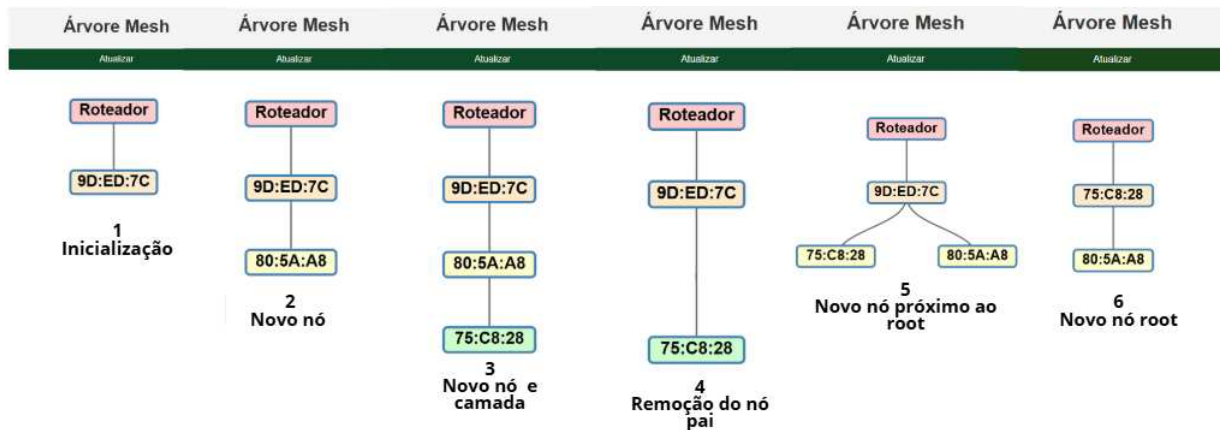


Figura 27 – Modificações na estrutura da Rede Mesh de acordo com os cenários de teste

4.3 Resultados do ponto de vista das ILPIs

Após conhecer três Instituições de Longa Permanência para Idosos (ILPIs), cada uma com residentes em diferentes níveis de dependência, é plausível dizer que a implementação de uma rede ESP-WIFI-MESH é extremamente viável e aplicável, conforme análises físicas dos locais. A estrutura dessas instituições, caracterizada por vários quartos próximos favorece a formação de uma enorme rede com redundância de caminhos. Essa configuração é perfeita para estabelecer a rede confiável, de fácil implementação e baixo custo, proposta no início do trabalho.

Com os ESPs alimentados com pequenas baterias de 3V, a implementação poderia começar inicialmente em clínicas com residentes com menor grau de dependência. Esse ambiente inicial permitirá a observação dos aspectos fundamentais da solução, como estabilidade da comunicação, execução das funcionalidades essenciais e adaptação ao

fluxo de trabalho local. Essa escolha minimiza os riscos e garante que possíveis falhas inesperadas não tenham consequências críticas.

Apresentado um bom desempenho e estabilidade na clínica com menor grau de dependência, a implementação poderia ser iniciada gradativamente para as demais clínicas. Esse processo deve levar em consideração a estrutura física de cada local e as necessidades específicas dos residentes, garantindo que a solução seja ajustada para atender diferentes realidades.

Finalmente, com a consolidação da rede e a garantia da confiabilidade das informações trafegadas, será possível disponibilizar aos gestores das clínicas e aos familiares dos residentes a consulta e análise dos dados coletados, garantindo transparência, eficiência no acompanhamento do bem-estar e da saúde dos residentes, além de fornecer informações importantes para a tomada de decisões dentro e fora das clínicas.

Em resumo, a implementação nas ILPIs fornece uma estrutura capaz de auxiliar nas três camadas dentro da instituições: comunicação entre residentes e cuidadores, comunicação entre residentes e familiares e informações para administração e gestão.

5 CONCLUSÃO

A implementação de uma rede mesh sem fio utilizando módulos ESP32 em Instituições de Longa Permanência para Idosos (ILPIs) mostrou-se uma solução possível e eficaz. Os testes realizados, inferem que os ambientes físicos das ILPIs fornecem o cenário propício para aplicação do projeto (muitos quartos e próximos entre si), possibilitando comunicações estáveis, pela redundância de caminhos, nos cenários previstos: residentes/cuidadores, residentes/famíliares e geração de dados para gestão e administração.

Para melhorar e compreender as funcionalidades e limitações do sistema, é recomendável aumentar a rede, adicionando múltiplos dispositivos e acompanhando a continuidade de uma comunicação eficiente mesmo com um número elevado de nós.

Além disso, é essencial analisar e adaptar o design dos dispositivos que constituem o sistema, para atender às necessidades de usuários com mobilidade reduzida ou inexistente. A utilização de diferentes *System-on-Chips* (SoCs) na implementação da rede também é uma possibilidade que permitirá a comparação de desempenho, consumo de energia e custo-benefício, buscando identificar alternativas que possam complementar ou melhorar a solução atual.

A segurança da informação também é um ponto extremamente importante que pode ser aprofundado, com a implementação de medidas robustas de segurança para proteger os dados trafegados contra acessos não autorizados e possíveis vulnerabilidades. Técnicas como criptografia avançada e autenticação dos dispositivos podem ser consideradas para garantir uma integridade e confidencialidade dos dados.

Por fim, avaliar e otimizar o consumo de energia dos dispositivos conectados pode ser essencial para aumentar a vida útil das baterias e reduzir custos operacionais. Estudar modos de baixo consumo e gerenciamento eficiente de energia são fundamentais para a sustentabilidade do sistema.

O impacto positivo que o projeto pode gerar no bem-estar dos idosos é notável, já que proporciona um meio de comunicação mais acessível e confiável. Além disso, o sistema auxilia no ecossistema da clínica como um todo, facilitando processos internos e permitindo um acompanhamento mais “próximo” por parte dos familiares que nem sempre podem estar presentes fisicamente.

Resumindo, apesar de ainda precisar de mais testes e análises mais precisas nas instituições, o projeto alcançou resultados que demonstram a viabilidade e os possíveis benefícios da implementação de uma rede ESP-WIFI-MESH em Instituições de Longa Permanência para Idosos. As melhorias sugeridas, são fundamentais para consolidar e garantir a eficácia da solução, possibilitando sua sustentabilidade e aceitação a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, M. A. d. S. Fundamentos de redes de computadores. 2016.
- ANTUNES, R. A. Instalação de uma rede mesh metropolitana utilizando o padrão ieee 802.11 ae implementação do serviço voip (wman-voip). Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2012.
- BASUMALLICK, C. *What Is a Mesh Network? Meaning, Types Working, and Applications in 2022*. 2022. Disponível em: <<https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/what-is-mesh-network/>> . Acesso em: 10 de fevereiro 2025.
- BAUER, M. Redes sem fio mesh: Padrao 802.11. *Sao José-SC outubro*, 2012.
- CARDOSO, C. M. et al. Snr prediction with ann for uav applications in iot networks based on measurements. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 22, n. 14, p. 5233, 2022.
- CORRÊA, G. L. A. *Sistema de atualização de firmware Over-The-Air para dispositivos de IoT baseado nas bibliotecas LwIP, Mbed TLS e FatFs*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.
- DA16200-THREADX-EVALUATION-KIT, D. *DA16200 ThreadX Evaluation Kit*. 2022. Disponível em: <<https://www.renesas.com/en/document/oth/um-wi-023-da16200-threadx-evaluation-kit-user-manual>> . Acesso em: 10 de fevereiro 2025.
- DIAS, K. L.; SADOK, D. F. H. Internet móvel: tecnologias, aplicações e qos. *XIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Florianópolis*, 2001.
- DO, D.-T. et al. Two-way transmission for low-latency and high-reliability 5g cellular v2x communications. *Sensors*, MDPI, v. 20, n. 2, p. 386, 2020.
- ESP32-SERIES, D. *Espressif Systems*. [S.l.]: 5.3, 2025. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf> . Acesso em: 10 de fevereiro 2025.
- ESP8266-SERIES, D. *Espressif Systems*. [S.l.]: 1.7, 2020. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf> . Acesso em: 10 de fevereiro 2025.
- ESPRESSIF, L. Esp-idf programming guide. *línea*]., Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started>>, 2023.
- FABRÍCIO, T. C. M.; SARAIVA, J. M.; FEITOSA, E. S. C. Contexto sócio histórico em que surgem e evoluem as políticas de proteção à pessoa idosa no brasil: da caridade ao direito a ilpi. *Oikos: Família e Sociedade em Debate, Viçosa*, v. 29, n. 2, p. 259–77, 2018.
- JEBRIL, A. H. et al. Overcoming limitations of lora physical layer in image transmission. *Sensors*, MDPI, v. 18, n. 10, p. 3257, 2018.
- KUROSE, J.; ROSS, K. Redes de computadores e internet. *São Paulo: Person*, 2012.

MAIA, M. C. Desenvolvimento de um framework para automatizar os processos de construção e gerenciamento de redes mesh em ambientes iot. Universidade Federal do Pampa, 2022.

PICO-SERIES, D. *Raspberry Pi Foundation*. [S.l.]: Información técnica sobre las capacidades del microcontrolador Raspberry Pi . . . , 2024. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/pico-series.html#pico2w-technical-specification>> . Acesso em: 10 de fevereiro 2025.

RESOLUÇÃO, R. nº 502, de 27 de maio de 2021. *Diário Oficial da União: seção 1*, Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2020/rdc0502_27_05_2021.pdf>, v. 1, nº 502, de 27 de maio de 2021.

RUDIGER, B. Projeto e desenvolvimento de rede de monitoramento lora. 2021.

SECCO, R. A. M. *Desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio em topologia mesh utilizando dispositivos IOT*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

SHAVIT, M.; GRYC, A.; MIUCIC, R. *Firmware update over the air (FOTA) for automotive industry*. [S.l.], 2007.

SOOMRO, A.; CAVALCANTI, D. Opportunities and challenges in using wpan and wlan technologies in medical environments [accepted from open call]. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 45, n. 2, p. 114–122, 2007.

SOUZA, M. M. B. V. de. *ANÁLISE DE UMA REDE SEM FIO AD HOC EM UM CENÁRIO DE MISSÃO MILITAR TÁTICA*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SPADINGER, R. Implementação da tecnologia 5g no contexto da transformação digital e da indústria 4.0. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2024.