



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Computação e Sistemas



Trabalho de Conclusão de Curso

Implementação e caracterização de uma rede Wi-Fi Mesh para sistemas eletrônicos embarcados

Graziele de Cássia Rodrigues

João Monlevade, MG
2026

Graziele de Cássia Rodrigues

**Implementação e caracterização de uma
rede Wi-Fi Mesh para sistemas eletrônicos
embarcados**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Computação pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Marcelo Moreira Tiago

Coorientador: Theo Silva Lins

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2026**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R696i Rodrigues, Graziele de Cassia.
Implementação e caracterização de uma rede Wi-Fi Mesh para
sistemas eletrônicos embarcados. [manuscrito] / Graziele de Cassia
Rodrigues. - 2026.
91 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Coorientador: Prof. Dr. Theo Silva Lins.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de
Computação .

1. Internet das coisas. 2. Redes de computadores - Desempenho. 3.
Sistemas embarcados (Computadores). 4. Sistemas de comunicação sem
fio. 5. Sistemas de comunicação sem fio - Mesh. I. Tiago, Marcelo Moreira.
II. Lins, Theo Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 004.7

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Graziele de Cassia Rodrigues

Implementação e caracterização de uma rede wi-fi mesh para sistemas eletrônicos embarcados

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2026.

Membros da banca

Dr. Marcelo Moreira Tiago - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Theo Silva Lins - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Marlon Paolo Lima - Universidade Federal de Ouro Preto
Eng. Fabio Bezerra de Souza - Portal Embarcados

Marcelo Moreira Tiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/03/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/03/2026, às 10:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1068268** e o código CRC **802CF5F7**.

*Dedico este trabalho à minha irmã Ingrid Rodrigues (**in memoriam**), que, mesmo ausente em presença física, permanece viva em minha memória, em minha força e em minha vontade de continuar. Seu apoio sempre foi e sempre será parte deste caminho.*

Agradecimentos

Agradeço à minha família e aos amigos pelo apoio nos momentos mais desafiadores e pelas palavras de incentivo ao longo dessa trajetória.

Ao meu orientador Marcelo Moreira, agradeço pela orientação, paciência e pelas contribuições essenciais ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador Theo Lins, agradeço pelo apoio e pelas valiosas sugestões, que contribuíram significativamente para a qualidade desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Nothing in life is to be feared; it is only to be understood.”

— Marie Curie (1867 – 1934).

Resumo

A crescente adoção de aplicações de Internet das Coisas (IoT) e da Internet Industrial das Coisas (IIoT) tem ampliado a demanda por redes sem fio resilientes, escaláveis e de fácil implantação, especialmente em ambientes onde a infraestrutura cabeada é limitada ou inviável. Nesse contexto, redes Wi-Fi mesh para Sistemas Eletrônicos Embarcados surgem como alternativa para ampliar cobertura e tolerância a falhas. Diante disso, este trabalho teve como objetivo implementar e caracterizar experimentalmente uma rede Wi-Fi mesh utilizando o ESP32-C6, que possui suporte nativo à comunicação Wi-Fi, em conjunto com a biblioteca ESP-WIFI-MESH, avaliando métricas de desempenho, qualidade do enlace e utilização de recursos computacionais em diferentes topologias e condições operacionais. A metodologia consistiu na implementação de uma arquitetura composta por nós ESP32-C6 organizados em topologia mesh, com comunicação baseada em MQTT e monitoramento em tempo real por meio do *software* Node-RED. Foram conduzidos experimentos em ambiente interno envolvendo análise de latência em distâncias fixa e variável, avaliação da Intensidade do Sinal Recebido (RSSI) e Relação Sinal-Ruído (SNR), estudo da escalabilidade com múltiplos nós, medição de taxa transferência, taxa de entrega e perda de pacotes, monitoramento de uso de CPU, memória heap e temperatura interna, bem como testes de resiliência com falha do nó *gateway*. Os resultados indicaram latências médias da ordem de 20 ms a 40 ms em topologias com um único salto, valores compatíveis com a documentação do fabricante. Em cenários com sete nós filhos, observou-se um aumento progressivo da latência fim-a-fim em função do número de saltos, com valores médios situando-se, em geral, entre 50 ms e 105,8 ms para rotas de um salto, entre aproximadamente 97,5 ms e 150,6 ms para dois saltos, e podendo ultrapassar 200 ms em trajetos com três saltos. Verificou-se ainda a capacidade de autorrecuperação da rede, com tempo médio de reconfiguração de aproximadamente 31 s após falha do nó *gateway*. O uso de recursos computacionais manteve-se dentro de limites operacionais seguros, embora com maior carga concentrada no nó *gateway*. Conclui-se que a utilização do ESP32-C6 com a biblioteca ESP-WIFI-MESH é viável para implementação de redes Wi-Fi mesh estáveis e resilientes em aplicações IoT e IIoT. Os resultados contribuem para a compreensão prática das limitações e potencialidades dessa tecnologia.

Palavras-chave: Redes Wi-Fi mesh; Internet das Coisas; Redes de computadores - Desempenho; Sistemas embarcados (Computadores); Sistemas de comunicação sem fio.

Abstract

The growing adoption of Internet of Things (IoT) and Industrial Internet of Things (IIoT) applications has increased the demand for resilient, scalable, and easily deployable wireless networks, especially in environments where wired infrastructure is limited or impractical. In this context, Wi-Fi mesh networks for Embedded Electronic Systems emerge as an alternative to extend coverage and improve fault tolerance. Therefore, this work aimed to implement and experimentally characterize a Wi-Fi mesh network using the ESP32-C6 microcontroller, which provides native support for Wi-Fi communication, in conjunction with the ESP-WIFI-MESH library, evaluating performance metrics, link quality, and computational resource utilization under different topologies and operating conditions. The methodology consisted of implementing an architecture composed of ESP32-C6 nodes organized in a mesh topology, with communication based on MQTT and real-time monitoring through the Node-RED software. Indoor experiments were conducted involving latency analysis at fixed and variable distances, evaluation of Received Signal Strength Indicator (RSSI) and Signal-to-Noise Ratio (SNR), scalability analysis with multiple nodes, measurement of throughput, packet delivery rate and packet loss rate, monitoring of CPU usage, heap memory, and internal temperature, as well as resilience tests involving gateway node failure. The results indicated average latencies on the order of 20 ms to 40 ms in single-hop topologies, values consistent with the manufacturer's documentation. In scenarios with seven child nodes, a progressive increase in end-to-end latency was observed as a function of the number of hops, with average values generally ranging from 50 ms to 105.8 ms for one-hop routes, approximately 97.5 ms to 150.6 ms for two-hop routes, and exceeding 200 ms in three-hop paths. The network also demonstrated self-healing capability, with an average reconfiguration time of approximately 31 s after gateway node failure. Computational resource usage remained within safe operational limits, although with higher load concentrated on the gateway node. It is concluded that the ESP32-C6 using the ESP-WIFI-MESH library is a viable solution for implementing stable and resilient Wi-Fi mesh networks in IoT and IIoT applications. The results contribute to the practical understanding of the limitations and potential of this technology.

Keywords: Wi-Fi mesh Networks; Internet of Things; Computer Networks – Performance; Embedded Systems (Computers); Wireless Communication Systems.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Topologia de rede mesh	23
Figura 2 – Comparação entre arquiteturas de rede	28
Figura 3 – Topologia típica da ESP-WIFI-MESH.	30
Figura 4 – Pinout ESP32-C6-DevKitC-1.	37
Figura 5 – Arquitetura geral da solução proposta, composta pela rede mesh local com módulos ESP32-C6, pela interface de monitoramento e banco de dados.	38
Figura 6 – Fluxo no <i>software</i> Node-RED	41
Figura 7 – AP com maior ocupação de <i>airtime</i>	43
Figura 8 – Ocupação por canal.	43
Figura 9 – Painel desenvolvido utilizando NODE-RED - parte 1.	45
Figura 10 – Painel desenvolvido utilizando NODE-RED - parte 2.	45
Figura 11 – Configuração experimental com distância fixa (3 m).	46
Figura 12 – Média da latência em função do tamanho do <i>payload</i>	46
Figura 13 – Variação da latência ao longo do tempo para pacotes de 32 e 1024 B.	47
Figura 14 – Histograma da latência da rede (18 a 21 de Outubro).	47
Figura 15 – Dispersão da latência ao longo do tempo (18 a 21 de Outubro).	48
Figura 16 – Histograma de RSSI para o nó <i>gateway</i> (18 a 21 de Outubro).	49
Figura 17 – Histograma de RSSI para o nó filho (18 a 21 de Outubro).	49
Figura 18 – Dispersão do RSSI para o nó <i>gateway</i> (18 a 21 de Outubro).	50
Figura 19 – Dispersão do RSSI para o nó filho (18 a 21 de Outubro).	50
Figura 20 – Configuração experimental com distância fixa e 7 nós filhos.	53
Figura 21 – Histogramas de latência – topologia com 7 nós (6 a 10 de dezembro)	54
Figura 22 – Dispersão da latência – topologia com 7 nós (6 a 10 de dezembro)	55
Figura 23 – Histograma do RSSI – topologia com 7 nós (6 a 10 de dezembro)	58
Figura 24 – Dispersão do RSSI – topologia com 7 nós (6 a 10 de dezembro)	59
Figura 25 – Configuração experimental com distância variável (1 m a 10 m).	61
Figura 26 – Impacto da distância na latência.	62
Figura 27 – Impacto da distância nos parâmetros RSSI e SNR: (a) impacto da distância no RSSI; (b) impacto da distância no SNR	63
Figura 28 – Análise de propagação do sinal.	64
Figura 29 – Fluxo de coleta e exibição dos dados transmitidos pelo ESP32-C6 <i>gateway</i>	77
Figura 30 – Fluxo completo de armazenamento dos dados no Node-RED.	78
Figura 31 – Configuração experimental com 1 <i>gateway</i> e 3 nós filhos.	81
Figura 32 – Histograma da latência – topologia com 3 nós (26 a 29 de outubro)	82
Figura 33 – Dispersão da latência – topologia com 3 nós (26 a 29 de outubro)	83

Figura 34 – Histogramas de RSSI (26 a 29 de Outubro)	84
Figura 35 – Dispersão do RSSI (26 a 29 de Outubro)	84
Figura 36 – Configuração experimental com 1 <i>gateway</i> e 4 nós filhos.	85
Figura 37 – Histogramas da latência (15 a 20 de novembro)	86
Figura 38 – Dispersão da latência (15 a 20 de novembro)	87
Figura 39 – Histogramas de RSSI (15 a 20 de Novembro)	88
Figura 40 – Dispersão do RSSI (15 a 20 de Novembro)	89

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre trabalhos relacionados e o presente estudo.	22
Tabela 2 – Diferenças entre redes ad hoc sem fio e redes mesh sem fio.	24
Tabela 3 – Comparação entre tecnologias sem fio.	27
Tabela 4 – Principais características do ESP-WIFI-MESH.	29
Tabela 5 – Identificadores de mensagens utilizados na comunicação da rede mesh.	40
Tabela 6 – Parâmetros de configuração utilizados nos experimentos com ESP-WIFI-MESH e respectivos valores de referência da documentação. . . .	42
Tabela 7 – Média e desvio padrão da latência por dia (18 a 21 de Outubro). . . .	48
Tabela 8 – RSSI médio e desvio padrão por dia (18 a 21 de outubro).	51
Tabela 9 – Média e desvio padrão das métricas de sistema por nó.	52
Tabela 10 – Latência média e desvio padrão por dia (6 a 10 de Dezembro).	56
Tabela 11 – RSSI médio e desvio padrão por dia (6 a 10 de dezembro).	60
Tabela 12 – Média e desvio padrão das métricas de sistema por nó.	60
Tabela 13 – Latência média e desvio padrão em função da distância.	62
Tabela 14 – Resumo comparativo da taxa de transferência de dados da rede. . . .	65
Tabela 15 – Tempo de detecção de falha e eleição de novo raiz.	66
Tabela 16 – Comparação da taxa de entrega de pacotes entre as topologias avaliadas.	67
Tabela 17 – Latência média e desvio padrão por dia (26 a 30 de outubro).	83
Tabela 18 – RSSI médio e desvio padrão por dia (26 a 30 de Outubro).	85
Tabela 19 – Latência média e desvio padrão por dia (15 a 20 de Novembro). . . .	88
Tabela 20 – RSSI médio e desvio padrão por dia (15 a 20 de Novembro).	90

Lista de algoritmos

Algoritmo 1 – Funções de inicialização da ESP-WIFI-MESH	75
Algoritmo 2 – Funções de configuração da malha.	75
Algoritmo 3 – Verificação do papel do dispositivo na malha.	75
Algoritmo 4 – Funções de envio e recebimento de dados.	76
Algoritmo 5 – Estrutura da tabela <code>metrics</code>	79
Algoritmo 6 – Estrutura da tabela <code>signal</code>	79
Algoritmo 7 – Estrutura da tabela <code>mesh_sensor_data</code>	79
Algoritmo 8 – Estrutura da tabela <code>system_metrics</code>	80

Lista de siglas e abreviaturas

AES	padrão avançado de criptografia (AES, do inglês <i>Advanced Encryption Standard</i>)
AP	ponto de acesso (AP, do inglês <i>Access Point</i>)
CPU	unidade central de processamento (CPU, do inglês <i>Central Processing Unit</i>)
CSMA/CA	acesso múltiplo com detecção de portadora e prevenção de colisão (CSMA/CA, do inglês <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>)
DoS	negação de serviço (DoS, do inglês <i>Denial of Service</i>)
heap	memória dinâmica (heap, do inglês <i>Heap Memory</i>)
IE	elemento de informação (IE, do inglês <i>Information Element</i>)
IIoT	internet industrial das coisas (IIoT, do inglês <i>Industrial Internet of Things</i>)
IoT	internet das coisas (IoT, do inglês <i>Internet of Things</i>)
LoRa	longo alcance (LoRa, do inglês <i>Long Range</i>)
MAC	controle de acesso ao meio (MAC, do inglês <i>Media Access Control</i>)
MitM	homem-no-meio (MitM, do inglês <i>Man-in-the-Middle</i>)
PDR	taxa de entrega de pacotes (PDR, do inglês <i>Packet Delivery Ratio</i>)
PLR	taxa de perda de pacotes (PLR, do inglês <i>Packet Loss Ratio</i>)
PMF	quadros de gerenciamento protegidos (PMF, do inglês <i>Protected Management Frames</i>)
RSSI	indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI, do inglês <i>Received Signal Strength Indicator</i>)
SPI	interface periférica serial (SPI, do inglês <i>Serial Peripheral Interface</i>)
WMNs	redes mesh sem fio (WMNs, do inglês <i>Wireless Mesh Networks</i>)
WPA2-PSK	acesso protegido Wi-Fi 2 com chave pré-compartilhada (WPA2-PSK, do inglês <i>Wi-Fi Protected Access 2 – Pre-Shared Key</i>)
WPA3-SAE	acesso protegido Wi-Fi 3 com autenticação simultânea de iguais (WPA3-SAE, do inglês <i>Wi-Fi Protected Access 3 – Simultaneous Authentication of Equals</i>)

WSNs redes de sensores sem fio (WSNs, do inglês *Wireless Sensor Networks*)

Lista de símbolos

γ	expoente de perda de percurso (path loss exponent)
λ	comprimento de onda (wavelength)
SNR	relação sinal-ruído (Signal-to-Noise Ratio)
d_0	distância de referência (reference distance)
G_r	ganho da antena receptora (receiver antenna gain)
G_t	ganho da antena transmissora (transmitter antenna gain)
L	fator de perdas do meio (system loss factor)
P_n	potência do ruído (noise power)
P_{recv}	potência recebida (received power)
P_s	potência do sinal (signal power)
P_{tx}	potência de transmissão (transmit power)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	O problema de pesquisa	19
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Implementação da rede e funcionalidades	20
1.2.2	Caracterização e análise de desempenho da rede	20
1.3	Trabalhos relacionados	20
1.4	Organização do trabalho	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.0.1	Rede mesh sem fio	23
2.0.1.1	Visão geral	23
2.0.1.2	Desafios	25
2.0.2	Análise comparativa de tecnologias sem fio para implementação de uma rede mesh	26
2.0.2.1	Wi-Fi	26
2.0.2.2	Bluetooth	26
2.0.2.3	Lora	27
2.0.2.4	Zigbee	27
2.0.2.5	Comparativo das tecnologias	27
2.0.3	ESP-WIFI-MESH	28
2.0.3.1	Topologia	29
2.0.3.2	Roteamento de pacotes	29
2.0.3.3	Formação da rede	30
2.0.3.4	Tabelas de roteamento	30
2.0.3.5	Gerenciamento da rede	31
2.0.3.6	API de programação da ESP-WIFI-MESH	31
2.0.4	Critérios de avaliação e análise de desempenho da Rede Wi-Fi mesh	31
2.0.5	Segurança em aplicações de redes sem fio	33
2.0.6	Protocolo MQTT	33
2.0.7	NODE-RED	34
2.0.8	SQLite	35
2.1	Considerações parciais	35
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	37
3.1	ESP32-C6-DevKitC-1 v1.2	37
3.2	Arquitetura proposta	37

3.3	Arquitetura e configuração operacional da rede mesh	39
3.3.1	<i>Firmware</i>	39
3.3.2	Comunicação e pacotes	40
3.3.3	Publicação de dados pelo <i>gateway</i>	40
3.3.4	Sincronização de tempo	41
3.3.5	Construção painel no <i>software</i> Node-RED	41
3.3.6	Estrutura das tabelas no banco de dados	41
3.4	Metodologia experimental e caracterização da rede	41
3.4.0.1	Parâmetros de configuração do experimento	41
3.4.1	Ambiente de teste	42
3.4.2	Cenários de avaliação	43
3.5	Considerações parciais	44
4	RESULTADOS	45
4.1	Painel de monitoramento	45
4.2	Avaliação de desempenho em topologia com 1 nó filho	46
4.2.1	Avaliação do impacto do tamanho do pacote na latência	46
4.2.2	Avaliação da latência ao longo do tempo	47
4.2.3	Avaliação da qualidade do sinal ao longo do tempo	49
4.2.4	Avaliação da utilização de recursos do microcontrolador	51
4.3	Avaliação de desempenho em topologia com 7 nós filhos	52
4.3.1	Avaliação da latência ao longo do tempo	52
4.3.2	Avaliação da qualidade do sinal ao longo do tempo	57
4.3.3	Avaliação da utilização de recursos computacionais	60
4.4	Avaliação de desempenho com distância variável (1 a 10 m)	61
4.4.1	Impacto da distância na latência de ponta a ponta	61
4.4.2	Impacto da distância na qualidade do sinal	63
4.5	Taxa de transferência de dados	65
4.6	Resiliência da rede mesh à falha do nó raiz	66
4.7	Taxa de entrega e perda de pacotes	67
4.7.1	Limitações do estudo	67
4.8	Considerações parciais	68
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	69
5.1	Perspectivas de continuidade e trabalhos futuros	71
	REFERÊNCIAS	72

	APÊNDICES	74
	APÊNDICE A – PROTÓTIPOS DA API ESP-WIFI-MESH	75
A.1	Inicialização da malha	75
A.2	Configuração da rede	75
A.3	Identificação do papel do nó	75
A.4	Comunicação entre os nós	76
	APÊNDICE B – FLUXOS DETALHADOS DO NODE-RED	77
	APÊNDICE C – ESTRUTURA DAS TABELAS NO BANCO	
	DE DADOS	79
C.1	Tabela metrics	79
C.2	Tabela signal	79
C.3	Tabela mesh_sensor_data	79
C.4	Tabela system_metrics	80
	APÊNDICE D – RESULTADOS COMPLEMENTARES . . .	81
D.1	Avaliação de desempenho em topologia com 3 Nós Filhos . . .	81
D.1.1	Avaliação da latência ao longo do tempo	82
D.1.2	Avaliação da qualidade do sinal ao longo do tempo	83
D.2	Avaliação de desempenho em topologia com 4 Nós Filhos . . .	85
D.2.1	Avaliação da latência ao longo do tempo	86
D.2.2	Avaliação da qualidade do sinal ao longo do tempo	87
	APÊNDICE E – CÓDIGO-FONTE DO PROJETO	91

1 Introdução

Este trabalho apresenta as etapas de implementação e caracterização de uma rede Wi-Fi mesh utilizando microcontroladores ESP32-C6. A solução emprega a biblioteca ESP-WIFI-MESH, que utiliza um algoritmo de roteamento proprietário da Espressif para gerenciar a comunicação na rede. A arquitetura da rede é baseada em uma topologia hierárquica, onde o algoritmo de roteamento seleciona dinamicamente um dos módulos como o nó raiz. Esse nó é o *gateway* da rede, sendo responsável por receber os dados e enviá-los para o painel de monitoramento. Os demais módulos funcionam como nós filhos, roteando os dados uns dos outros até o nó raiz. Para simular uma aplicação real de monitoramento, cada nó cria dados de temperatura e umidade, que poderiam ser provenientes de sensores conectados ao microcontrolador. Além disso, cada pacote de dados também incluirá métricas de desempenho da rede. Todas as informações são enviadas para um painel de controle e monitoramento, desenvolvido utilizando o *software* Node-RED. A interface permite a visualização em tempo real dos dados ambientais e das métricas de desempenho, apresentados por meio de gráficos de temperatura, umidade e latência. Para caracterizar a rede, serão realizados experimentos em diferentes disposições e condições a fim de analisar o desempenho e identificar cenários críticos de comunicação.

1.1 O problema de pesquisa

O mercado de IoT e IIoT vem se consolidando como uma das áreas de maior crescimento dentro do setor tecnológico. De acordo com o relatório *Strategic Intelligence: Internet of Things*, esse segmento deverá ultrapassar US\$ 1,8 trilhão até 2028 (Global-Data, 2025). Esse cenário impõe uma série de desafios técnicos, dentre os quais se destacam a transmissão contínua e a integridade dos dados gerados por dispositivos distribuídos. Além disso, questões como escalabilidade da rede, consumo energético, latência na comunicação, segurança e privacidade dos dados, tornam-se críticas à medida que as redes se expandem. Nesse contexto, Redes Mesh Sem Fio ou WMNs, surgem como uma alternativa estratégica. As WMNs, ao contrário das redes Wi-Fi de infraestrutura tradicionais (modelo em estrela), permitem que os nós se conectem de forma dinâmica e não hierárquica, atuando simultaneamente como *hosts* e roteadores para retransmissão de dados. Isso proporciona vantagens significativas em termos de implantação, distribuição de carga, resiliência a falhas e adaptabilidade (MORAI; KUNTAWAR, 2021a).

Com o propósito de investigar essa alternativa, este trabalho propõe a implementação e caracterização de uma rede Wi-Fi mesh utilizando microcontroladores ESP32-C6 em conjunto com a biblioteca oficial ESP-WIFI-MESH. Apesar da popularidade do dispositivo em aplicações IoT, há carência de estudos acadêmicos que avaliem o desempenho

dessa biblioteca, com a maioria das informações restrita à documentação do fabricante. Essa lacuna juntamente ao contexto atual do crescimento de aplicações IoT e IIoT motiva a presente pesquisa.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o desempenho de uma rede Wi-Fi Mesh estruturada com microcontroladores ESP32-C6. A escolha deste *hardware* justifica-se pelo baixo custo, ampla utilização em projetos de IoT e, principalmente, por integrar a geração atual de microcontroladores da Espressif, que adota padrões recentes como o IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6). A rede será desenvolvida utilizando a biblioteca oficial da Espressif, fabricante do microcontrolador adotado, nomeada ESP-WIFI-MESH, juntamente com o *framework* de desenvolvimento ESP-IDF. Visando a criação de uma infraestrutura estável, escalável e eficiente, esta pesquisa estabelece os seguintes objetivos específicos:

1.2.1 Implementação da rede e funcionalidades

Esta etapa do trabalho contempla a implementação da arquitetura de rede Wi-Fi Mesh utilizando microcontroladores ESP32-C6, com base na biblioteca ESP-WIFI-MESH. Além disso, é desenvolvido um painel de monitoramento em tempo real destinado à visualização das leituras de sensores eventualmente conectados aos nós da rede, bem como de métricas relevantes para a avaliação do desempenho da comunicação, tais como a latência na entrega dos pacotes e a intensidade do sinal recebida por cada nó, expressa pelo indicador RSSI.

1.2.2 Caracterização e análise de desempenho da rede

A análise de desempenho da rede avalia as etapas de configuração e reestruturação da malha em diferentes cenários, considerando a adição e a falha de nós, bem como o comportamento da rede sob condições de sobrecarga. São analisadas métricas de comunicação, como latência, RSSI, número de saltos (em inglês, *hops*), taxa de sucesso na entrega de pacotes, taxa de transferência de dados e uso de recursos do microcontrolador.

1.3 Trabalhos relacionados

A literatura apresenta diferentes trabalhos que exploram o uso de redes sem fio em topologia Mesh em aplicações de IoT, monitoramento e sistemas distribuídos.

O trabalho apresentado por Yoppy et al. (2019) avalia a biblioteca *painlessMesh* sobre a plataforma ESP8266, explorando a viabilidade de formação de redes mesh Wi-Fi

em dispositivos com recursos computacionais limitados. Além da análise de latência e taxa de dados, o estudo destaca características arquiteturais da biblioteca, como a operação simultânea em modos *Access Point* e *Station* e a manutenção de uma visão global da topologia por todos os nós. Os autores observam que, embora essa abordagem simplifique o roteamento e seja adequada para redes de pequeno porte, a escalabilidade é limitada, com aumento expressivo da latência e ocorrência de instabilidades à medida que o número de nós cresce.

Santos et al. (2022b) aplicam uma rede Wi-Fi Mesh baseada em ESP8266 ao monitoramento de produtos perecíveis, avaliando o impacto do tamanho da carga útil, da taxa de geração de mensagens e do número de nós sensores. O estudo vai além da análise puramente temporal, discutindo a influência do gerenciamento autônomo da topologia na volatilidade do atraso e evidenciando que o uso de mensagens maiores nem sempre resulta em melhor desempenho. Os resultados indicam que existe um compromisso entre tamanho de *payload*, carga de tráfego e estabilidade da rede, aspecto relevante para aplicações de monitoramento contínuo em IoT.

Um enfoque distinto é apresentado por Santos et al. (2022a), que investiga a viabilidade da biblioteca ESP-WIFI-MESH em um ambiente rural de topografia parcialmente aberta. Nesse estudo, além de métricas tradicionais de desempenho, como latência, taxa de transmissão e perda de pacotes, são analisados tempos de formação e convergência da rede, bem como a intensidade do sinal recebido. Os resultados demonstram que a capacidade de auto-organização e autorrecuperação do protocolo permite mitigar falhas pontuais de conexão, mesmo em cenários com maiores distâncias e variações ambientais.

Além de aplicações de monitoramento, redes Wi-Fi mesh também têm sido exploradas em sistemas distribuídos voltados à interação e controle em tempo real. O trabalho apresentado por Wang et al. (2022) propõe um sistema de treinamento de agilidade baseado em uma rede Wi-Fi mesh formada por módulos ESP32, utilizando uma topologia em árvore para ampliar a cobertura e a robustez da comunicação. Nesse contexto, a rede mesh não é avaliada apenas sob métricas de desempenho, mas como elemento central da arquitetura do sistema, permitindo a coleta, o encaminhamento e a visualização de dados em tempo real. Os resultados indicam que a utilização da rede mesh contribui para maior flexibilidade e confiabilidade do sistema quando comparado a soluções tradicionais de comunicação ponto-a-multiponto.

De forma geral, os trabalhos relacionados indicam que redes Wi-Fi mesh baseadas em microcontroladores são uma alternativa viável para aplicações distribuídas em IoT, oferecendo vantagens como autoconfiguração, maior área de cobertura e tolerância a falhas. Entretanto, também evidenciam limitações importantes, como restrições de escalabilidade, aumento da latência em topologias *multi-hop*, dependência das condições de propagação do sinal e impacto das escolhas arquiteturais e dos parâmetros de configuração sobre o desempenho e a estabilidade da rede.

De forma a sintetizar as principais diferenças entre os trabalhos discutidos e o presente estudo, a Tabela 1 apresenta uma comparação entre plataformas, métricas avaliadas e escopo experimental.

Tabela 1 – Comparação entre trabalhos relacionados e o presente estudo.

Característica	Yoppy et al. (2019)	Santos et al. (2022b)	Santos et al. (2022a)	Wang et al. (2022)	Este trabalho
Plataforma	ESP8266	ESP8266	ESP32	ESP32	ESP32-C6
Biblioteca Mesh	painlessMesh	painlessMesh	ESP-WIFI-MESH	ESP-WIFI-MESH	ESP-WIFI-MESH
Ambiente	Interno	Interno	Rural (aberto)	Externo (campus universitário)	Interno (real)
Métricas avaliadas	Tempo de ida e volta (RTT), variação	Taxa de entrega (PDR), atraso	Latência, vazão, RSSI, convergência	Tempo de resposta, perda de pacotes, RSSI	Latência, vazão, RSSI, SNR, PDR, convergência, recursos

Fonte: Elaborado pela autora.

1.4 Organização do trabalho

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2, apresenta os conceitos fundamentais sobre redes WiFi mesh, incluindo suas características, topologias e protocolos de roteamento.

O Capítulo 3, detalha a configuração do ambiente de desenvolvimento e a implementação prática da rede. Serão descritos o hardware utilizado, a arquitetura de software, o desenvolvimento do painel de monitoramento e a metodologia de teste.

O Capítulo 4, apresenta os resultados dos testes realizados. Serão analisadas métricas como a topologia da rede, intensidade do sinal (RSSI) e a latência de comunicação, em diferentes cenários. Este capítulo valida o desempenho da rede e discute o comportamento do sistema em condições críticas.

Por fim, o Capítulo 5, resume as principais descobertas do trabalho, discute os objetivos alcançados e aponta as contribuições da pesquisa.

2 Revisão bibliográfica

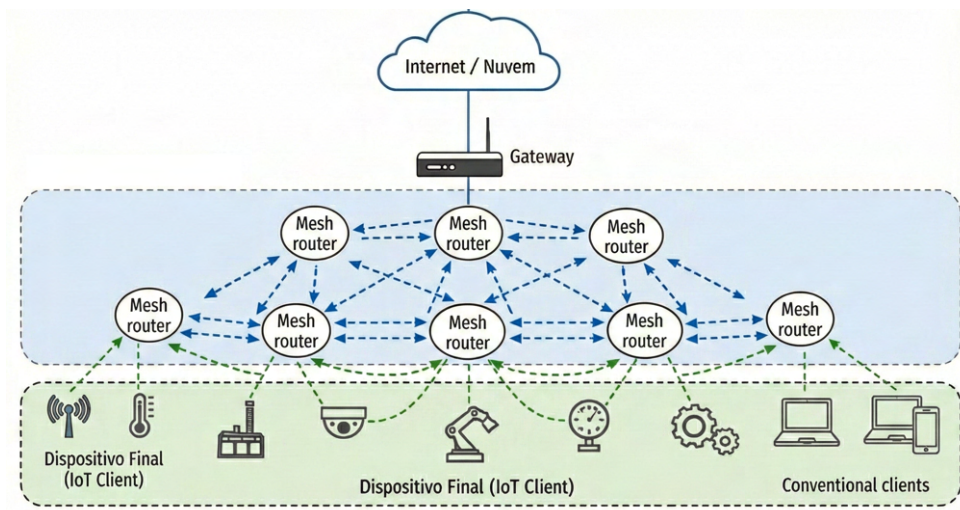
2.0.1 Rede mesh sem fio

2.0.1.1 Visão geral

As WMNs representam uma abordagem descentralizada e dinâmica para a conectividade sem fio. Elas são compostas por nós que se comunicam entre si, onde cada nó pode funcionar simultaneamente como roteador e cliente. Essa capacidade permite que os dados sejam transmitidos por múltiplos saltos até alcançarem o destino final. Essa arquitetura se destaca pela sua alta resiliência e tolerância a falhas. Caso um nó deixe de funcionar, os dados podem ser automaticamente redirecionados por rotas alternativas disponíveis na malha.

Conforme destacado pelo trabalho de Zhang, Luo e Hu (2007), as redes mesh mostram-se eficientes na redução da sobrecarga de conexões ponto a ponto ou ponto a multiponto. Sua estrutura, que pode ser visualizada na Figura 1, é flexível e autorregenerativa, o que a torna eficiente para situações em que a infraestrutura convencional apresenta limitações técnicas ou de viabilidade.

Figura 1 – Topologia de rede mesh



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a compreensão das WMNs, é necessário situá-las no contexto mais amplo das redes sem fio com comunicação multi-saltos, que englobam também as redes móveis ad hoc e as WSNs. Embora as redes móveis ad hoc sejam caracterizadas por elevada dinamicidade e pela ausência de qualquer infraestrutura fixa, as WMNs distinguem-se por apresentarem uma arquitetura relativamente mais estável, composta por nós de retransmissões (roteadores mesh). As WSNs, por sua vez, são constituídas por nós sensores com

restrições de energia e capacidade de processamento, cujo objetivo principal é a coleta de dados do ambiente e o encaminhamento dessas informações a um nó sorvedouro. Em muitos cenários práticos, observa-se a integração dessas arquiteturas, na qual a WSNs podem utilizar a WMNs como infraestrutura de transporte de dados, ou ainda incorporar características de redes móveis ad hoc em ambientes com sensores móveis.

As principais diferenças técnicas entre essas redes estão sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Diferenças entre redes ad hoc sem fio e redes mesh sem fio.

Aspecto	Redes Ad Hoc sem fio	Redes mesh sem fio
Topologia da rede	Altamente dinâmica	Relativamente estática
Mobilidade dos nós de retransmissão	Média a alta	Baixa
Restrição de energia	Alta	Baixa
Características da aplicação	Temporária	Semipermanente ou permanente
Requisitos de infraestrutura	Sem infraestrutura	Infraestrutura parcial ou totalmente fixa
Retransmissão	Por nós móveis	Por nós fixos
Desempenho de roteamento	Totalmente distribuído, com preferência por roteamento sob demanda	Distribuído ou parcialmente distribuído, com preferência por roteamento por tabela ou hierárquico
Implantação	Fácil de implantar	Requer algum planejamento
Características do tráfego	Tipicamente tráfego de usuário	Tipicamente tráfego de usuário e sensores
Cenário de aplicação popular	Comunicação tática	Comunicação tática e civil

Fonte: adaptado de Zhang, Luo e Hu (2007).

Atualmente, no ecossistema da IoT, a arquitetura mesh moderna, fundamentada em padrões como o IEEE 802.11s e tecnologias recentes como o Wi-Fi 6, apresenta elevada escalabilidade e mecanismos aprimorados de autorregeneração (CILFONE et al., 2019). Tais características tornam-se fundamentais em cenários críticos, como aplicações de Indústria 4.0, monitoramento ambiental e automação predial, nos quais a confiabilidade da comunicação é um requisito essencial e a instalação de infraestrutura cabeada é, frequentemente, técnica ou economicamente inviável.

2.0.1.2 Desafios

De acordo com a literatura, redes mesh sem fio apresentam degradação da taxa de transferência de dados à medida que o comprimento do caminho entre os nós aumenta. Um dos principais fatores associados a esse comportamento está relacionado ao funcionamento dos protocolos da camada MAC, especialmente aqueles baseados em acesso múltiplo com detecção de portadora e prevenção de colisão ou CSMA/CA. Por exemplo, quando o nó 1 transmite dados para o nó 2, os nós 2 e 3 não conseguem iniciar novas transmissões simultaneamente. Isso ocorre porque a maioria das interfaces sem fio utilizadas em WMNs opera em modo *half-duplex*, ou seja, não permite a transmissão e recepção de dados ao mesmo tempo. Além disso, o nó 3 detecta o meio ocupado devido à transmissão em andamento entre os nós 1 e 2 e, conseqüentemente, evita iniciar sua própria transmissão. Esse comportamento é conhecido como problema do nó exposto.

Em WMNs com topologia unidimensional (1D), a taxa de transferência de dados tende a degradar-se à medida que o número de saltos aumenta, devido ao compartilhamento do meio sem fio e às interferências entre enlaces adjacentes. Conforme discutido por Zhang, Luo e Hu (2007), em topologias *multihop*, a capacidade efetiva da rede diminui rapidamente nos primeiros saltos, apresentando comportamento aproximadamente proporcional a $1/n$ para um número reduzido de saltos. Para valores mais elevados de n , a taxa de transferência de dados passa a se estabilizar em níveis significativamente baixos, caracterizando um dos principais desafios de escalabilidade.

Outro desafio presente em WMNs com rádio único é a falta de equilíbrio na distribuição da taxa de transferência de dados entre os nós, causada pela assimetria de informação. Esse fenômeno ocorre quando determinados nós possuem mais ou menos visibilidade sobre a atividade do canal em relação a outros, o que impacta diretamente nas decisões de acesso ao meio.

Para superar desafios, existem estratégias e soluções têm sido propostas. Entre as principais abordagens para mitigar esses problemas destacam-se o uso de múltiplas interfaces de rádio para aumentar a capacidade da rede e permitir diversidade de frequência; a implementação de diversidade de canais e comutação dinâmica entre rádios e canais, visando melhorar a tolerância a falhas e reduzir interferências; o balanceamento de carga entre múltiplas interfaces, evitando congestionamentos e gargalos; a agregação de largura de banda, a fim de aumentar a taxa efetiva de transmissão; o gerenciamento eficiente dos recursos da rede, como energia, largura de banda e interfaces, para otimizar o desempenho geral; e a provisão de qualidade de serviço por meio da diferenciação de serviços, garantindo prioridade adequada para diferentes fluxos de dados. Essas técnicas contribuem para a melhoria da robustez, confiabilidade e eficiência da rede, tornando-as mais adequadas para aplicações práticas.

2.0.2 Análise comparativa de tecnologias sem fio para implementação de uma rede mesh

Com base nos estudos apresentados por Rentería-Manjarrez, Ortiz-Carrasco e Gaxiola-Sánchez (2024) e Nguyen et al. (2025), nesta seção são analisadas as principais tecnologias sem fio aplicáveis à implementação de uma rede mesh, com foco em suas características técnicas, vantagens e limitações. São consideradas as tecnologias Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee e LoRa.

2.0.2.1 Wi-Fi

O Wi-Fi, baseado no padrão IEEE 802.11, oferece altas taxas de transmissão de dados e é amplamente utilizado em aplicações que demandam maior largura de banda, como transmissão de vídeo, sistemas de controle e comunicação em tempo real. Opera principalmente nas bandas de 2,4 GHz e 5 GHz, apresentando alcance típico entre 20 m e 100 m, dependendo das características físicas do ambiente, como obstáculos, materiais construtivos e interferências eletromagnéticas.

Embora apresente elevado desempenho e ampla compatibilidade com dispositivos comerciais, o consumo energético do Wi-Fi é relativamente alto, o que pode limitar seu uso em dispositivos alimentados por bateria. Ainda assim, essa tecnologia permanece amplamente empregada em aplicações de IoT e WSNs que exigem maiores taxas de dados.

2.0.2.2 Bluetooth

O Bluetooth, baseado no padrão IEEE 802.15.1, foi desenvolvido para comunicação de curto alcance com baixo consumo de energia, sendo amplamente utilizado em dispositivos pessoais e aplicações de IoT de baixa taxa de dados. Opera na banda de 2,4 GHz e apresenta, em sua configuração típica, alcances de algumas dezenas de metros, dependendo da potência de transmissão e das condições do ambiente. Extensões mais recentes, como o Bluetooth Low Energy (BLE), incluem modos de maior alcance capazes de atingir distâncias superiores em cenários específicos, embora geralmente impliquem maior consumo energético e permaneçam suscetíveis à atenuação causada por características do meio de propagação.

Entre suas principais vantagens destacam-se o baixo custo, a ampla disponibilidade em dispositivos comerciais e a boa eficiência energética. Entretanto, o Bluetooth não oferece suporte nativo robusto a topologias em malha em sua especificação original, o que limita sua escalabilidade em redes distribuídas, especialmente quando comparado a tecnologias projetadas especificamente para esse tipo de aplicação.

2.0.2.3 Lora

Sistemas LoRa utilizam uma tecnologia projetada para comunicação de longo alcance com consumo extremamente reduzido de energia, operando em bandas sub-GHz não licenciadas. Alcança distâncias de vários quilômetros e é ideal para aplicações que enviam pequenas quantidades de dados, como monitoramento ambiental e agricultura inteligente. Sua principal vantagem é o alcance e a longa autonomia de dispositivos alimentados por bateria. Entretanto, possui baixa taxa de transmissão e maior latência, o que a torna inadequada para aplicações que demandam grande volume de dados ou comunicação em tempo real.

2.0.2.4 Zigbee

O Zigbee, baseado no padrão IEEE 802.15.4, foi projetado especificamente para aplicações de baixo consumo de energia e baixa taxa de dados, sendo amplamente empregado em automação residencial e redes de sensores. Esse sistema opera com frequências de 2.4 GHz e também em bandas sub-GHz, oferecendo bom alcance e capacidade de formar redes mesh auto-organizáveis e autorreparáveis. Suporta elevado número de nós e apresenta alta confiabilidade na comunicação. Como limitação, apresenta menor taxa de transmissão e possíveis problemas de interoperabilidade entre fabricantes.

2.0.2.5 Comparativo das tecnologias

Tabela 3 – Comparação entre tecnologias sem fio.

Parâmetro	Wi-Fi	Bluetooth	LoRa	ZigBee
Frequência	2.4 / 5 GHz	2.4 GHz	Sub-GHz	2.4 GHz / 868 / 915 MHz
Protocolo	IEEE 802.11	IEEE 802.15.1	LoRaWAN	IEEE 802.15.4
Alcance	30–200 m	10–100 m	> 10 km	10–100 m
Potência	20–30 dBm	até 20 dBm	10–27 dBm	0–20 dBm
Consumo	Alto	Baixo	Muito baixo	Baixo
Taxa Transm.	até vários Gbps (conforme o sub- padrão)	até 2 Mbps	< 50 kbps	até 250 kbps
Tam. Pacote	200–1500 B	27–251 B	até 256 B	até 127 B
Modulação	OFDM / QAM (conforme o sub- padrão)	GFSK	CSS	DSSS / O-QPSK
Aplicação	Vídeo/ IOT	Wearables	Agricultura / Smart Cities	Automação Resi- dencial

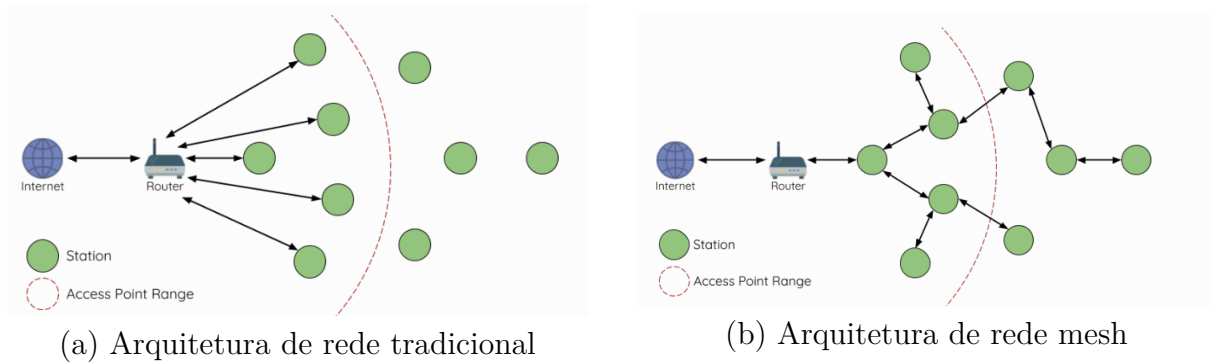
Fonte: adaptado de Rentería-Manjarrez, Ortiz-Carrasco e Gaxiola-Sánchez (2024).

2.0.3 ESP-WIFI-MESH

Com a expansão do IoT, o uso de WMNs surge como uma opção estratégica. As WMNs, ao contrário das redes Wi-Fi de infraestrutura tradicionais (modelo estrela), permitem que os nós da rede se conectem de forma dinâmica e não hierárquica, atuando como hosts e roteadores para retransmitir dados, oferecendo vantagens significativas em implantação, distribuição de carga, resiliência a falhas e adaptabilidade (MORAI; KUNTAWAR, 2021b). Nesse contexto, destaca-se a biblioteca ESP-WIFI-MESH, desenvolvido pela Espressif, fabricante dos microcontroladores ESP32, amplamente utilizados em soluções de IoT devido ao seu custo acessível e à sua versatilidade. Essa biblioteca permite que múltiplos nós se auto-organizem, formando uma rede local sem fio com maior área de cobertura e menos suscetível à sobrecarga, já que não depende de um ponto de acesso central. Diversas aplicações têm explorado esse potencial. Como exemplo, destaca-se a pesquisa de Wang et al. (2022) que desenvolve um sistema de treinamento de agilidade para esportes universitários baseado em uma rede mesh sem fio.

A Figura 2(a) e a Figura 2(b) comparam a arquitetura tradicional com a arquitetura em rede mesh. Na arquitetura tradicional, cada nó, um ESP32, conecta-se diretamente ao roteador Wi-Fi, exigindo que todos os dispositivos estejam dentro do alcance do roteador central. Já na arquitetura mesh, apenas o nó raiz se conecta diretamente ao roteador. Os demais nós podem se interconectar entre si, formando a topologia em malha.

Figura 2 – Comparação entre arquiteturas de rede



Fonte: retirado de Espressif Systems (2025a)

Nesta implementação da Espressif, é utilizado a infraestrutura padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi) e é projetado para formar uma rede em malha autoconfigurável e auto-recuperável entre dispositivos ESP. Em vez de depender de múltiplas interfaces de rádio, o ESP-WIFI-MESH trabalha com uma única interface Wi-Fi, mas emprega uma arquitetura inteligente para formar uma topologia hierárquica em árvore.

A Tabela 4 resume as principais características desse protocolo.

Tabela 4 – Principais características do ESP-WIFI-MESH.

Característica	Descrição
Topologia em árvore	Um nó raiz se conecta ao roteador Wi-Fi, e os demais nós formam ramos em uma estrutura hierárquica.
Interface única	Todos os nós utilizam um único rádio Wi-Fi (padrão IEEE 802.11).
Autoconfiguração	Os nós descobrem automaticamente seus vizinhos e se organizam na malha.
Roteamento por saltos	Pacotes são roteados em múltiplos saltos até o nó raiz ou entre os nós da malha.
Auto-recuperação	A rede se reorganiza automaticamente em caso de falhas ou mudanças na topologia.
Gerenciamento de energia	Suporte a modos de baixo consumo para otimização energética, especialmente em dispositivos sensores.
<i>Broadcast</i> e <i>Unicast</i> suportados	Permite o envio de dados para todos os nós (<i>broadcast</i>) ou para um nó específico (<i>unicast</i>).
Segurança	A transmissão de dados utiliza criptografia Wi-Fi WPA2-PSK e a rede de malha emprega criptografia AES.
Tamanho da malha escalável	Pode suportar dezenas a centenas de nós, dependendo da configuração e do uso da rede.

Fonte: adaptado de Espressif Systems (2025a).

Com base na documentação fornecida por Espressif Systems (2025a), as seções a seguir apresentam um aprofundamento sobre a biblioteca ESP-WIFI-MESH.

2.0.3.1 Topologia

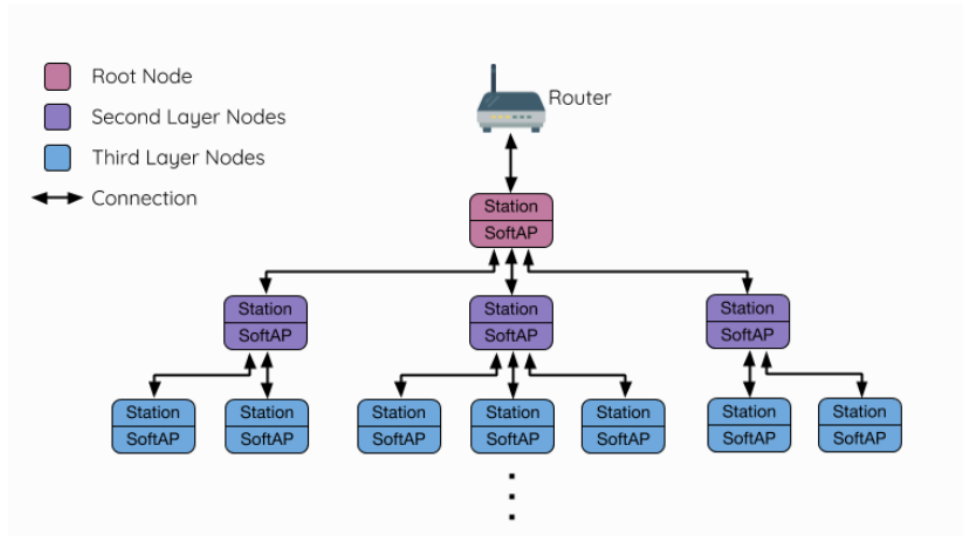
A topologia da *ESP-WIFI-MESH* permite que cada nó opere simultaneamente como estação e ponto de acesso (do inglês, *softAP*) conforme demonstrado na Figura 3. Isso significa que cada nó pode manter múltiplas conexões *downstream*, utilizando sua interface *softAP*. E, ao mesmo tempo, mantém uma única conexão *upstream* com seu nó pai por meio da interface estação.

Essa configuração cria uma estrutura de árvore balanceada, eficiente para propagação de dados entre os nós.

2.0.3.2 Roteamento de pacotes

A comunicação entre os nós da rede segue um modelo de roteamento hierárquico, baseado em dois sentidos principais de encaminhamento. No sentido *downstream*, quando o endereço MAC de destino pertence à sub-rede do nó atual, isto é, encontra-se em uma de suas subtabelas de roteamento, o pacote é encaminhado diretamente ao nó filho correspondente, caracterizando a comunicação entre um nó e seus nós descendentes. Por

Figura 3 – Topologia típica da ESP-WIFI-MESH.



Fonte: Espressif, 2025

outro lado, no sentido *upstream*, quando o destino não pertence à sub-rede local, o pacote é encaminhado ao nó pai, crescendo na hierarquia da rede até alcançar o nó raiz, que possui uma visão global da topologia e das rotas disponíveis.

2.0.3.3 Formação da rede

A construção da rede mesh ocorre em etapas, iniciando-se pela seleção do nó raiz e evoluindo para a organização hierárquica dos nós em camadas. O nó raiz pode ser previamente definido pelo desenvolvedor durante a configuração inicial ou eleito dinamicamente com base na qualidade do sinal estabelecido com o roteador Wi-Fi. A partir dessa etapa, nós ociosos que se encontram dentro do alcance do nó raiz passam a se conectar a ele, constituindo a segunda camada da rede e atuando como intermediários no encaminhamento de pacotes. À medida que a rede se expande, nós adicionais estabelecem conexão com esses intermediários conforme a disponibilidade de enlace, formando camadas subseqüentes e ampliando a topologia em malha. Para garantir a estabilidade e o desempenho da comunicação, a profundidade máxima da árvore é limitada, de modo que os nós localizados no nível máximo tornam-se folhas, impedindo a criação de conexões adicionais abaixo desse limite.

2.0.3.4 Tabelas de roteamento

Cada nó da rede ESP-WIFI-MESH possui uma tabela de roteamento individual, utilizada para direcionar corretamente os pacotes até o nó de destino. Essa tabela inclui os endereços MAC de todos os nós que fazem parte da sub-rede daquele nó, incluindo o próprio. Internamente, a tabela é organizada em subtabelas, sendo que cada uma corresponde a um nó filho e à sua respectiva sub-rede.

A comunicação na rede ocorre por meio dos pacotes ESP-WIFI-MESH, que são transmitidos dentro do corpo dos quadros de dados do Wi-Fi. Quando um pacote precisa atravessar mais de um nó para alcançar o destino, ele é repassado por diferentes quadros Wi-Fi a cada salto.

Esses pacotes são compostos por duas partes principais, sendo um cabeçalho, que contém os endereços MAC de origem e destino, além de informações adicionais no campo de opções, como a identificação de pacotes de *broadcast* ou pacotes provenientes da rede IP externa e uma carga útil (do inglês, *payload*), que transporta os dados enviados pela aplicação, podendo estar em formato binário ou codificados em protocolos como HTTP, MQTT ou JSON.

2.0.3.5 Gerenciamento da rede

O ESP-WIFI-MESH é capaz de detectar e corrigir falhas no roteamento, que podem ocorrer devido à interrupção de nós pais ou à instabilidade dos enlaces. Quando o nó raiz falha, os nós da camada seguinte tentam se reconectar e, caso não obtenham sucesso, iniciam um novo processo de eleição, exceto quando o nó raiz é definido manualmente. Em situações de falha de nós pais intermediários, os nós filhos buscam restabelecer a conexão ou, alternativamente, selecionar um novo nó pai com base na qualidade do sinal disponível.

A comutação do nó raiz não ocorre automaticamente em função da degradação do sinal, sendo realizada apenas em casos de falha total do nó raiz ou por solicitação manual do próprio nó. Além disso, nós filhos podem alterar automaticamente seu nó pai ao identificar uma conexão com menor profundidade e melhor qualidade de sinal, processo viabilizado pela transmissão periódica de quadros de *beacon* pelos nós pais.

2.0.3.6 API de programação da ESP-WIFI-MESH

A API do ESP-WIFI-MESH disponibiliza um conjunto de funções destinadas à inicialização, configuração e comunicação entre os nós da rede. No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas rotinas relacionadas à organização da malha e à troca de dados entre os dispositivos.

Os principais protótipos das funções empregadas encontram-se apresentados no Apêndice A.

2.0.4 Critérios de avaliação e análise de desempenho da Rede Wi-Fi mesh

A avaliação de desempenho em redes Wi-Fi mesh é fundamental para compreender os limites operacionais de protocolos e plataformas de *hardware* específicos, especialmente em cenários *multi-hop* e de rádio único. Para isso, este trabalho adota métricas utilizadas

na literatura para a caracterização de redes sem fio distribuídas, permitindo a análise comparativa do comportamento da rede sob diferentes condições de operação.

Entre as métricas avaliadas destacam-se a latência fim-a-fim, a taxa de transferência de dados, a taxa de entrega de pacotes, a perda de pacotes, o *jitter* e os tempos de formação e reconfiguração da rede. Essas métricas possibilitam avaliar tanto o desempenho temporal da comunicação quanto sua confiabilidade e estabilidade em topologias de diferentes tamanhos.

Para a interpretação dos resultados de desempenho, adotam-se parâmetros de comparação baseados em normas de Qualidade de Serviço (QoS) e em modelos teóricos de redes. De acordo com a recomendação ITU-T G.1010, aplicações de monitoramento e sensoriamento, classificadas como serviços de baixa prioridade ou *bulk data*, toleram latências da ordem de segundos, desde que a taxa de entrega de pacotes permaneça elevada, tipicamente acima de 95% (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001). Esses critérios são compatíveis com aplicações de Internet das Coisas voltadas ao monitoramento ambiental e industrial.

No contexto de redes Wi-Fi mesh com rádio único, a literatura indica que a capacidade teórica da taxa de transferência de dados degrada-se aproximadamente de forma inversamente proporcional ao número de saltos da rede, devido à contenção do meio e às colisões inerentes ao mecanismo de acesso CSMA/CA (ZHANG; LUO; HU, 2007). Assim, espera-se que a expansão da topologia resulte em aumento da latência e redução da taxa de transferência de dados agregada, mesmo em cenários com tráfego moderado.

No que se refere à camada física, a qualidade do enlace é avaliada por meio das métricas de RSSI e SNR. Valores de RSSI inferiores a aproximadamente -80 dBm são comumente associados a regiões de maior instabilidade e maior probabilidade de perdas e desconexões em redes Wi-Fi (ZHAO; GUIBAS, 2004). A análise da propagação do sinal pode ser complementada por modelos clássicos de propagação, os quais descrevem o comportamento da potência do sinal entre transmissor e receptor considerando efeitos de atenuação, interferência, reflexões e obstáculos.

Em cenários ideais de espaço livre, a propagação direta pode ser modelada pela equação de Friis, utilizada como referência teórica para compreender a degradação do sinal com a distância, ainda que ambientes reais internos apresentem comportamento mais complexo devido ao percurso e à presença de obstáculos (KARL; WILLIG, 2007).

$$P_{recv}(d) = \frac{P_{tx} \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}, \quad (2.1)$$

onde P_{recv} representa a potência recebida a uma distância d , P_{tx} corresponde à potência de transmissão, G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente, λ representa o comprimento de onda e L corresponde ao fator de perdas do meio.

Para cenários com obstruções e sombreamento, utiliza-se o modelo generalizado de perda de percurso, expresso por:

$$P_{recv}(d) = P_{recv}(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-\gamma}, \quad (2.2)$$

em que d_0 é a distância de referência e γ corresponde ao expoente de perda de percurso, dependente das características do ambiente de propagação.

2.0.5 Segurança em aplicações de redes sem fio

As WMNs e a IoT são fundamentais para ecossistemas conectados, mas enfrentam desafios de segurança devido às limitações computacionais, de energia e de memória (SAHA, 2024). Segundo Tariq et al. (2023), essas redes são suscetíveis a diversas ameaças, como a interceptação de dados, o ataque do tipo MitM, o ataque de DoS e a clonagem de nós. Em ambientes sem fio, destaca-se ainda o ataque de *sinkhole*, no qual um nó malicioso atrai e desvia o tráfego da rede. Para mitigar esses riscos, o padrão AES é um dos principais mecanismos de defesa, atuando como um padrão de criptografia eficiente para proteger a confidencialidade dos dados contra acessos não autorizados (SAHA, 2024).

No contexto do ESP-WIFI-MESH, conforme descrito na documentação oficial fornecida por Espressif Systems (2025a), a arquitetura da rede é construída sobre o padrão IEEE 802.11, herdando os mecanismos de segurança nativos do Wi-Fi, como WPA2-PSK, WPA3-SAE e PMF. Dessa forma, a autenticação e a confidencialidade do tráfego de dados são garantidas pelos protocolos de segurança do enlace.

Além da proteção provida pelo Wi-Fi, o framework do ESP-WIFI-MESH implementa mecanismos adicionais de segurança para o controle da topologia. As mensagens de gerenciamento, responsáveis por descoberta de nós, estabelecimento de relações pai-filho e manutenção da árvore mesh, são encapsuladas em IE específicos e protegidas por criptografia baseada em AES, conforme apresentado por Espressif Systems (2025a).

Esses mecanismos contribuem para mitigar ataques como interceptação de mensagens de controle, inserção de nós não autorizados e manipulação da estrutura hierárquica da rede. Entretanto, por operar sobre Wi-Fi tradicional, a segurança global da rede permanece fortemente dependente da configuração adequada de credenciais e do gerenciamento seguro das chaves criptográficas, conforme discutido na literatura sobre segurança em redes mesh, baseadas na recomendação IEEE 802.11 (YI et al., 2009).

2.0.6 Protocolo MQTT

O *MQTT* é um protocolo de comunicação leve e eficiente, projetado para cenários com restrições de largura de banda, alta latência e dispositivos com recursos limitados, condições encontradas em aplicações de IoT. Seu modelo de funcionamento é baseado na arquitetura publicação/assinatura (do inglês, *publish/subscribe*), onde os dispositivos publicadores enviam mensagens a tópicos específicos, e os dispositivos assinantes recebem

as mensagens desses tópicos por meio de um servidor intermediário, conhecido como *broker*.

Essa abordagem desacopla completamente os emissores dos receptores, promovendo escalabilidade, simplicidade de implementação e redução de tráfego desnecessário na rede. O protocolo opera sobre o padrão TCP/IP e pode utilizar o protocolo TLS para garantir comunicação segura entre os dispositivos.

Dentre os *brokers* MQTT disponíveis, o Eclipse Mosquitto é um dos mais populares. Trata-se de um *software* livre, leve e confiável, amplamente adotado tanto em sistemas embarcados quanto em servidores com maior capacidade de processamento. O Mosquitto atua como o ponto central na comunicação MQTT, recebendo as mensagens publicadas e roteando-as de forma eficiente para todos os clientes assinantes correspondentes (Eclipse Foundation, 2025).

O MQTT suporta diferentes níveis de *QoS*, permitindo ao desenvolvedor balancear entre confiabilidade da entrega e custo de comunicação, o que o torna adequado para aplicações que variam desde automação residencial até monitoramento industrial em larga escala (OASIS, 2019).

2.0.7 NODE-RED

Ferramentas de desenvolvimento *low-code* têm se tornado populares em aplicações de IoT por facilitarem a criação de fluxos de dados e automações sem a necessidade de conhecimentos avançados em programação. Nesse contexto, destaca-se a plataforma Node-RED, conforme descrito em sua documentação oficial Node-RED (2025a).

Desenvolvido inicialmente pela empresa IBM, o Node-RED é uma ferramenta baseada em fluxo visual, construída sobre o Node.js. Ela permite integrar sensores, atuadores, APIs e serviços em nuvem utilizando uma interface gráfica intuitiva baseada em blocos. Com uma arquitetura modular e orientada a eventos, o Node-RED permite que diferentes dispositivos e serviços troquem informações de forma fluida, mesmo em sistemas heterogêneos. Cada nó representa uma função específica como entrada, processamento ou saída de dados e pode ser facilmente configurado para se comunicar com sensores físicos, bancos de dados ou plataformas em nuvem.

Um dos grandes diferenciais do Node-RED está na sua extensibilidade. A plataforma possui uma ampla biblioteca de nós mantidas, que pode ser expandida com componentes desenvolvidos pela comunidade ou personalizados conforme a necessidade do projeto.

De acordo com Uzougbo, Olanrewaju e Kayode (2024), o Node-RED se destaca por seu desempenho na análise e visualização de dados em tempo real, oferecendo suporte direto à criação de dashboards interativos. Esses painéis permitem que os usuários acompanhem o comportamento de variáveis monitoradas, detectem anomalias e atuem rapidamente sobre eventos críticos do sistema.

Outro aspecto importante é a compatibilidade com diferentes tipos de microcontroladores frequentemente utilizados em sistemas embarcados, tais como Raspberry Pi e ESP32, o que possibilita sua execução em ambientes com recursos limitados. Isso favorece o uso do Node-RED em computação de borda minimizando a dependência da nuvem e reduzindo a latência na tomada de decisão. Sendo muito aplicada em áreas como automação residencial, agricultura.

2.0.8 SQLite

O SQLite é um sistema de gerenciamento de banco de dados relacional (SGBDR) de código aberto que se destaca pela sua arquitetura *serverless*. Diferente dos modelos convencionais cliente-servidor, o SQLite é implementado como uma biblioteca em C que é integrada diretamente à aplicação, eliminando a necessidade de um processo de servidor intermediário para o gerenciamento dos dados (HIPPI, 2020).

Essa característica permite que a base de dados seja armazenada em um único arquivo comum no disco rígido, o que simplifica a portabilidade e reduz o *overhead* de configuração. No contexto de sistemas embarcados e dispositivos IoT, o SQLite é frequentemente adotado devido ao seu baixo consumo de recursos (memória e processamento) e total conformidade com as propriedades ACID (do inglês, *Atomicity, Consistency, Isolation, and Durability*), garantindo a integridade dos dados mesmo em situações de falha de energia ou interrupções abruptas do sistema (OWENS, 2010).

2.1 Considerações parciais

Neste capítulo foram apresentados os principais fundamentos teóricos relacionados às redes mesh sem fio, destacando suas características de auto-organização, resiliência e comunicação multi-saltos, bem como os desafios inerentes à arquitetura, como degradação de taxa de transferência de dados com o aumento do número de saltos, limitações do *half-duplex* e problemas de equidade na distribuição da taxa de transferência de dados. Além disso, foram discutidos aspectos de propagação de sinal e métricas relevantes para avaliação de desempenho, tais como latência, RSSI e modelos de perda de percurso.

Também foi realizada uma análise comparativa entre tecnologias sem fio aplicáveis à implementação de redes em malha, contemplando Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee e LoRa. Essa comparação evidenciou que, apesar do maior consumo energético, o Wi-Fi se destaca em cenários que demandam maior taxa de transmissão e integração com infraestrutura existente, justificando sua adoção neste trabalho em conjunto com a biblioteca ESP-WIFI-MESH.

Na sequência, foram apresentados os conceitos centrais da biblioteca ESP-WIFI-MESH, incluindo topologia em árvore, mecanismos de formação e gerenciamento da rede,

roteamento hierárquico e aspectos de segurança. Complementarmente, foram discutidas as tecnologias de apoio utilizadas no sistema, como MQTT para comunicação baseada em publicação/assinatura, Node-RED para integração e visualização de dados, e SQLite para armazenamento local com baixo *overhead*, adequados ao contexto de aplicações de IoT.

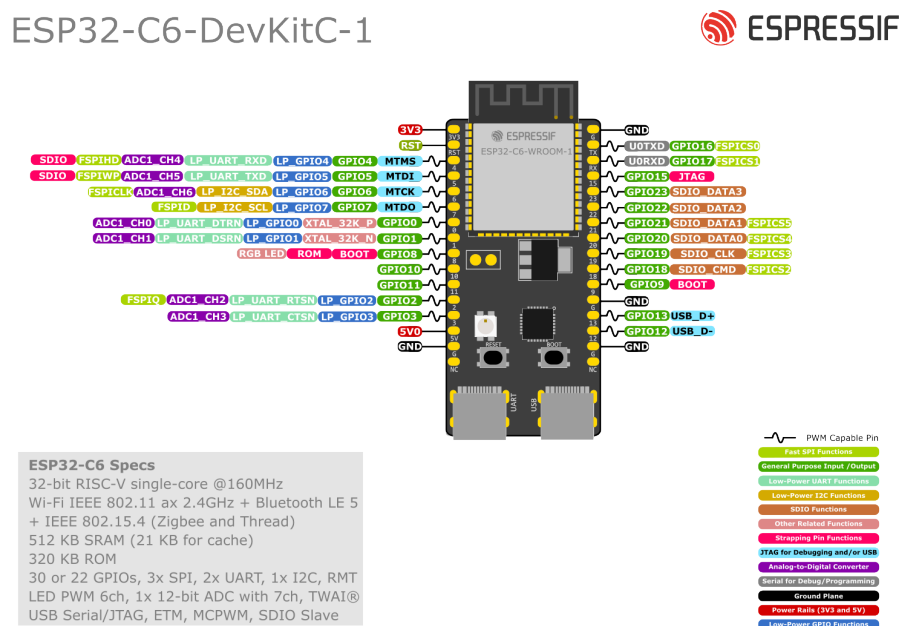
Com base nessa fundamentação, o próximo capítulo descreve o desenvolvimento para implementação da rede e definição da metodologia experimental.

3 Desenvolvimento do trabalho

3.1 ESP32-C6-DevKitC-1 v1.2

Neste trabalho, o kit de desenvolvimento ESP32-C6-DevKitC-1 v1.2 foi utilizado como plataforma base para implementar e caracterizar a rede Wi-Fi mesh. Este kit, integra o microcontrolador ESP32-C6-WROOM-1 que oferece suporte para Wi-Fi 6 na banda de 2,4 GHz, Bluetooth 5 e o padrão IEEE 802.15.4 (compatível com Zigbee 3.0 e *Thread* 1.3), ideal para diversos cenários de conectividade. Além disso, possui 8 MB de memória *flash*, SPI e uma antena integrada. A disposição completa dos pinos do microcontrolador está detalhada na Figura 4.

Figura 4 – Pinout ESP32-C6-DevKitC-1.



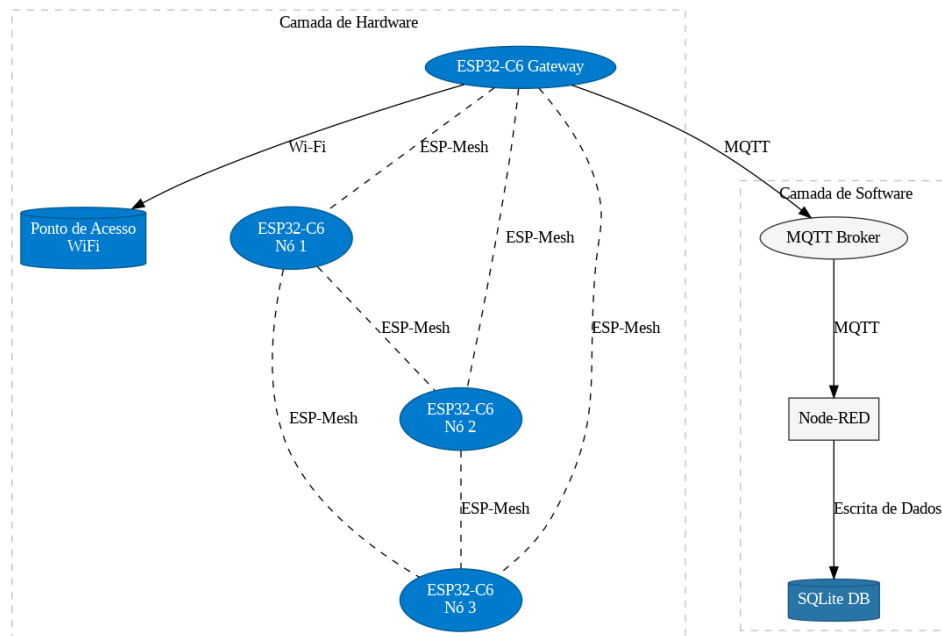
Fonte: Retirado de Espressif Systems (2025b)

3.2 Arquitetura proposta

A arquitetura proposta, apresentada na Figura 5, está dividida em duas camadas principais: *hardware* e *software*.

Na camada de *hardware*, os componentes físicos interagem para coletar e transmitir dados. A rede é composta por um conjunto de microcontroladores ESP32-C6 organizados em uma topologia de malha. Nessa configuração, um dos dispositivos atua como ESP32-C6

Figura 5 – Arquitetura geral da solução proposta, composta pela rede mesh local com módulos ESP32-C6, pela interface de monitoramento e banco de dados.



Fonte: Elaborado pela autora.

gateway, desempenhando o papel de nó central da rede. Esse *gateway* funciona como uma ponte entre a rede Wi-Fi mesh local e a rede Wi-Fi convencional, sendo responsável por receber os dados provenientes dos demais nós da malha e encaminhá-los para a camada de software. Além disso, o ESP32-C6 *gateway* estabelece conexão com um ponto de acesso Wi-Fi padrão, possibilitando o acesso à Internet. Os demais dispositivos, denominados ESP32-C6 Nós, correspondem aos elementos periféricos da rede, comunicando-se entre si e com o *gateway* por meio da biblioteca ESP-WIFI-MESH, o que garante a formação e a manutenção da topologia em malha.

A camada de *software* é responsável pelo processamento, armazenamento e visualização dos dados recebidos da camada de hardware. Inicialmente, o ESP32-C6 *gateway* utiliza o protocolo MQTT para publicar os dados coletados, enviando-os a um *broker* MQTT, que atua como intermediário no processo de comunicação, recebendo as mensagens e distribuindo-as aos clientes assinantes. Em seguida, o Node-RED conecta-se ao *broker* MQTT como assinante, permitindo a construção de fluxos de dados por meio de programação visual. Nessa etapa, os dados podem ser processados, filtrados ou enriquecidos conforme as necessidades da aplicação. Por fim, os dados tratados são armazenados em um banco de dados SQLite, para o qual o Node-RED realiza a escrita das informações. A escolha do SQLite deve-se ao seu caráter leve e à dispensa de um servidor dedicado, sendo adequado para o armazenamento local dos dados utilizados na etapa de caracterização do desempenho da rede.

O ESP-IDF (do inglês, *Espressif IoT Development Framework*) é o conjunto de

ferramentas e bibliotecas oficiais para desenvolver aplicações para os microcontroladores da Espressif, como o ESP32-C6. Sua configuração envolve a instalação de um conjunto de ferramentas de compilação, o SDK (Software Development Kit) e um ambiente de linha de comando. Para este projeto, foi utilizada a versão mais recente e estável do ESP-IDF, a configuração do *framework* permitiu a escrita e a compilação do *firmware* que implementa a rede mesh local.

O *broker* Mosquitto foi empregado como o MQTT *broker*, o servidor responsável por gerenciar a comunicação entre o ESP32-C6 *gateway* e a camada de software. A instalação foi realizada localmente em uma máquina Windows. A configuração padrão do Mosquitto é suficiente para o projeto, exigindo apenas que os clientes se conectassem ao endereço IP do servidor, utilizando a porta padrão 1883.

O Node-RED foi escolhido para a criação do painel de monitoramento devido à sua natureza visual e à facilidade de integração com o protocolo MQTT. A ferramenta foi instalada em ambiente local e configurada para se conectar ao Mosquitto *broker*. No Node-RED, foram criados nós de entrada MQTT para receber os dados publicados pelo *gateway*. A partir disso, o fluxo de trabalho foi construído para processar as mensagens, extrair leituras de sensores e métricas como latência e RSSI, e exibir essas informações em um painel interativo (*dashboard*) (Node-RED, 2025b).

Para o armazenamento local e persistente dos dados, foi utilizado o banco de dados SQLite. Sua arquitetura serverless o torna ideal para este projeto, pois não exige um servidor de banco de dados dedicado. O banco de dados foi configurado localmente, criando um arquivo nomeado como *tcc.db*. Um nó de banco de dados do Node-RED foi configurado para receber os dados processados e, através de comandos SQL, inseri-los nas tabelas do *tcc.db*.

3.3 Arquitetura e configuração operacional da rede mesh

3.3.1 *Firmware*

O *firmware* da rede mesh foi configurado com parâmetros que garantem flexibilidade, escalabilidade e segurança na comunicação. O canal de operação da rede pode ser definido entre os canais 1 e 11, alternativamente, é possível utilizar o valor 0, caso em que a rede mesh é automaticamente ajustada para operar no mesmo canal do ponto de acesso Wi-Fi. Quanto à topologia, a rede suporta até seis camadas hierárquicas e um total máximo de 50 nós conectados. O mecanismo de auto-organização foi habilitado por meio de uma função disponibilizada na biblioteca, permitindo que a rede se organize e se recupere automaticamente, ajustando sua topologia conforme alterações nas condições de comunicação. Em relação à segurança, a rede utiliza o padrão WPA2/PSK para autenticação e proteção da comunicação Wi-Fi. Esse protocolo emprega o algoritmo de criptografia

AES, garantindo a confidencialidade e a integridade dos dados transmitidos entre os nós da rede mesh e o ponto de acesso.

3.3.2 Comunicação e pacotes

O pacote utilizado na comunicação da rede mesh contém o endereço MAC de origem, um identificador de tipo de mensagem, o número de bytes do *payload*, os dados transmitidos e, por fim, um campo de verificação CRC-16, responsável por garantir a integridade da informação.

O campo ID define o tipo de mensagem transportada no pacote e permite que o *gateway* interprete corretamente o conteúdo recebido. Os identificadores utilizados neste trabalho estão apresentados na tabela 5

Tabela 5 – Identificadores de mensagens utilizados na comunicação da rede mesh.

ID	Descrição
0x01 (CMD_ROUTE_TABLE)	Utilizado para o envio da tabela de roteamento, contendo informações sobre a topologia da rede e as relações de vizinhança entre os nós.
0x02 (CMD_METRICS)	Responsável pelo envio de métricas gerais da rede, incluindo número de camadas, quantidade de nós filhos, taxa de sucesso e perda de pacotes, além da indicação de eventuais trocas do nó <i>gateway</i> .
0x03 (CMD_SENSOR)	Utilizado para a transmissão dos dados coletados pelos nós filhos, como temperatura, umidade, latência de envio, RSSI, bem como métricas do sistema, incluindo uso de CPU e memória <i>heap</i> .
0xAA (CMD_SYNC_TIME)	Empregado para a sincronização temporal entre os nós da rede mesh.

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.3 Publicação de dados pelo *gateway*.

O nó *gateway* é o responsável por publicar os dados recebidos da rede. Os dados gerados pela rede mesh são organizados e publicados em diferentes tópicos MQTT, de acordo com o tipo de informação transportada. O tópico `/topic/mesh/sensor` é utilizado para a transmissão dos dados coletados pelos nós de origem, incluindo endereço MAC, valores de temperatura e umidade, latência de envio, número de *hops* percorridos até o *gateway*, além de métricas do sistema, como uso de CPU e memória *heap*. Já o tópico `/topic/mesh/rssi` é destinado à publicação de informações relacionadas à qualidade do enlace, contendo o endereço MAC do nó, o valor do RSSI e o endereço MAC do nó pai. O tópico `/topic/mesh/metrics` concentra métricas gerais do sistema, reportando dados

como o número de camadas da rede, a quantidade de nós filhos conectados e as taxas de sucesso e perda de pacotes. Por fim, o tópico `/topic/mesh/sistema_root` é utilizado para a divulgação do estado operacional do *gateway*, incluindo informações sobre o uso de CPU e da memória *heap*.

3.3.4 Sincronização de tempo

Para garantir a precisão no cálculo das latências, o nó *gateway* distribui o horário de referência para todos os outros nós. Essa sincronização inicial ocorre quando a rede é ligada, e o processo se repete sempre que um novo nó entra na rede ou se detecta alguma dessincronização entre os dispositivos.

3.3.5 Construção painel no *software* Node-RED

A Figura 6 ilustra a implementação do fluxo de processamento no Node-RED para recepção e visualização dos dados transmitidos pelo ESP32-C6 *gateway*.

O fluxo completo para a coleta e visualização dos dados transmitidos pelo ESP32-C6 *gateway* e armazenamento dos dados, incluindo a estruturação das mensagens e a persistência no banco de dados SQLite, encontra-se detalhado no Apêndice B.

Figura 6 – Fluxo no *software* Node-RED



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.6 Estrutura das tabelas no banco de dados

Para o armazenamento das informações coletadas durante os experimentos, foram estruturadas tabelas específicas no banco de dados SQLite, contemplando métricas gerais da rede, qualidade do sinal, dados de sensores e parâmetros de uso dos microcontroladores.

A descrição detalhada da estrutura das tabelas e seus respectivos campos encontra-se apresentada no Apêndice C.

3.4 Metodologia experimental e caracterização da rede

3.4.0.1 Parâmetros de configuração do experimento

A Tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados nos experimentos, juntamente com os valores máximos ou limites indicados na documentação do fabricante, quando dis-

poníveis, permitindo a comparação entre os limites teóricos e os valores adotados neste trabalho.

Tabela 6 – Parâmetros de configuração utilizados nos experimentos com ESP-WIFI-MESH e respectivos valores de referência da documentação.

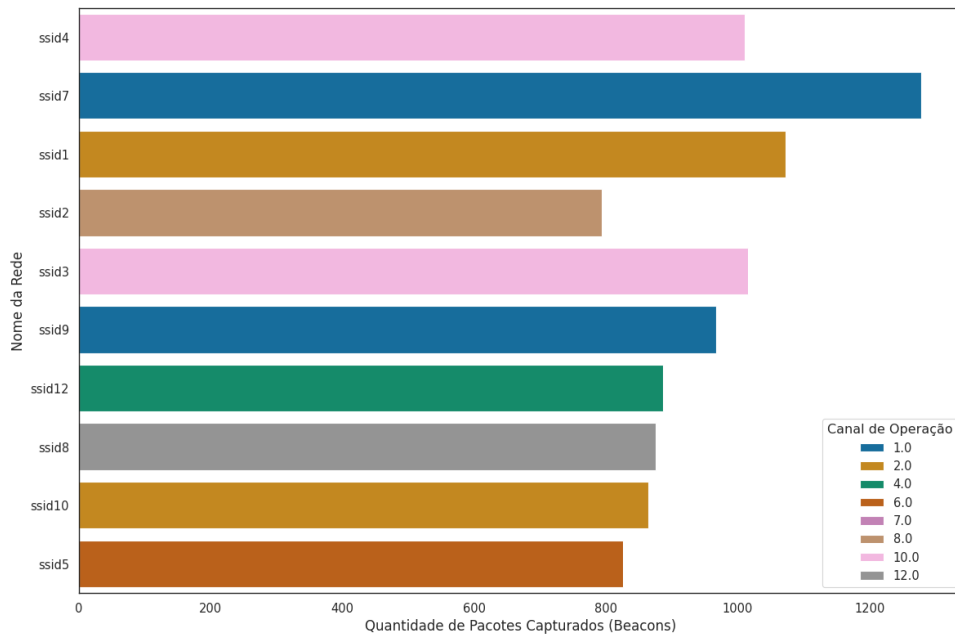
Parâmetro	Valor utilizado	Valor de referência
Máximo de conexões por nó mesh AP	6	Configurável (limitado pela memória disponível)
Número máximo de camadas (saltos)	6	Até 25 (topologia em árvore) ou até 1000 (cadeia)
Tamanho da tabela de roteamento	50 nós	Até 1000 nós (recomendado inferior a 512)
Tamanho máximo do pacote de dados	1024 B	1456 B
Limiar de votação para eleição do nó raiz	90%	90% (valor padrão)
Intervalo de beacon Wi-Fi	100 ms	100 ms a 60 s
Tempo de expiração de associação do <i>softAP</i>	10 s	Configurável
Critério de seleção do nó pai baseado no RSSI	Dinâmico	-78, -82 e -85 dBm (qualidade alta, média e baixa)

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.1 Ambiente de teste

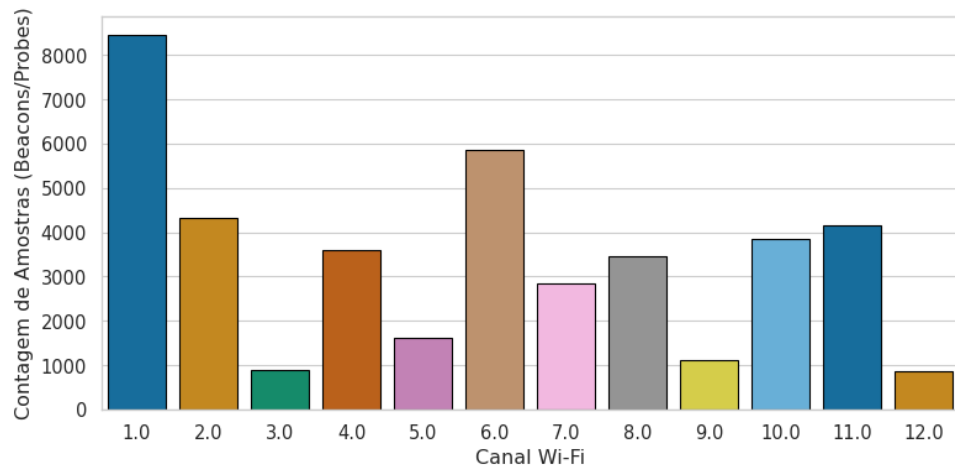
Os experimentos foram conduzidos em ambiente interno, caracterizado por tráfego Wi-Fi previamente existente e presença de múltiplos pontos de acesso operando simultaneamente. As Figuras 7 e 8 evidenciam a heterogeneidade do espectro, com diversas redes ativas distribuídas em diferentes canais, destacando-se maior concentração de tráfego nos canais tradicionais 1, 6 e 11, amplamente utilizados por roteadores domésticos e corporativos. Observa-se ainda que a quantidade de quadros de gerenciamento varia entre as redes.

Por se tratar de um cenário real de operação, o ambiente apresenta dinamicidade significativa, incluindo variações na atividade das redes vizinhas, alternância dos canais de operação e mudanças no nível de ocupação do espectro ao longo do tempo. Além disso, por ser um espaço interno, o meio também está sujeito a efeitos como multipercurso, obstruções físicas e possíveis zonas sombra, fatores que podem impactar diretamente métricas de desempenho como RSSI, perda de pacotes e taxa de transferência de dados. Esse contexto reforça que os resultados obtidos refletem uma condição prática e realista, aproximando os experimentos de situações reais de uso de redes mesh Wi-Fi.

Figura 7 – AP com maior ocupação de *airtime*.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 8 – Ocupação por canal.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.2 Cenários de avaliação

Para a caracterização do desempenho da rede mesh, foram realizados diferentes experimentos com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema sob variadas condições de operação. Os testes contemplaram análises relacionadas à influência da distância entre os nós, estabilidade da rede, processos de reconexão, taxa de transferência de dados, impacto do canal de comunicação e escalabilidade da malha.

Inicialmente, foram conduzidos experimentos para avaliar a influência da distância entre os nós e o *gateway*. Para isso, variou-se progressivamente o posicionamento de um nó

em relação ao *gateway*, permitindo analisar o impacto da atenuação do sinal nas métricas de desempenho, como RSSI e latência.

Também foram realizados testes de desconexão e reconexão, com múltiplas repetições, a fim de avaliar a capacidade de auto-organização e recuperação da rede. Paralelamente, foram conduzidos experimentos de taxa de transferência de dados, igualmente repetidos diversas vezes, para garantir confiabilidade estatística dos resultados.

Por fim, foram executados experimentos voltados à análise da escalabilidade da rede, mantendo diferentes configurações operando continuamente por períodos prolongados, com o objetivo de avaliar estabilidade, consistência operacional e impacto do aumento do número de nós nas métricas de desempenho.

3.5 Considerações parciais

Este capítulo descreveu o desenvolvimento do trabalho, apresentando a plataforma utilizada e a arquitetura proposta para implementação e monitoramento da rede Wi-Fi mesh. Foram detalhados o kit ESP32-C6-DevKitC-1, a organização da solução em camadas de hardware e software e os componentes de suporte empregados, incluindo o *framework* ESP-IDF, o *broker* Mosquitto, o Node-RED e o banco de dados SQLite.

Também foram especificados os principais aspectos operacionais da rede mesh, contemplando parâmetros de *firmware*, formato dos pacotes de dados, identificadores de mensagens, publicação em tópicos MQTT e sincronização temporal entre os nós. Essas definições estabeleceram a base necessária para coleta consistente das métricas, permitindo relacionar o comportamento observado aos mecanismos de roteamento e organização dinâmica da malha.

Por fim, foram apresentados o ambiente de teste e os cenários experimentais adotados para a caracterização do desempenho, incluindo variação de distância, testes de reconexão, medições da taxa de transferência e avaliação de escalabilidade. O capítulo seguinte apresenta e discute os resultados obtidos, analisando o desempenho da rede sob as diferentes configurações avaliadas.

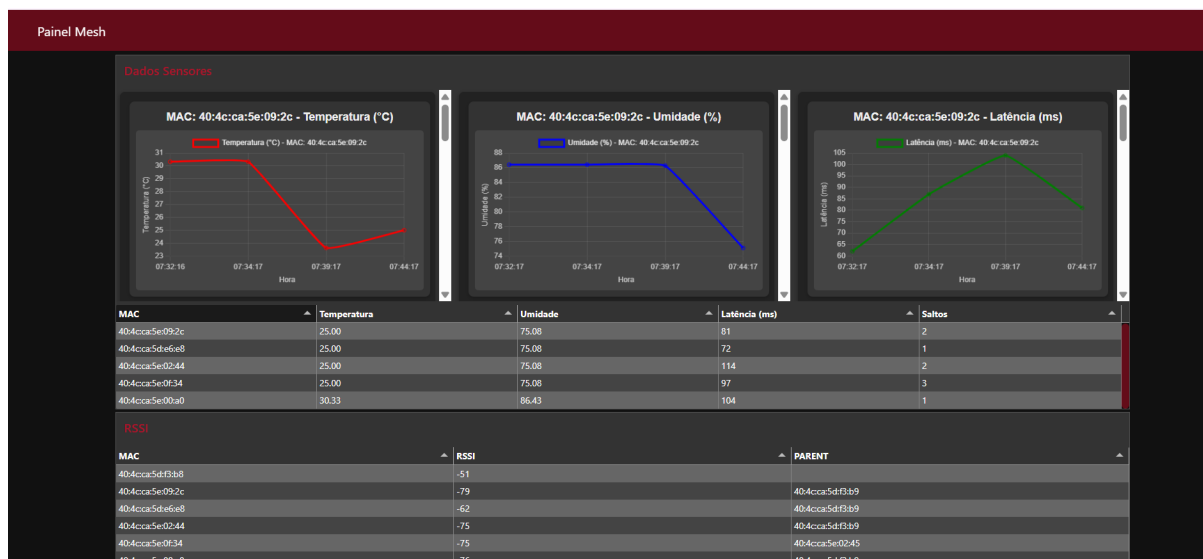
4 Resultados

4.1 Painel de monitoramento

O painel de monitoramento desenvolvido na plataforma Node-RED é apresentado nas Figuras 9 e 10. Por meio do painel, é possível observar, em tempo real, as métricas da rede e as informações coletadas pelos nós. O sistema apresenta os valores de temperatura e umidade atualmente simulados para fins de validação experimental, entretanto, a arquitetura foi desenvolvida de forma modular, permitindo a substituição direta desses dados simulados por leituras provenientes de sensores físicos reais, sem necessidade de alterações estruturais na rede ou no fluxo de processamento.

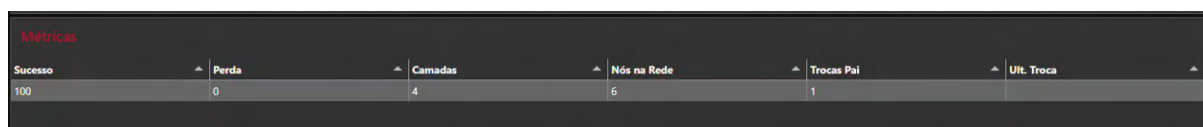
Além das variáveis ambientais, o painel exibe a latência no envio dos pacotes, o número de saltos necessários para que cada pacote alcance o *gateway*, organizados por endereço MAC, bem como informações relacionadas ao RSSI, taxa de sucesso, taxa de perda, quantidade de nós ativos e número de camadas presentes na rede.

Figura 9 – Painel desenvolvido utilizando NODE-RED - parte 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 10 – Painel desenvolvido utilizando NODE-RED - parte 2.

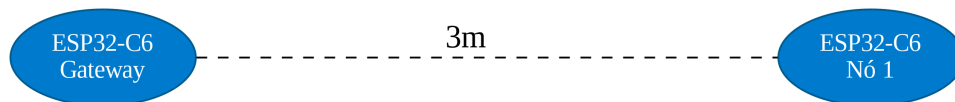


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Avaliação de desempenho em topologia com 1 nó filho

A Figura 11 apresenta a configuração física adotada no primeiro cenário de avaliação. Observa-se que a disposição dos dispositivos é composta por um nó ESP32-C6 operando como *gateway* e um nó filho com visada direta. A distância entre os dispositivos foi mantida fixa em 3 metros, permitindo a análise do comportamento da rede em condição estável de operação.

Figura 11 – Configuração experimental com distância fixa (3 m).

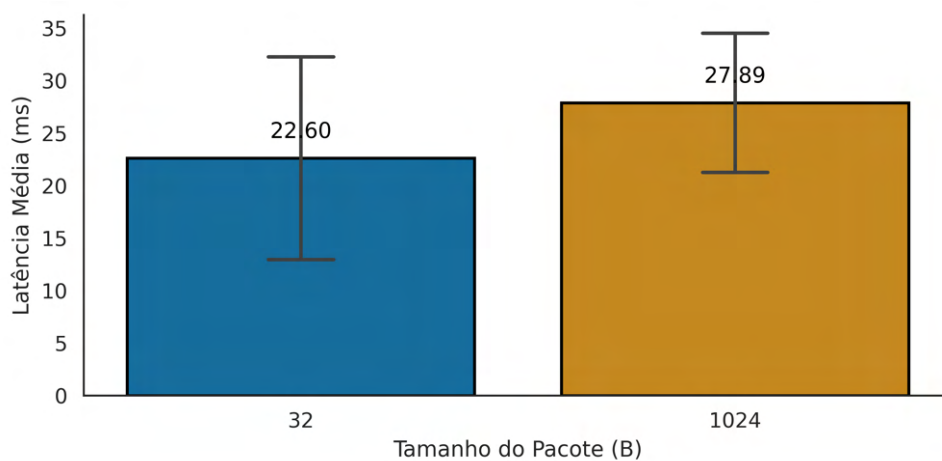


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1 Avaliação do impacto do tamanho do pacote na latência

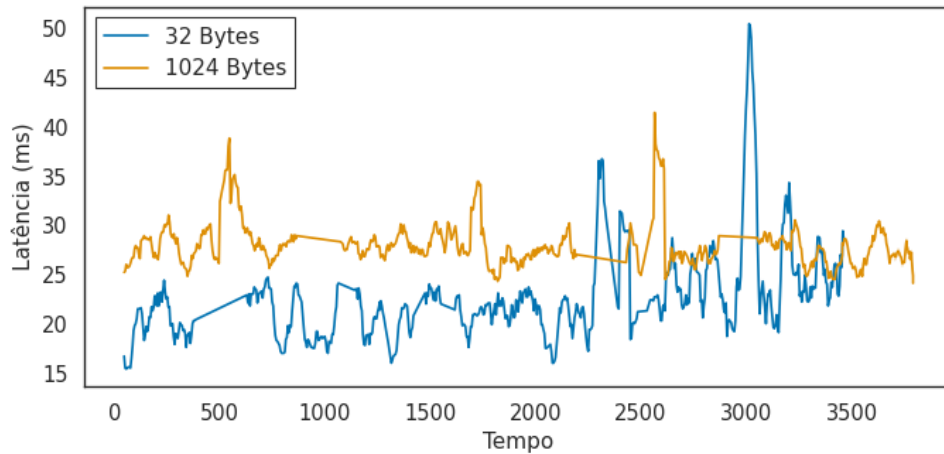
Para avaliar o impacto do tamanho do pacote na latência, utilizando a topologia apresentada na Figura 11, a rede foi mantida em operação contínua por quatro dias, inicialmente transmitindo pacotes de 32 B e, posteriormente, pacotes de 1024 B. É importante destacar que, em aplicações típicas de IoT, os tamanhos de *payload* costumam ser reduzidos, no entanto, este experimento teve como finalidade avaliar o comportamento do sistema em condições próximas ao limite operacional. O valor de 1024 B representou o maior tamanho de pacote suportado pelo microcontrolador antes de ocorrerem falhas relacionadas a estouro de memória, que impossibilitaram o funcionamento correto do *firmware*.

Figura 12 – Média da latência em função do tamanho do *payload*.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 13 – Variação da latência ao longo do tempo para pacotes de 32 e 1024 B.



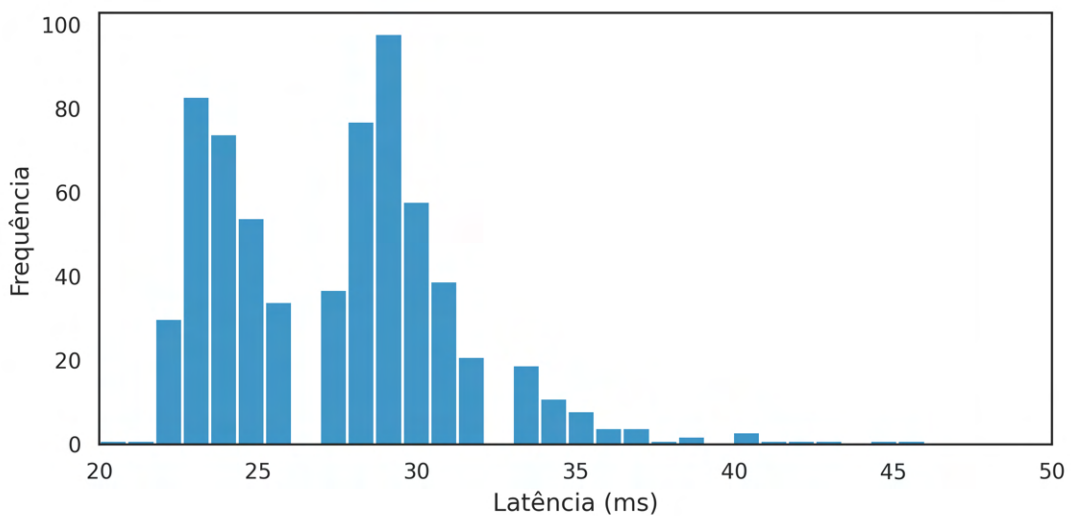
Fonte: Elaborado pela autora.

As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados obtidos. Observa-se que o aumento do tamanho do pacote não provocou impacto significativo na latência, uma vez que a média registrada para 32 B foi de 22,60 ms, enquanto para 1024 B foi de 27,89 ms. Assim, optou-se por manter o tamanho de 1024 B nos experimentos subsequentes, de forma a explorar o sistema operando próximo ao limite de capacidade.

4.2.2 Avaliação da latência ao longo do tempo

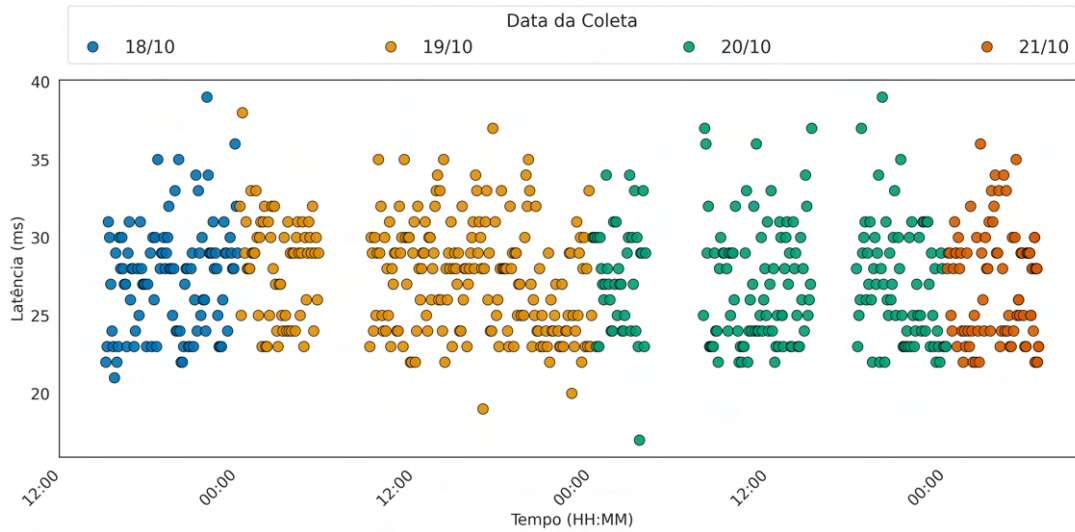
Para analisar o comportamento da latência em condição de operação contínua, foram gerados dois tipos de representação gráfica: um histograma da distribuição dos valores coletados e um gráfico de dispersão ao longo do período de monitoramento.

Figura 14 – Histograma da latência da rede (18 a 21 de Outubro).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Dispersão da latência ao longo do tempo (18 a 21 de Outubro).



Fonte: Elaborado pela autora.

As Figuras 14 e 15 apresentam, respectivamente, a distribuição estatística das amostras e a evolução temporal da latência durante quatro dias consecutivos de coleta.

Observa-se que a maior parte das amostras de latência concentra-se no intervalo entre 20 ms e 40 ms, como evidenciado pelo histograma da Figura 14. O valor mais frequente situa-se em torno de 28–30 ms. Esse comportamento indica uma rede, em geral, estável e com baixa latência média. Entretanto, também são registrados eventos esporádicos de atraso mais elevado, com latências superiores a 40 ms.

A análise temporal apresentada no gráfico de dispersão da Figura 15 mostra o comportamento da latência ao longo de quatro dias de coleta contínua. O principal aspecto positivo é a estabilidade longitudinal do sistema, visto que não há evidências de tendência de aumento ou redução gradual da latência, indicando ausência de degradação de desempenho ao longo do tempo e estabilidade do ambiente experimental. Observam-se apenas picos isolados, caracterizados como eventos pontuais e não como comportamento recorrente da rede.

Por fim, a Tabela 7 sumariza os resultados do experimento.

Tabela 7 – Média e desvio padrão da latência por dia (18 a 21 de Outubro).

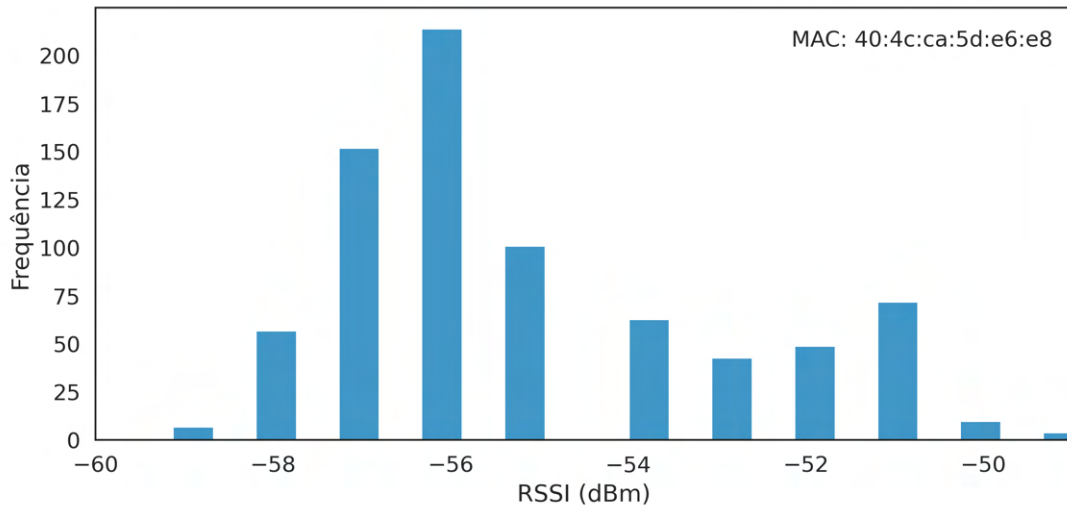
Dia	Média (ms)	Desvio Padrão (ms)
18/10	27,44	3,51
19/10	27,61	3,44
20/10	27,03	3,72
21/10	26,97	3,38

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3 Avaliação da qualidade do sinal ao longo do tempo

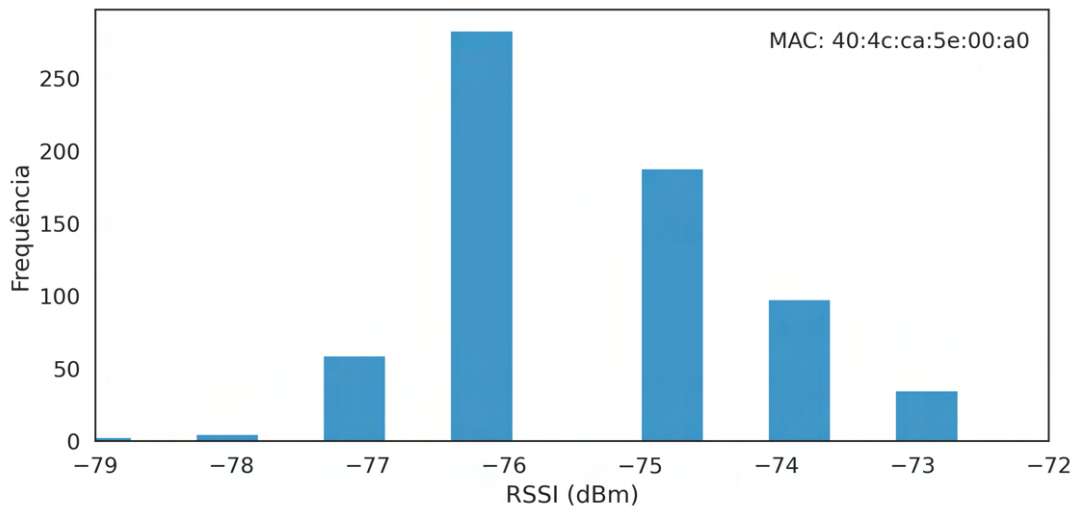
As Figuras 16 e 17 apresentam a distribuição dos valores de RSSI dos nós da rede mesh ao longo do período de coleta, permitindo identificar a concentração predominante e a dispersão das medições.

Figura 16 – Histograma de RSSI para o nó *gateway* (18 a 21 de Outubro).



Fonte: Elaborado pela autora.

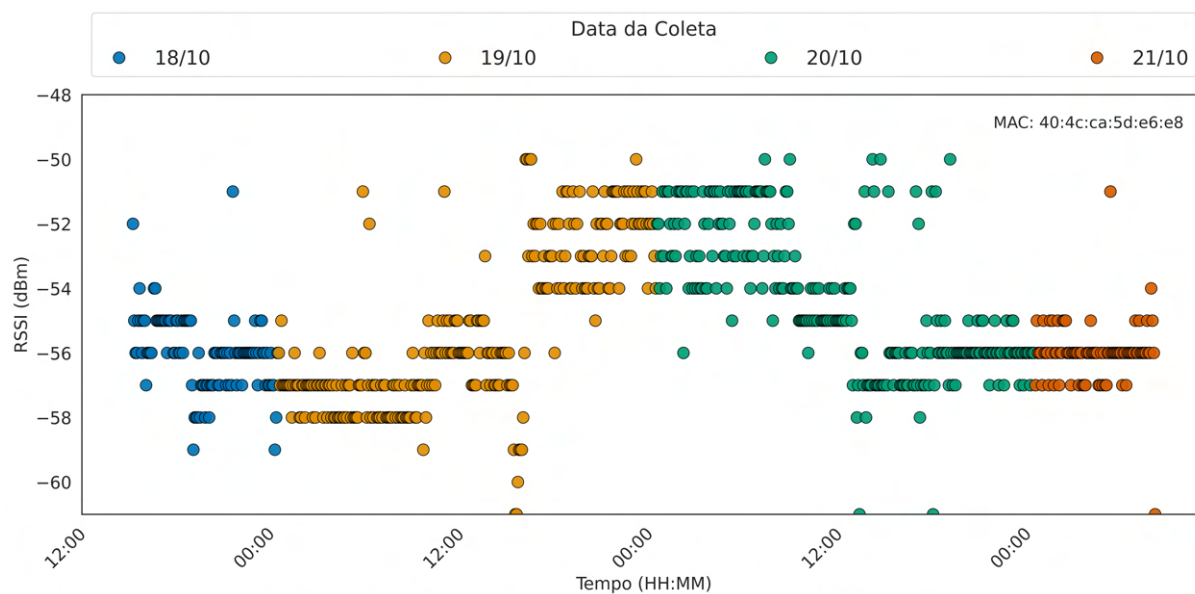
Figura 17 – Histograma de RSSI para o nó filho (18 a 21 de Outubro).



Fonte: Elaborado pela autora.

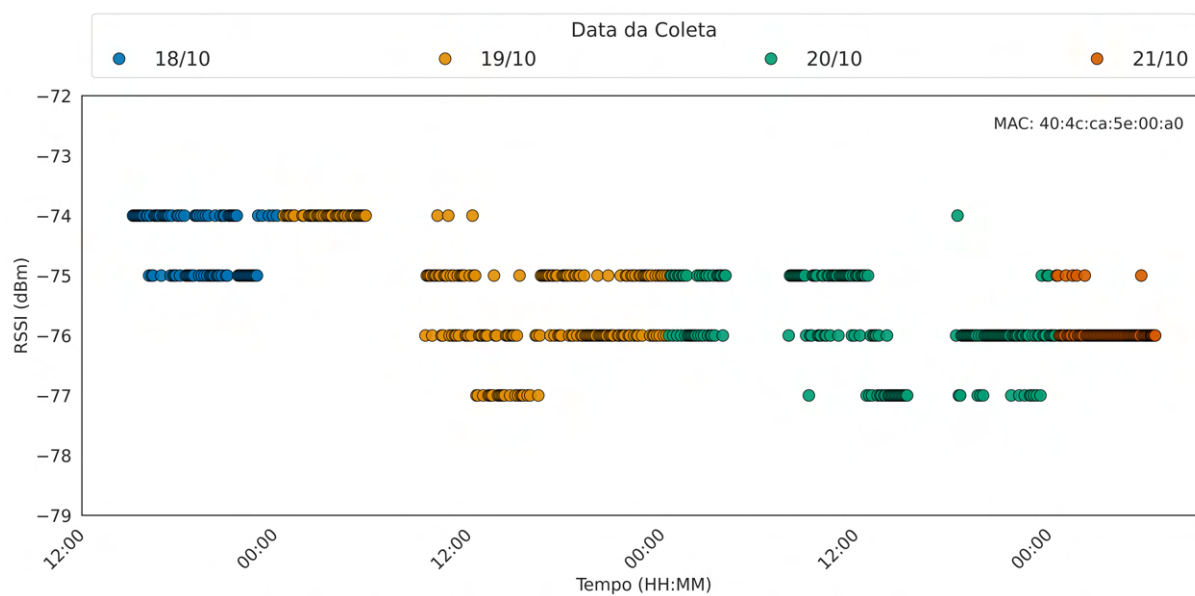
Por sua vez, as Figuras 18 e 19 ilustram a variação temporal do RSSI, possibilitando analisar a estabilidade do sinal e identificar eventuais flutuações ao longo dos dias de coleta.

Observa-se que os valores de RSSI situam-se predominantemente entre -50 dBm e -79 dBm, refletindo diferentes condições de enlace sem fio na rede mesh.

Figura 18 – Dispersão do RSSI para o nó *gateway* (18 a 21 de Outubro).

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Dispersão do RSSI para o nó filho (18 a 21 de Outubro).



Fonte: Elaborado pela autora.

O nó selecionado como *gateway* pelo algoritmo da biblioteca ESP-WIFI-MESH apresentam níveis de RSSI mais elevados, concentrados majoritariamente na faixa de -50 dBm a -60 dBm. Esses valores caracterizam enlaces de boa qualidade, associados a maior estabilidade da comunicação, menor probabilidade de retransmissões e reduzida incidência de falhas na troca de dados.

Em contrapartida, os demais nós da rede apresentam valores mais concentrados entre -74 dBm a -76 dBm, acompanhados de maior dispersão temporal. Essa variabilidade indica maior suscetibilidade a interferências, alterações no ambiente e ao aumento do número de saltos necessários para alcançar o *gateway*, características da topologia mesh. Ressalta-se que os valores de RSSI apresentados correspondem à qualidade do enlace entre cada nó e seu respectivo nó pai (ou nó vizinho imediato), e não diretamente ao *gateway* e que apenas a antena interna do microcontrolador foi utilizada.

Nota-se, ainda, que mesmo sob condições de RSSI mais baixos, a rede mesh mantém a conectividade entre os nós, evidenciando a capacidade de resiliência da rede.

A tabela 8 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 8 – RSSI médio e desvio padrão por dia (18 a 21 de outubro).

Nó	Dia	Média (dBm)	Desvio Padrão (dBm)
nó <i>gateway</i>	18/10	-55,99	1,18
nó <i>gateway</i>	19/10	-55,34	2,48
nó <i>gateway</i>	20/10	-54,36	2,21
nó <i>gateway</i>	21/10	-56,02	0,96
nó 1	18/10	-74,47	0,50
nó 1	19/10	-75,36	0,93
nó 1	20/10	-75,84	0,71
nó 1	21/10	-75,94	0,24

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Avaliação da utilização de recursos do microcontrolador

Para avaliar a utilização de recursos computacionais, foram monitoradas as métricas de uso de heap, utilização da CPU e temperatura interna dos microcontroladores. A memória heap corresponde à alocação dinâmica em tempo de execução, enquanto a métrica de utilização da CPU foi obtida a partir das funcionalidades de monitoramento disponibilizadas pelo FreeRTOS no ESP-IDF.

Neste contexto, a variável *cpu_total* representa o tempo efetivamente consumido pelas tarefas do sistema, sendo calculada como:

$$cpu_{total} = cpu_{global} - cpu_{idle} \quad (4.1)$$

onde cpu_{global} corresponde ao tempo total de processamento contabilizado pelo sistema e cpu_{idle} representa o tempo em que a CPU permaneceu em estado ocioso.

Tabela 9 – Média e desvio padrão das métricas de sistema por nó.

MAC	Média heap (kB)	Desvio heap (kB)	Média temp (°C)	Desvio temp (°C)	Média CPU (%)	Desvio CPU (%)
nó <i>gateway</i>	204,3	0,1	40,4	0,7	1,1	0,4
nó 1	229,9	0,1	40,5	0,9	1,1	0,5

Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 9 apresenta os resultados do uso do sistema. O nó atuando como *gateway* apresenta menor quantidade de memória heap livre. Em relação à utilização da CPU, ambos os nós apresentaram valores semelhantes, o que é esperado nesse cenário simplificado, uma vez que a carga de processamento associada às funções de roteamento e gerenciamento da rede ainda é reduzida.

4.3 Avaliação de desempenho em topologia com 7 nós filhos

A Figura 20 apresenta a configuração física adotada neste cenário de avaliação, composta por sete nós ESP32-C6 organizados em uma topologia distribuída verticalmente, com um nó configurado como *gateway*.

O arranjo foi definido com distâncias controladas entre os dispositivos, variando entre 1 m e 4 m, de modo a simular diferentes comprimentos de enlace dentro da malha.

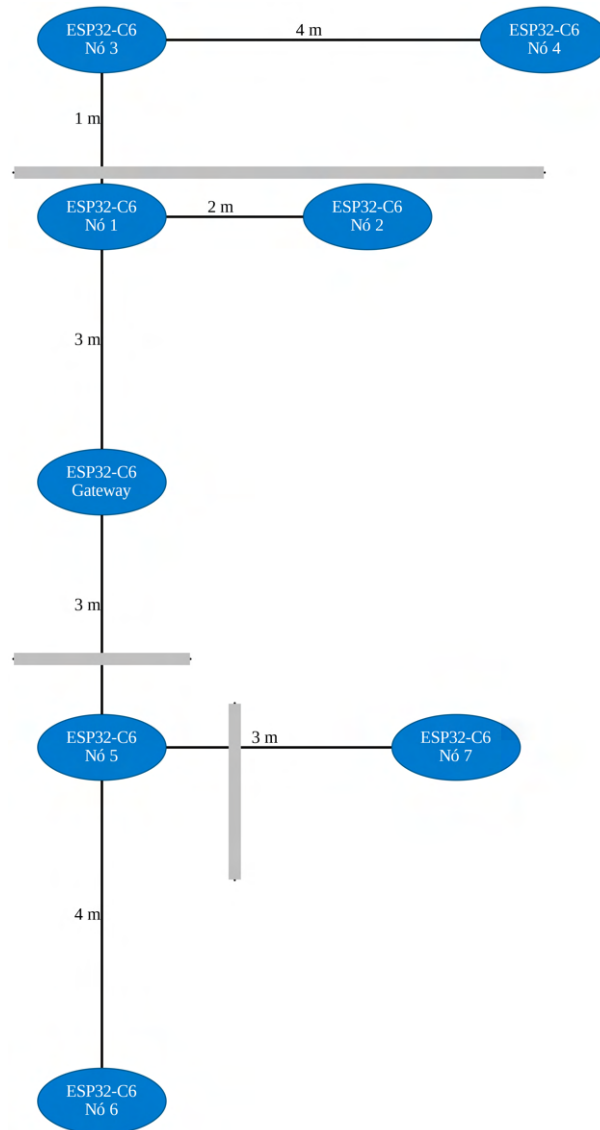
Observa-se que os nós 3 e 4 estão posicionados horizontalmente a 4 m de distância, enquanto os nós 1 e 2 encontram-se separados por 2 m. O nó 1 conecta-se verticalmente ao *gateway* por 3 m, que, por sua vez, estabelece enlace com o nó 5 também a 3 m. A partir desse ponto, o nó 5 conecta-se horizontalmente ao nó 7 (3 m) e verticalmente ao nó 6 (4 m), configurando múltiplos saltos sucessivos na rede.

As faixas em cinza indicam barreiras físicas presentes no ambiente experimental, representando paredes estruturais que impõem atenuação adicional ao sinal de rádio frequência. Essas obstruções reproduzem condições reais de propagação em ambientes internos, permitindo visualizar o impacto da atenuação por obstáculos na latência, na qualidade do sinal e na estabilidade dos enlaces.

4.3.1 Avaliação da latência ao longo do tempo

Nesta subseção, analisa-se o comportamento temporal da latência na topologia composta por sete nós, considerando o período de coleta entre 6 e 10 de dezembro. O objetivo é verificar como o aumento do número de saltos até o *gateway* e a dinâmica de roteamento da rede mesh influenciam a distribuição dos tempos de resposta. Para

Figura 20 – Configuração experimental com distância fixa e 7 nós filhos.



Fonte: Elaborado pela autora.

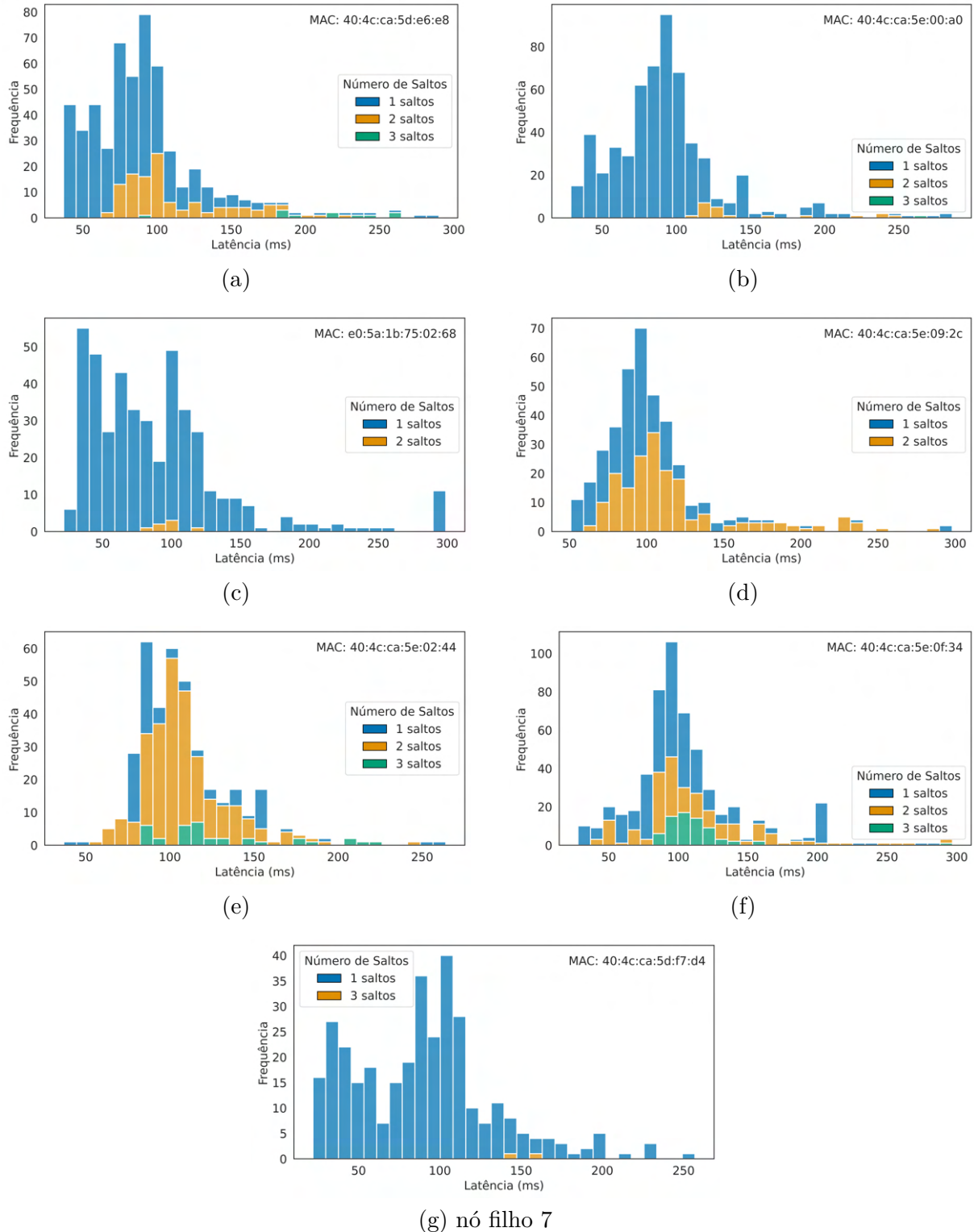
isso, apresentam-se inicialmente os histogramas de frequência da latência para cada nó, seguidos pelos respectivos gráficos de dispersão ao longo do tempo.

A análise dos histogramas de latência apresentados na Figura 21 evidencia que a distribuição dos valores não é unimodal, refletindo a coexistência de diferentes regimes de comunicação associados ao número de saltos até o *gateway*. Observa-se que as rotas com um único salto concentram a maior parte das amostras em faixas inferiores de latência, predominantemente entre 40 ms e 90 ms.

À medida que o número de saltos aumenta, as distribuições apresentam valores mais elevados. Para rotas com dois saltos, os histogramas indicam uma concentração principal entre 90 ms e 120 ms, acompanhada por um aumento significativo da variabilidade e pela presença de caudas longas que se estendem além de 180 ms. Já nas rotas com três saltos, embora menos frequentes, observa-se uma distribuição ainda mais dispersa,

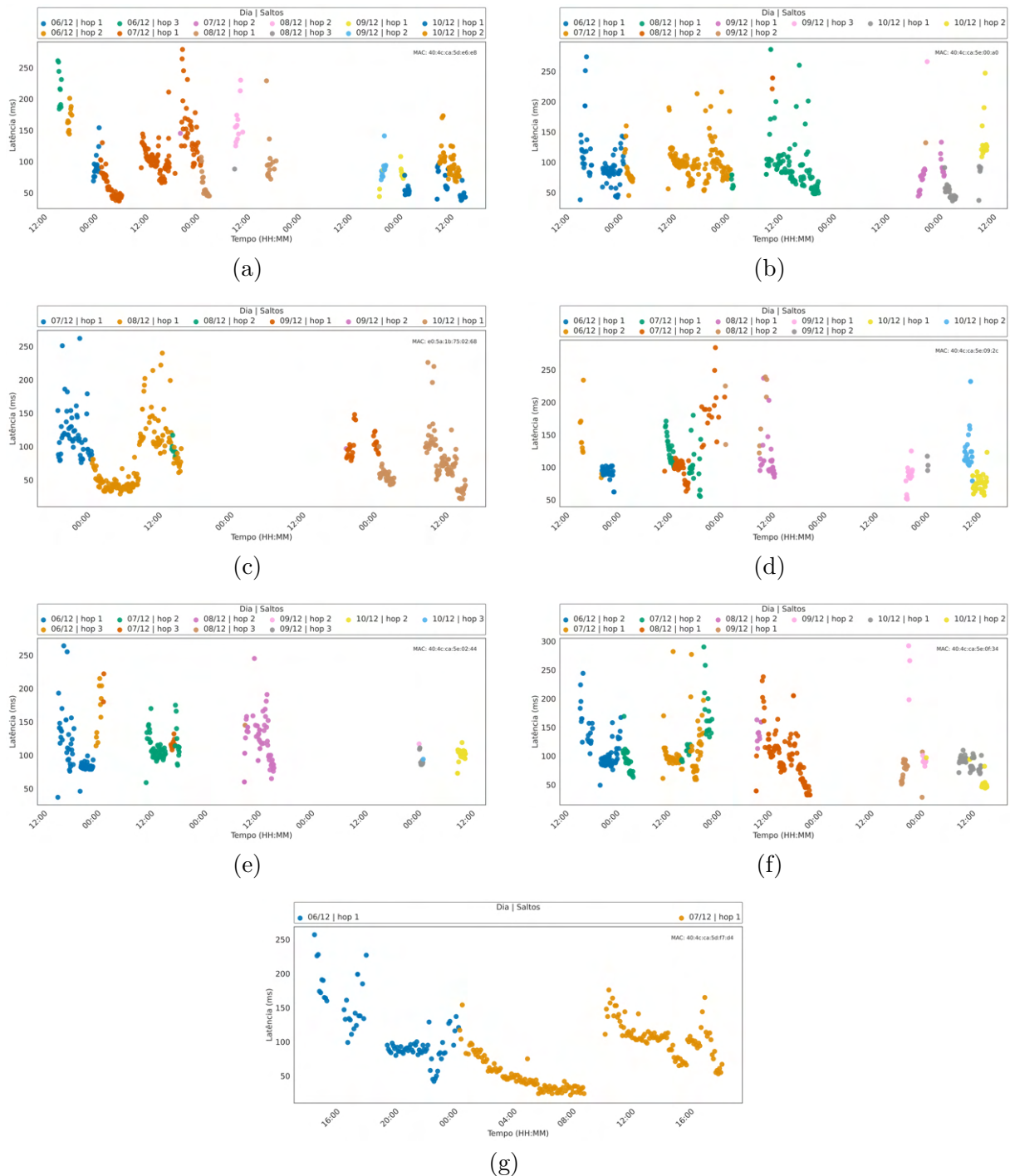
com latências frequentemente superiores a 150 ms e a ocorrência de valores extremos que ultrapassam 200 ms.

Figura 21 – Histogramas da latência ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 6 a 10 de dezembro: (a) nó 1; (b) nó 2; (c) nó 3; (d) nó 4; (e) nó 5; (f) nó 6; (g) nó 7.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 – Dispersão da latência ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 6 a 10 de dezembro: (a) nó 1; (b) nó 2; (c) nó 3; (d) nó 4; (e) nó 5; (f) nó 6; (g) nó 7.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esses resultados são confirmados pelos gráficos de dispersão apresentados na Figura 22 e pelos valores estatísticos sumarizados na Tabela 10. Considerando todas as medições realizadas entre os dias 6 e 10 de dezembro, verifica-se que as latências médias associadas a rotas de um salto situam-se, em geral, entre 50 ms e 105,8 ms, enquanto

trajetos com dois saltos elevam esse intervalo para aproximadamente 97,5 ms a 150,6 ms. Para rotas com três saltos, os valores médios tornam-se significativamente mais elevados, podendo superar 200 ms, além de apresentarem maiores desvios padrão.

Os gráficos de dispersão também evidenciam que um mesmo nó pode operar, ao longo do tempo, com diferentes números de saltos até o *gateway*, resultado da seleção dinâmica de rotas característica da arquitetura mesh. Essa alternância gera agrupamentos temporais distintos de latência para um mesmo dispositivo e explica a presença de múltiplos picos observados nos histogramas. Adicionalmente, identificam-se intervalos temporais sem registros para determinados nós, caracterizando períodos de inatividade ou perda de conectividade. Tais eventos podem estar associados à reconfiguração dinâmica da topologia, à degradação temporária do enlace ou a limitações energéticas dos dispositivos. Ainda assim, esses episódios não comprometem o funcionamento global da rede, uma vez que a arquitetura mesh permite o redirecionamento automático do tráfego e a adaptação das rotas, preservando a continuidade da comunicação.

Tabela 10 – Latência média e desvio padrão por dia (6 a 10 de Dezembro).

Nó	Dia	Salt.	Méd. (ms)	DP (ms)	Nó	Dia	Salt.	Méd. (ms)	DP (ms)
nó 1	06/12	1	94,47	21,34	nó 3	10/12	3	94,00	0,00
nó 1	06/12	2	168,64	18,08	nó 4	06/12	1	92,65	9,26
nó 1	06/12	3	207,00	22,79	nó 4	06/12	2	140,20	43,33
nó 1	07/12	1	95,13	38,69	nó 4	07/12	1	115,57	27,54
nó 1	07/12	2	145,00	0,00	nó 4	07/12	2	116,26	40,30
nó 1	08/12	1	75,03	34,22	nó 4	08/12	1	107,59	30,73
nó 1	08/12	2	161,33	31,69	nó 4	08/12	2	182,00	49,75
nó 1	08/12	3	88,00	0,00	nó 4	09/12	1	84,00	18,60
nó 1	09/12	1	77,71	14,64	nó 4	09/12	2	105,00	11,14
nó 1	09/12	2	88,85	17,38	nó 4	10/12	1	75,32	11,38
nó 1	10/12	1	59,73	17,84	nó 4	10/12	2	126,88	38,81
nó 1	10/12	2	98,49	20,32	nó 5	06/12	2	112,81	35,11
nó 2	06/12	1	94,32	33,23	nó 5	07/12	1	100,67	26,58
nó 2	07/12	1	100,66	30,27	nó 5	07/12	2	111,51	35,61
nó 2	08/12	1	86,85	29,31	nó 5	08/12	1	110,90	52,76
nó 2	08/12	2	233,00	10,39	nó 5	08/12	2	140,67	16,95
nó 2	09/12	1	79,64	19,20	nó 5	09/12	1	75,95	18,75
nó 2	09/12	2	132,00	0,00	nó 5	09/12	2	101,40	34,28
nó 2	10/12	1	54,11	17,66	nó 5	10/12	1	87,81	10,19
nó 2	10/12	2	136,25	35,45	nó 5	10/12	2	57,47	18,58
nó 3	06/12	1	102,47	31,07	nó 6	07/12	1	113,64	27,53
nó 3	06/12	3	163,50	38,34	nó 6	08/12	1	77,48	44,21
nó 3	07/12	2	110,30	19,83	nó 6	08/12	2	97,33	10,69
nó 3	07/12	3	129,54	33,42	nó 6	09/12	1	101,86	18,41
nó 3	08/12	2	121,76	33,52	nó 6	09/12	2	97,00	0,00
nó 3	08/12	3	145,00	0,00	nó 6	10/12	1	71,09	31,64
nó 3	09/12	2	117,00	0,00	nó 7	06/12	1	114,23	44,47
nó 3	09/12	3	93,11	9,77	nó 7	07/12	1	75,60	37,18
nó 3	10/12	2	101,09	9,04					

Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 10 sumariza os resultados discutidos.

Diante do cenário analisado, constata-se que a expansão do número de nós impacta diretamente o desempenho temporal da rede, tanto em termos de aumento da latência quanto de maior variabilidade. Como estratégia para mitigar esses efeitos e reduzir a sobrecarga concentrada no nó *gateway* (raiz), sugere-se a investigação do uso de múltiplos nós candidatos a *gateway*, com mecanismos de eleição dinâmica. Essa abordagem permitiria a adaptação da topologia em função das condições da rede, potencialmente reduzindo o número médio de saltos e melhorando a distribuição do tráfego ao longo do tempo.

4.3.2 Avaliação da qualidade do sinal ao longo do tempo

Para analisar a distribuição estatística do RSSI ao longo do período de coleta, são apresentados inicialmente os histogramas para cada nó da rede, conforme ilustrado na Figura 23.

A análise dos histogramas evidencia que os valores de RSSI apresentam maior heterogeneidade quando comparados ao cenário com apenas um nó filho. O nó *gateway* mantém níveis mais elevados e estáveis, predominantemente entre -56 dBm e -60 dBm, caracterizando enlaces de boa qualidade e elevada relação sinal-ruído.

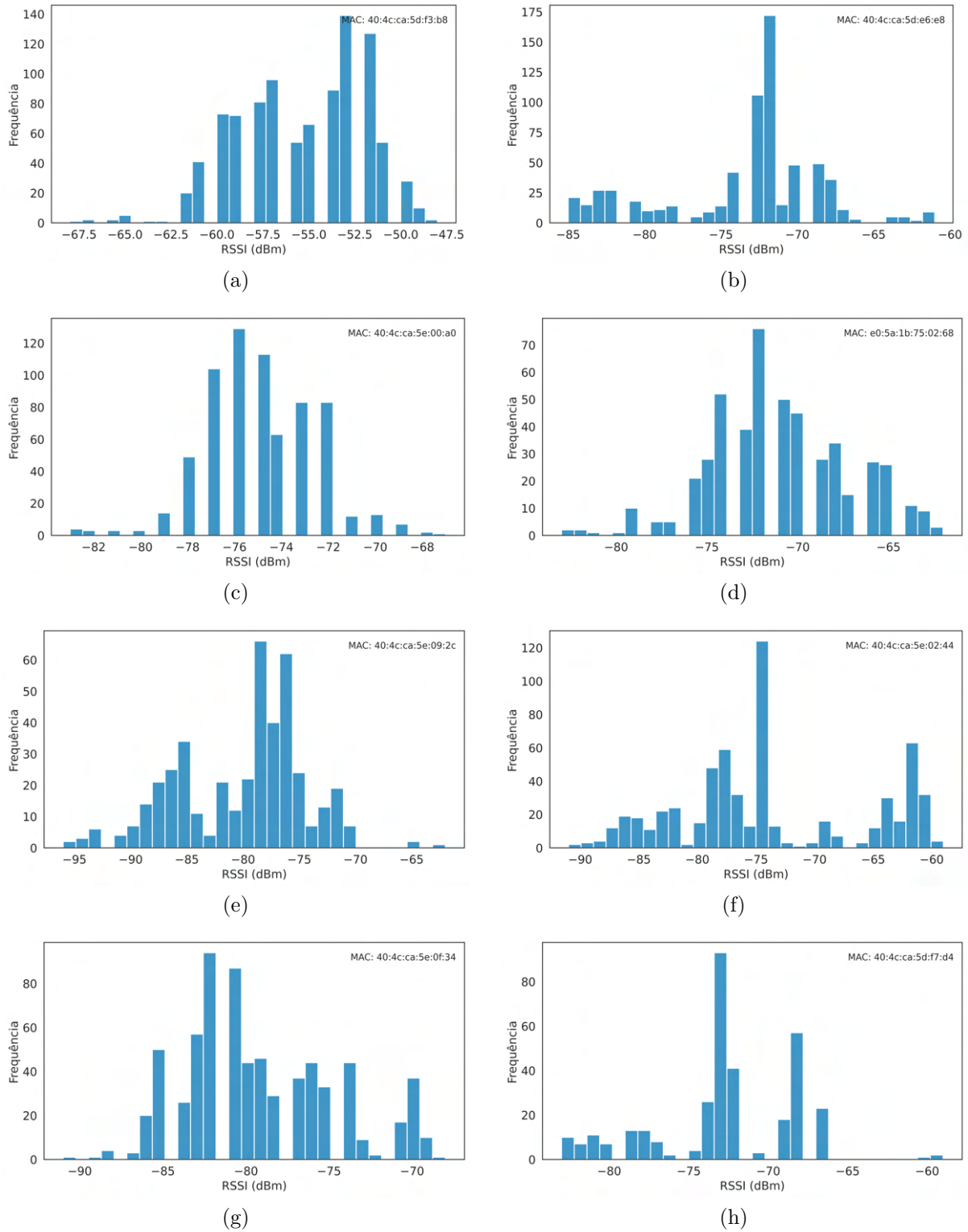
Por outro lado, os nós filhos apresentam distribuições mais dispersas, com maior concentração de valores entre -70 dBm e -80 dBm. Destaca-se o nó 4, que apresenta predominância de valores em uma faixa mais baixa, entre aproximadamente -79 dBm e -85 dBm, indicando condições de enlace menos favoráveis em relação aos demais nós. Observam-se, ainda, registros pontuais inferiores a -85 dBm em todos os casos, o que sugere enlaces mais suscetíveis a interferências, presença de obstáculos físicos e variações nas condições ambientais.

Para complementar essa análise, a Figura 24 apresenta os gráficos de dispersão temporal do RSSI, permitindo observar a evolução do sinal ao longo dos dias e horários de coleta.

Os gráficos de dispersão temporal reforçam esse comportamento, evidenciando oscilações ao longo dos dias de coleta. Nota-se que alguns nós apresentam períodos de maior estabilidade, enquanto outros demonstram variações mais acentuadas, possivelmente associadas à adaptação dinâmica das rotas e à variação do número de saltos até o *gateway*. Além disso, ressalta-se que determinados nós permaneceram temporariamente indisponíveis em alguns períodos, em decorrência de limitações relacionadas ao nível de bateria.

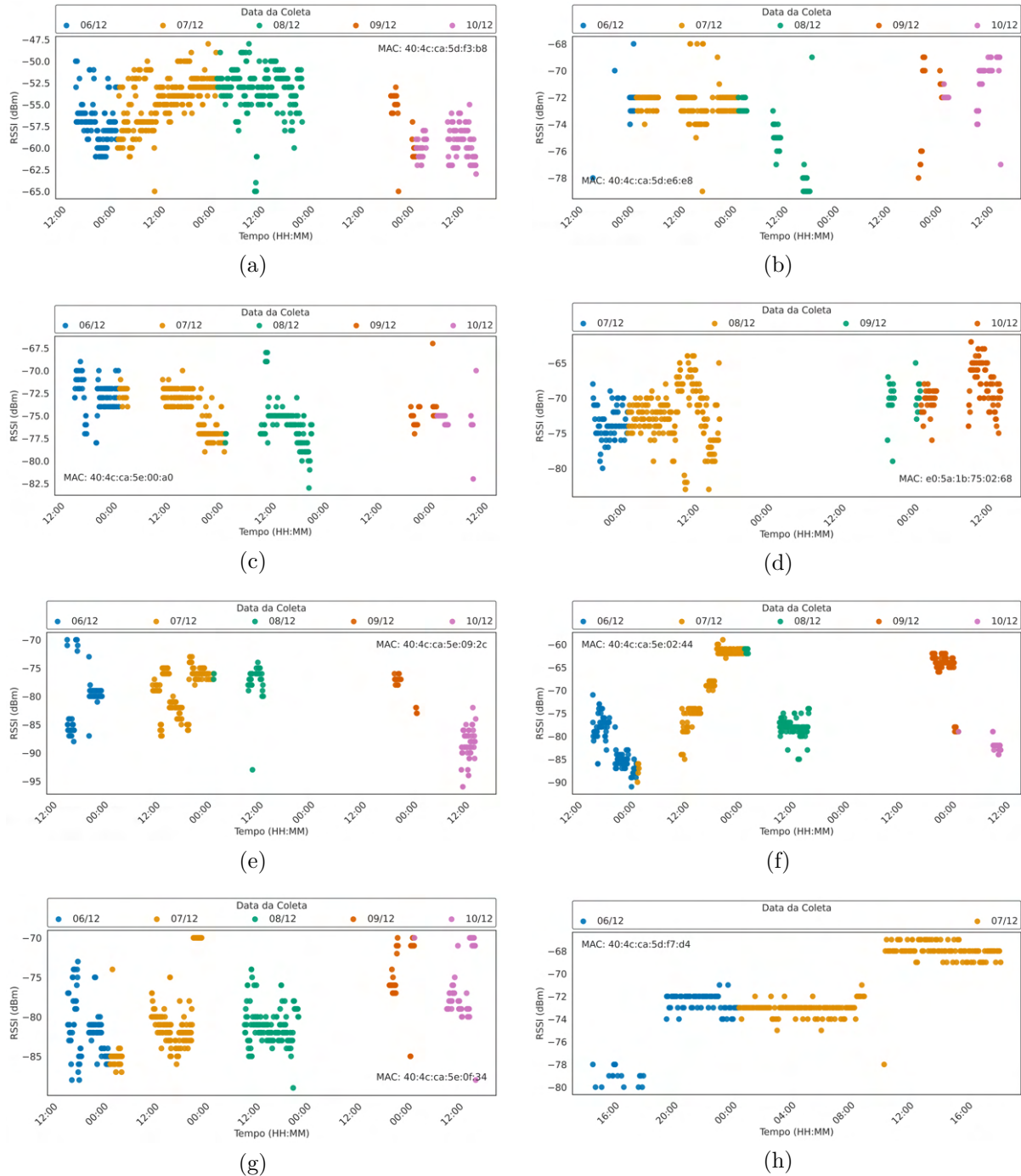
Importante destacar que os valores de RSSI apresentados correspondem à qualidade do enlace entre cada nó e seu respectivo nó pai na malha, e não necessariamente ao enlace direto com o *gateway*. Dessa forma, nós com múltiplos saltos tendem a apresentar maior variabilidade nos níveis de sinal, refletindo a dinâmica do roteamento mesh.

Figura 23 – Histogramas de RSSI ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 6 a 10 de dezembro: (a) nó *gateway*; (b) nó 1; (c) nó 2; (d) nó 3; (e) nó 4; (f) nó 5; (g) nó 6; (h) nó 7.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 – Dispersão do RSSI ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 6 a 10 de dezembro: (a) nó *gateway*; (b) nó 1; (c) nó 2; (d) nó 3; (e) nó 4; (f) nó 5; (g) nó 6; (h) nó 7.



Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar das variações observadas, não se identificam períodos prolongados de degradação crítica do sinal que comprometam a conectividade global da rede. A arquitetura mesh demonstra capacidade de adaptação, redirecionando o tráfego por rotas alternativas quando necessário, o que reforça sua resiliência e robustez mesmo em cenários com maior número de dispositivos.

Por fim, a Tabela 11 sintetiza quantitativamente os valores médios e os desvios padrão do RSSI por dia e por nó.

Tabela 11 – RSSI médio e desvio padrão por dia (6 a 10 de dezembro).

Nó	Dia	Méd. (dBm)	DP (dBm)	Nó	Dia	Méd. (dBm)	DP (dBm)
nó <i>gateway</i>	06/12	-57,21	2,48	nó 3	09/12	-70,20	2,84
nó <i>gateway</i>	07/12	-54,65	2,69	nó 3	10/12	-68,05	3,17
nó <i>gateway</i>	08/12	-53,06	2,42	nó 4	06/12	-81,01	4,76
nó <i>gateway</i>	09/12	-57,92	4,19	nó 4	07/12	-78,45	3,54
nó <i>gateway</i>	10/12	-59,54	1,77	nó 4	08/12	-76,78	3,71
nó 1	06/12	-77,55	6,84	nó 4	09/12	-77,96	2,23
nó 1	07/12	-72,31	2,15	nó 4	10/12	-88,88	2,89
nó 1	08/12	-74,31	4,83	nó 5	06/12	-81,33	4,81
nó 1	09/12	-72,82	3,61	nó 5	07/12	-68,54	7,59
nó 1	10/12	-74,88	5,82	nó 5	08/12	-76,42	5,27
nó 2	06/12	-72,69	1,71	nó 5	09/12	-66,13	5,58
nó 2	07/12	-74,27	2,27	nó 5	10/12	-81,88	1,34
nó 2	08/12	-76,14	2,01	nó 6	06/12	-80,79	3,92
nó 2	09/12	-74,86	1,59	nó 6	07/12	-80,07	5,28
nó 2	10/12	-75,61	1,62	nó 6	08/12	-80,70	2,71
nó 3	07/12	-73,46	2,31	nó 6	09/12	-74,36	3,72
nó 3	08/12	-72,05	3,56	nó 6	10/12	-76,49	3,95
				nó 7	06/12	-75,63	4,05
				nó 7	07/12	-70,62	2,70

Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.3 Avaliação da utilização de recursos computacionais

A Tabela 12 apresenta a utilização de CPU, memória *heap* e temperatura interna dos microcontroladores no cenário com 1 nó *gateway* e 7 nós filhos, conforme a topologia da Figura 20.

Tabela 12 – Média e desvio padrão das métricas de sistema por nó.

Nó	Média heap (kB)	Desvio heap (kB)	Média temp (°C)	Desvio temp (°C)	Média CPU (%)	Desvio CPU (%)
nó <i>gateway</i>	200,2	3,1	36,4	1,3	22,0	20,5
nó 1	228,8	0,5	41,3	3,1	4,5	4,6
nó 2	228,8	0,4	43,5	0,8	5,3	4,6
nó 3	140,6	3,7	0,0	0,0	100,0	0,0
nó 4	228,7	0,3	42,5	4,0	3,4	2,7
nó 5	222,0	9,6	40,7	2,2	3,7	3,1
nó 6	227,6	1,5	39,9	1,2	3,8	3,2
nó 7	228,4	1,1	42,5	0,9	7,2	6,0

Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que o nó que atua como *gateway* apresenta o maior consumo de CPU entre os cenários avaliados, atingindo média de 22%, com elevada variabilidade ao longo do tempo. Além disso, esse dispositivo mantém a menor quantidade de memória *heap* disponível, indicando maior demanda de processamento e armazenamento temporário de dados.

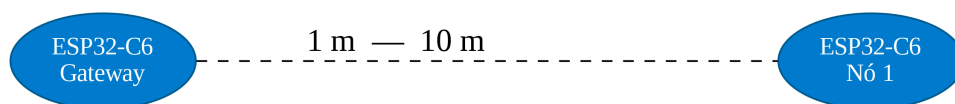
Ressalta-se que o microcontrolador que apresenta valor de temperatura igual a 0,0 corresponde a um ESP32, enquanto os demais dispositivos da topologia utilizam ESP32-C6. O ESP32 não possui sensor interno de temperatura, motivo pelo qual o valor registrado permaneceu constante em 0,0 ao longo dos experimentos. Adicionalmente, esse nó apresentou menor quantidade de memória *heap* livre e maior utilização de CPU, comportamento que pode estar associado às diferenças arquiteturais entre os microcontroladores, bem como às funções específicas desempenhadas por esse dispositivo na rede.

De forma geral, os resultados indicam que a expansão da rede implica aumento da carga computacional, especialmente sobre o nó *gateway*, que centraliza funções de gerenciamento e encaminhamento de pacotes. Ainda assim, os níveis de utilização observados permanecem dentro de limites operacionais aceitáveis, não evidenciando saturação dos recursos ou comprometimento da estabilidade da rede.

4.4 Avaliação de desempenho com distância variável (1 a 10 m)

Conforme ilustrado na Figura 25, manteve-se a mesma configuração física adotada no cenário apresentado na Figura 11, composta por um ESP32-C6 *gateway* e um único nó filho com visada direta. Entretanto, diferentemente da avaliação em distância fixa, a separação entre o nó e o *gateway* foi variada progressivamente de 1 a 10 metros, em incrementos de 1 metro. Esse procedimento possibilitou avaliar a influência da atenuação do sinal nas métricas de desempenho da rede.

Figura 25 – Configuração experimental com distância variável (1 m a 10 m).

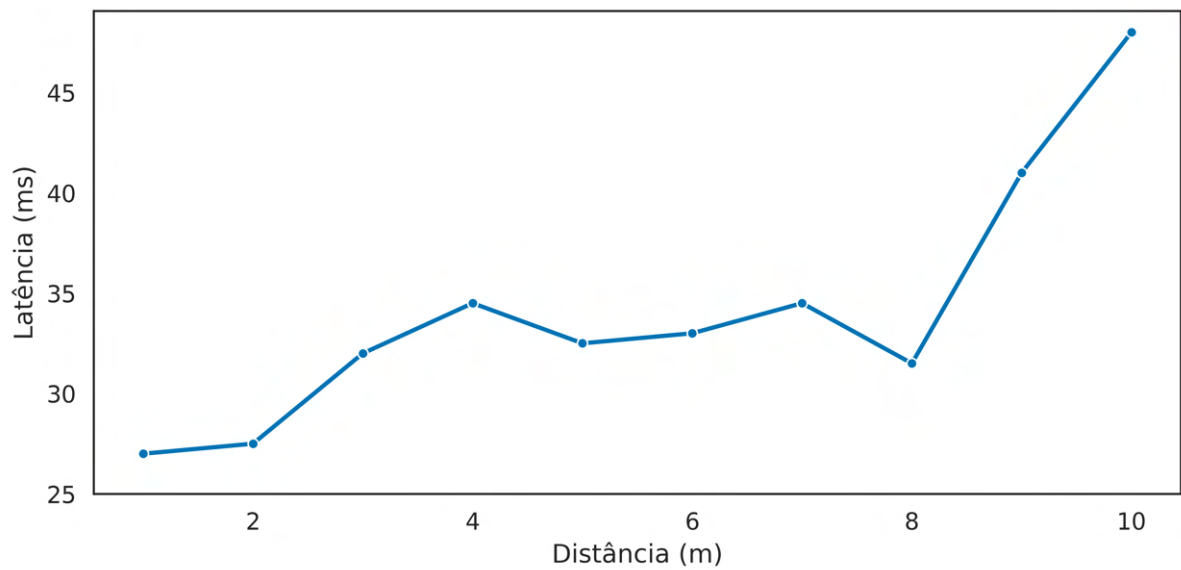


Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.1 Impacto da distância na latência de ponta a ponta

Neste experimento, a latência de ponta a ponta foi avaliada em função da distância entre os nós da rede mesh, conforme a topologia apresentada na Figura 25. Para cada distância avaliada, foram realizadas 10 medições independentes. Os resultados deste experimento são apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Impacto da distância na latência.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que, entre 1 m e 6 m, a latência média permanece relativamente estável, variando entre aproximadamente 27 ms e 34 ms, com baixos valores de desvio padrão. Esse comportamento indica operação estável do enlace, com pequena variabilidade temporal. Em 7 m, verifica-se aumento significativo da dispersão, evidenciando maior instabilidade momentânea da comunicação, possivelmente associada à degradação do RSSI e da SNR nessa região. Em 8 m, ocorre uma redução pontual da latência média acompanhada de baixa variabilidade, sugerindo condições transitórias favoráveis do canal. A partir de 9 m, observa-se crescimento consistente da latência média, atingindo 48 ms em 10 m, além de aumento do desvio padrão, caracterizando a transição para um regime de operação mais instável.

A Tabela 13 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 13 – Latência média e desvio padrão em função da distância.

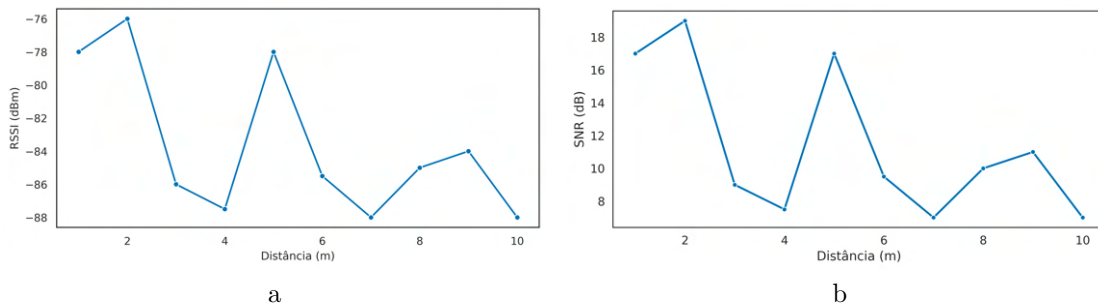
Distância (m)	Média (ms)	Desvio Padrão (ms)
1	27,25	3,88
2	27,50	1,05
3	32,50	3,27
4	35,33	3,20
5	32,83	0,98
6	33,83	4,67
7	40,33	14,88
8	31,25	0,96
9	41,43	1,90
10	48,00	3,54

Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.2 Impacto da distância na qualidade do sinal

A Figura 27 apresenta o comportamento do RSSI e da SNR em função da distância entre o nó transmissor e o receptor. A análise conjunta dessas métricas permite avaliar o impacto do aumento da separação física sobre a qualidade do enlace sem fio em ambiente interno.

Figura 27 – Impacto da distância nos parâmetros RSSI e SNR: (a) impacto da distância no RSSI; (b) impacto da distância no SNR



Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se, inicialmente, que o RSSI não apresenta uma redução estritamente linear com o aumento da distância. Embora exista uma tendência global de atenuação, são verificadas oscilações ao longo do percurso, evidenciando a influência significativa de fenômenos típicos de propagação em ambientes internos, como *fading* e *shadowing*.

O *fading* corresponde às variações rápidas e de pequena escala na amplitude do sinal recebido, decorrentes principalmente da propagação por múltiplos caminhos (*multi-path*). Nesse processo, o sinal sofre reflexões, difrações e espalhamentos ao interagir com superfícies como paredes, mobiliário e estruturas metálicas. As múltiplas trajetórias resultantes podem provocar interferência construtiva ou destrutiva, ocasionando flutuações instantâneas na potência recebida.

Por sua vez, o *shadowing*, também denominado desvanecimento de larga escala, está associado à atenuação gradual do sinal causada pela presença de obstáculos físicos entre transmissor e receptor. Elementos estruturais, como paredes e divisórias, absorvem ou bloqueiam parcialmente a energia do sinal, promovendo variações mais suaves, porém persistentes, no nível médio de potência.

Apesar dessas variações, identifica-se uma tendência global de degradação do sinal com o aumento da distância. Observa-se uma região crítica a partir de aproximadamente 7 m, na qual os valores de RSSI passam a se concentrar em níveis mais baixos de potência, indicando maior vulnerabilidade do enlace e redução da margem operacional.

A relação sinal-ruído (SNR) constitui uma métrica fundamental para a avaliação da qualidade do enlace. Esse parâmetro expressa a razão entre a potência do sinal útil

e a potência do ruído de fundo presente no sistema, sendo usualmente representado em decibéis (dB). Matematicamente, a SNR é definida por:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (4.2)$$

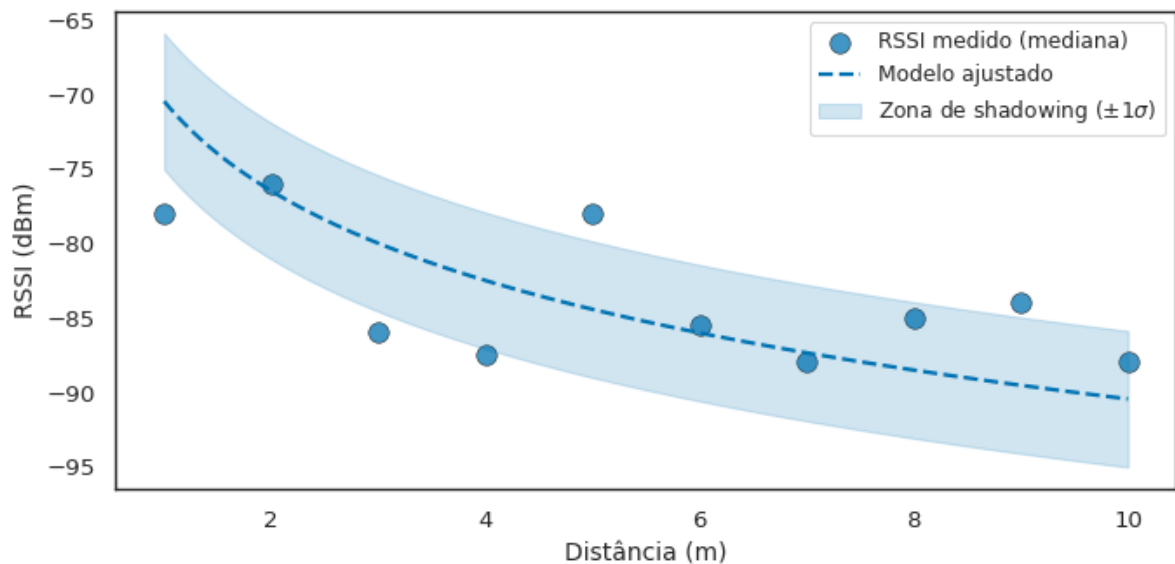
De acordo com Goldsmith (2005), valores elevados de SNR (superiores a 20 dB) indicam condições favoráveis de comunicação, com maior robustez e menor probabilidade de erro. Valores intermediários, entre 10 dB e 20 dB, caracterizam um regime limítrofe de operação, enquanto valores inferiores a 10 dB são considerados críticos, estando associados ao aumento da taxa de erro e à instabilidade da comunicação.

De maneira consistente com o comportamento do RSSI, a SNR apresenta reduções significativas nas mesmas regiões em que se observa degradação do sinal. Esse resultado reforça a influência dos efeitos de propagação do ambiente sobre o desempenho do enlace.

Mesmo sob condições de sinal degradadas, a rede Wi-Fi mesh demonstrou robustez operacional, mantendo a entrega de pacotes de forma estável até a distância de 8 m. Contudo, a partir de 9 m e 10 m, foram registrados eventos intermitentes de perda de conectividade, caracterizando a transição para um regime de operação instável. Tal comportamento reflete-se diretamente no aumento da latência.

Para complementar essa análise, foi realizada a caracterização da propagação do sinal apresentado na Figura 28. O valor teórico esperado de RSSI foi calculado e comparado com os valores medidos experimentalmente.

Figura 28 – Análise de propagação do sinal.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que, à medida que a distância aumenta, o RSSI torna-se progressivamente mais negativo, comportamento consistente com os modelos clássicos de perda

de percurso. A maioria dos valores medidos encontra-se dentro da faixa de confiança representada pela região sombreada em cinza. Verifica-se ainda que a curva estimada pelo modelo de perda de percurso acompanha adequadamente os dados experimentais, com a maior parte das amostras situada na região de shadowing ($\pm 1\sigma$), indicando boa aderência do modelo ao cenário avaliado.

O valor estimado do RSSI de referência a 1 m, igual a $-70,5$ dBm, juntamente com o desvio-padrão do sombreamento de $4,58$ dB, sugere um ambiente interno com nível moderado de variabilidade do sinal, típico de cenários sujeitos a multipercurso e à presença de obstáculos.

4.5 Taxa de transferência de dados

Para avaliar a taxa de transferência de dados entre os dispositivos, realizou um experimento utilizando como base o conjunto de bibliotecas fornecidas por Espressif Systems (2024). Esse teste consiste na transmissão de 20 pacotes em intervalos de 0 a 3 s. A ferramenta utilizada é baseada no *iperf* e originalmente suporta apenas dispositivos ESP32, sendo então adaptada para funcionamento no ESP32-C6.

Foram realizados testes em três cenários: rede operando no pior canal, no melhor canal e configurada para operar no mesmo canal do ponto de acesso (AP). Para facilitar a comparação, a Tabela 14 resume os resultados médios de *throughput*, *jitter* e perda de pacotes.

Tabela 14 – Resumo comparativo da taxa de transferência de dados da rede.

Cenário	Transferência (MB)	Throughput (Mb/s)	Jitter (ms)
Pior canal	45,26	6,03	1,3
Melhor canal	55,10	7,56	1,3
Canal do AP	55,10	7,35	1,0

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que a operação da rede no canal classificado como melhor canal apresentou os maiores valores médios da taxa de transferência de dados, entretanto, esse cenário mostrou-se mais suscetível a variações ao longo do tempo, atribuídas a interferências dinâmicas do ambiente. Por outro lado, a configuração da rede para operar no mesmo canal do ponto de acesso apresentou desempenho elevado e maior estabilidade, com menor *jitter* médio. Em nenhum dos cenários avaliados foram observadas perdas de pacotes, indicando confiabilidade na transmissão de dados.

4.6 Resiliência da rede mesh à falha do nó raiz

Tabela 15 – Tempo de detecção de falha e eleição de novo raiz.

	Detecção de falha nó raiz (s)	Eleição de novo nó raiz (s)	Tempo total (s)
	13	18	31
	14	16	30
	12	22	34
	13	20	33
	15	25	40
	13	17	30
	12	15	27
	14	15	29
	13	18	31
	12	18	30
	13	18	31
	13	18	31
Média	13,17	18,33	31,42
Desvio padrão	0,94	2,87	3,39

Fonte: Elaborado pela autora.

Com o objetivo de avaliar a resiliência e a capacidade de recuperação da rede Wi-Fi mesh frente à falha do nó raiz, que neste trabalho atua como *gateway* da rede mesh para a rede externa, foi realizado um experimento no qual, após a estabilização da rede, o nó atuando como nó raiz foi desligado. A partir desse evento, foram mensurados dois parâmetros principais: o tempo necessário para a identificação da falha do nó raiz pelos demais nós da rede; e o tempo de recuperação da rede, compreendendo o processo de eleição de um novo nó raiz e a posterior reestabilização da topologia.

Os resultados indicam que o tempo médio para detecção da perda de conexão com o nó raiz foi de aproximadamente 13 s, enquanto o tempo médio de recuperação da rede, incluindo a eleição de um novo nó raiz, que passa a atuar como *gateway*, e a estabilização da comunicação, foi de cerca de 18 s. O experimento foi repetido doze vezes, e os valores obtidos encontram-se sumarizados na Tabela 15.

Adicionalmente, os tempos observados encontram-se em conformidade com os valores indicados na documentação oficial da Espressif para a biblioteca ESP-WIFI-MESH. Segundo a documentação, o processo de detecção de falha do nó raiz, seguido pela eleição de um novo nó raiz e pela reconfiguração da topologia, pode levar até 60 s, dependendo das condições da rede, do número de nós e do ambiente de operação. Dessa forma, os tempos médios medidos neste experimento indicam um comportamento dentro do esperado.

Esse tipo de avaliação é particularmente relevante para aplicações de IoT e sistemas distribuídos, nos quais a continuidade da comunicação e a tolerância a falhas são requisitos fundamentais para garantir confiabilidade e disponibilidade do serviço.

4.7 Taxa de entrega e perda de pacotes

A confiabilidade da comunicação foi avaliada por meio da Taxa de Entrega de Pacotes ou PDR e da Taxa de Perda de Pacotes ou PLR, considerando separadamente as topologias com 1 nó filho e com 7 nós filhos, apresentadas, respectivamente, nas Figuras 11 e 20.

Os experimentos consistiram na transmissão periódica de pacotes de dados ao longo do período de operação contínua da rede. Para cada topologia, foram contabilizados os pacotes transmitidos e os pacotes efetivamente recebidos com sucesso, permitindo o cálculo da PDR como a razão entre pacotes recebidos e transmitidos, enquanto a PLR foi obtida de forma complementar.

A Tabela 16 apresenta os principais indicadores estatísticos obtidos para cada cenário avaliado.

Tabela 16 – Comparação da taxa de entrega de pacotes entre as topologias avaliadas.

Topologia	PDR médio (%)	PLR médio (%)	Desvio padrão da PDR	Coef. de variação
1 nó filho	99,15	0,85	9,21	0,09
7 nós filhos	83,57	16,43	37,06	0,44

Fonte: Elaborado pela autora.

4.7.1 Limitações do estudo

Uma das limitações observadas refere-se ao tempo de reconfiguração da rede após a falha do nó raiz, com média de aproximadamente 31 s para detecção da falha e eleição de um novo nó. Embora esse comportamento esteja de acordo com o funcionamento esperado do protocolo ESP-WIFI-MESH, esse intervalo pode ser elevado para aplicações com requisitos mais rigorosos de disponibilidade e tempo de resposta.

Outra limitação está relacionada à definição dos parâmetros da rede, como número máximo de camadas, tamanho dos pacotes e critérios de eleição do nó raiz. Esses parâmetros foram definidos com base na documentação do fabricante e em ajustes empíricos, visando garantir a estabilidade do sistema, sem a realização de um processo sistemático de otimização.

Do ponto de vista experimental, os resultados baseiam-se em execuções individuais dos cenários avaliados, sem repetição sistemática ou aplicação de testes estatísticos, o que limita a análise quantitativa da variabilidade e a obtenção de intervalos de confiança.

Além disso, não foram conduzidas avaliações específicas de segurança, como análise de vulnerabilidades ou simulação de ataques, nem testes em diferentes ambientes físicos, o que restringe a generalização dos resultados.

Por fim, não foram investigadas estratégias de economia de energia, como os modos *light sleep* e *deep sleep*, e seus impactos no desempenho da rede, aspecto relevante para aplicações alimentadas por bateria.

4.8 Considerações parciais

Este capítulo apresentou os principais resultados da implementação e caracterização experimental de uma rede Wi-Fi mesh baseada no ESP32-C6. O painel em Node-RED demonstrou a viabilidade da solução para monitoramento em tempo real de variáveis ambientais (simuladas), métricas de rede e parâmetros de operação dos dispositivos.

Nos experimentos, o cenário simplificado com um nó filho e distância fixa apresentou baixa variabilidade de latência. A expansão da malha para sete nós evidenciou aumento expressivo da latência e maior variabilidade temporal. As análises de RSSI e SNR reforçaram a influência do ambiente interno e da atenuação do sinal. Por fim, a taxa de transferência apresentou comportamento consistente nos cenários avaliados e o ensaio de falha do nó raiz confirmou a capacidade de auto-recuperação do protocolo, ainda que com tempos de reconfiguração potencialmente críticos para aplicações mais sensíveis.

De modo geral, os resultados confirmam que a arquitetura proposta é funcional e robusta para cenários de IoT e IIoT, mantendo conectividade e capacidade de adaptação com o aumento da topologia. Os resultados de experimentos complementares, envolvendo outras configurações de topologia, encontram-se no Apêndice D.

5 Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho foram realizados testes experimentais envolvendo: avaliação de latência em condição de distância fixa e variável; análise da qualidade do sinal (RSSI e SNR); caracterização da escalabilidade da rede com múltiplos nós; avaliação de taxa de transferência de dados (throughput); análise de taxa de entrega e perda de pacotes; monitoramento do uso de CPU, memória *heap* e temperatura; e teste de resiliência com falha do nó *gateway*.

A análise concentrou-se principalmente em dois cenários: uma topologia simples com um único nó filho e uma topologia expandida com sete nós filhos. No cenário com um nó, observou-se latência média entre 20 ms e 40 ms, com valor mais frequente situado em torno de 28–30 ms e estabilidade ao longo de quatro dias de operação contínua. Considerando que a documentação oficial da Espressif indica latência por salto entre 10 ms e 30 ms Espressif Systems (2025a), os valores obtidos situam-se dentro da faixa esperada para enlaces de um único salto.

Já no cenário com sete nós filhos, verificou-se aumento significativo da latência, com valores predominantemente entre 90 ms e 110 ms, além de ocorrências superiores a 200 ms em rotas com três saltos. Esses valores superam a faixa indicada para latência por salto na documentação; entretanto, destaca-se que o valor especificado pelo fabricante refere-se à latência por hop individual, enquanto os resultados obtidos neste trabalho correspondem à latência fim-a-fim (end-to-end), acumulada ao longo de múltiplos saltos.

Ao avaliar o impacto do tamanho do payload na latência, observou-se que sua influência foi baixa, com médias de 22,60 ms (32 B) e 27,89 ms (1024 B). Esse comportamento é coerente com aplicações IoT de baixo volume de dados e não há, na literatura consultada, valores de referência específicos para comparação direta com a biblioteca ESP-WIFI-MESH utilizando o ESP32-C6, o que reforça a relevância experimental dos resultados obtidos.

A análise da topologia mostrou que o mecanismo de autoconfiguração da biblioteca é eficiente, permitindo a formação e reorganização dinâmica da rede diante da adição ou falha de nós. De acordo com a documentação oficial Espressif Systems (2025a), o tempo típico de formação da rede é inferior a 60 segundos, enquanto o tempo de recuperação é inferior a 10 segundos para falha do nó *root* e inferior a 5 segundos para falha de nó filho. Nos experimentos realizados, o tempo médio de detecção e eleição de novo *gateway* foi de aproximadamente 31 segundos. Embora superior ao valor de referência de 10 segundos indicado para falha do *root*, o resultado permanece dentro do limite máximo de 60 segundos estabelecido para reconstrução da rede, indicando comportamento compatível com as especificações do fabricante, especialmente considerando o ambiente real com interferências e múltiplos nós.

No que se refere à qualidade do sinal, os resultados de RSSI indicaram valores concentrados predominantemente entre -50 dBm e -85 dBm, refletindo diferentes condições de propagação no ambiente analisado. O nó eleito como *gateway* apresentou níveis superiores (-50 dBm a -60 dBm), enquanto os demais nós concentraram-se entre -70 dBm e -80 dBm. A análise em função da distância mostrou tendência geral de degradação do sinal, com região crítica a partir de aproximadamente 7 m, comportamento consistente com modelos clássicos de perda de percurso apresentados na literatura. A métrica SNR corroborou esses resultados, indicando degradação nas mesmas regiões. Mesmo sob condições degradadas, a rede manteve entrega estável de pacotes até cerca de 8 m, apresentando instabilidade apenas em distâncias superiores.

Quanto à taxa de transferência de dados, os melhores resultados foram obtidos quando a rede operou no mesmo canal do ponto de acesso, alcançando aproximadamente 7,35 Mbits/s e jitter médio próximo de 1 ms. Esses valores são compatíveis com as capacidades esperadas para dispositivos baseados em Wi-Fi 2,4 GHz operando em modo single-radio, embora inferiores aos limites teóricos do padrão IEEE 802.11, o que é esperado devido à contenção do meio, overhead de protocolo.

No que se refere à confiabilidade da comunicação, os resultados indicam que a topologia com 1 nó filho apresentou desempenho superior, com taxa média de entrega de pacotes (PDR) de 99,15% e baixa variabilidade ao longo do tempo. Já a topologia com 7 nós filhos apresentou redução da PDR média para 83,57%, acompanhada por maior dispersão dos valores observados, refletida no aumento do desvio padrão e do coeficiente de variação.

A análise do uso de recursos do microcontrolador indicou que o nó atuando como *gateway* apresenta maior utilização de CPU (atingindo aproximadamente 24% no cenário com sete nós) e menor disponibilidade de memória heap, comportamento esperado devido à centralização do gerenciamento e encaminhamento de pacotes. Ainda assim, não foram observados indícios de saturação dos recursos ou instabilidade do sistema. Para métricas como uso de CPU e heap em redes ESP-WIFI-MESH, a literatura não apresenta valores de referência consolidados, o que limita comparações diretas, mas os níveis observados permaneceram dentro de faixas operacionais seguras.

De forma geral, os resultados confirmam a viabilidade do uso do ESP32-C6 e da biblioteca ESP-WIFI-MESH para implementação de redes Wi-Fi mesh estáveis e resilientes, destacando suas capacidades de autoconfiguração e recuperação automática. Por outro lado, evidenciam-se limitações inerentes à arquitetura single-radio e *multi-hop*, especialmente no aumento progressivo da latência e na maior carga computacional sobre o nó *gateway* conforme a rede se expande.

5.1 Perspectivas de continuidade e trabalhos futuros

Como continuidade deste trabalho, diversas linhas de investigação podem ser exploradas com o objetivo de ampliar a robustez experimental e o escopo da avaliação da rede Wi-Fi Mesh baseada no ESP32-C6.

Uma direção relevante consiste na avaliação do uso de múltiplos nós candidatos a raiz, investigando seu impacto sobre o tempo de convergência, a frequência de troca do nó raiz e a estabilidade da rede, considerando métricas como latência e taxa de entrega de pacotes. Adicionalmente, propõe-se a separação do papel de *root/bridge* das funções de aplicação, mantendo o nó raiz dedicado ao gerenciamento da malha e transferindo tarefas de publicação e armazenamento de dados, como MQTT, Node-RED e banco de dados, para um nó externo, como um computador ou Raspberry Pi. Essa abordagem pode contribuir para a redução da carga computacional no nó raiz e melhorar a estabilidade da rede.

Outra perspectiva importante envolve a investigação de estratégias de economia de energia, como os modos *light sleep* e *deep sleep*, analisando seus impactos sobre métricas de desempenho, como latência, taxa de entrega de pacotes e tempo de reconexão, especialmente em aplicações alimentadas por bateria.

Recomenda-se também a realização de experimentos em cenários com maior densidade de nós e em ambientes mais extensos e heterogêneos, bem como a utilização de simuladores de redes, como o NS-3, para avaliação da escalabilidade em larga escala e análise de topologias mais complexas.

Outra linha de continuidade consiste na implementação e avaliação comparativa da arquitetura proposta utilizando outras tecnologias de comunicação sem fio, como ZigBee (IEEE 802.15.4), Bluetooth Mesh e LoRa/LoRaWAN, permitindo analisar diferenças em termos de latência, consumo energético, alcance, escalabilidade e taxa de transferência.

Por fim, destaca-se a importância da realização de testes específicos de segurança, incluindo análise de vulnerabilidades, simulação de ataques e avaliação da robustez dos mecanismos criptográficos, bem como a disponibilização dos dados experimentais utilizados, contribuindo para a reprodutibilidade e validação dos resultados obtidos.

Referências

- CILFONE, A. et al. Wireless mesh networking: An iot-oriented perspective survey on relevant technologies. *Future internet*, MDPI, v. 11, n. 4, p. 99, 2019.
- Eclipse Foundation. *Eclipse Mosquitto*. Ottawa, Canada, 2025. Disponível em: <<https://mosquitto.org>>.
- Espressif Systems. *ESP-WIFI-MESH Throughput Test*. Shanghai, China, 2024. Example and technical documentation. Disponível em: <https://github.com/espressif/esp-mdf/tree/master/examples/function_demo/mwifi/console_test#ESP-WIFI-MESH-Throughput-Test>.
- Espressif Systems. *ESP-WIFI-MESH*. Shanghai, China, 2025. Technical documentation. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-guides/esp-wifi-mesh.html>>.
- Espressif Systems. *ESP32-C6-DevKitC-1 v1.2 User Guide*. Shanghai, China, 2025. Technical documentation. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32c6/esp32-c6-devkitc-1/user_guide.html>.
- GlobalData. *Strategic Intelligence: Internet of Things*. 2025. Acesso em: 6 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.globaldata.com/store/report/iot-theme-analysis/>>.
- GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- HIPP, R. D. *The SQLite Database Engine*. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.sqlite.org/index.html>>.
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T G.1010: End-user multimedia QoS categories*. Geneva, Switzerland, 2001. Recommendation ITU-T. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1010/en>>.
- KARL, H.; WILLIG, A. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- MORAI, J.; KUNTAWAR, S. V. Performing open source wifi mesh sensor network using esp32. *Journal of Emerging Technologies and Innovate Research (JETIR)*, v. 8, n. 3, p. 12–17, 2021.
- MORAI, J.; KUNTAWAR, S. V. Performing open source wifi mesh sensor network using esp32. *Journal of Emerging Technologies and Innovate Research (JETIR)*, v. 8, n. 3, p. 12–17, 2021.
- NGUYEN, M. D. et al. A comparative study of wi-fi technologies in wireless sensor networks. *Computer Networks and Communications*, p. 75–87, 2025.
- Node-RED. *Node-RED Official Documentation*. [S.l.], 2025. Disponível em: <<https://nodered.org/docs>>.

Node-RED. *Running Node-RED Locally*. [S.l.], 2025. Official documentation. Disponível em: <<https://nodered.org/docs/getting-started/local>>.

OASIS. *MQTT Version 3.1.1 Plus Errata 01*. Burlington, MA, 2019. Technical specification. Disponível em: <<https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>>.

OWENS, M. *The Definitive Guide to SQLite*. Berkeley, CA: Apress, 2010.

RENTERÍA-MANJARREZ, R.; ORTIZ-CARRASCO, C.; GAXIOLA-SÁNCHEZ, O. Análisis comparativo de tecnologías bluetooth, wifi, zigbee y lora con un enfoque en la implementación de una red de malla. *Revista ELECTRO*, v. 46, n. 1, p. 148–153, 2024.

SAHA, D. Improving iot security in wireless sensor networks. *Smart Internet of Things*, v. 1, n. 4, p. 289–297, 2024.

SANTOS, G. H. de A. et al. Aplicação de redes esp-wifi-mesh em zona rural. *Revista Científica SENAI-SP-Educação, Tecnologia e Inovação/ SENAI-SP Scientific Journal-Education, Technology and Innovation*, v. 1, n. 1, p. 54–72, 2022.

SANTOS, L. et al. *Performance Assessment of ESP8266 Wireless Mesh Networks*. *Information*, 13 (5), 210. 2022.

TARIQ, U. et al. A critical cybersecurity analysis and future research directions for the internet of things: a comprehensive review. *sensors*, Mdpi, v. 23, n. 8, p. 4117, 2023.

UZOUGBO, O. I.; OLANREWaju, O. A.; KAYODE, A. K. Node-red and iot analytics: A real-time data processing and visualization platform. *TSJPAS) A Subsid. Tech-Sphere Multidiscip. Int. J.(TSMIJ)*, v. 1, p. 3672–4648, 2024.

WANG, E. et al. Design of an agile training system based on wireless mesh network. *IEEE Access*, IEEE, v. 10, p. 84302–84316, 2022.

YI, P. et al. Security in wireless mesh networks: challenges and solutions. In: IEEE. *2009 Sixth International Conference on Information Technology: New Generations*. [S.l.], 2009. p. 423–428.

YOPPY et al. Performance evaluation of esp8266 mesh networks. In: IOP PUBLISHING. *journal of physics: Conference series*. [S.l.], 2019. v. 1230, n. 1, p. 012023.

ZHANG, Y.; LUO, J.; HU, H. (Ed.). *Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards*. 1. ed. Boca Raton, FL: Auerbach Publications, 2007.

ZHAO, F.; GUIBAS, L. J. *Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2004.

Apêndices

APÊNDICE A – Protótipos da API ESP-WIFI-MESH

Este apêndice apresenta os principais protótipos das funções da API ESP-WIFI-MESH utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

A.1 Inicialização da malha

Algoritmo 1 – Funções de inicialização da ESP-WIFI-MESH

```
1: esp_mesh_init()
2: esp_mesh_start()
```

As funções acima são responsáveis pela inicialização da estrutura interna da malha e pelo início efetivo da operação da rede Mesh no dispositivo.

A.2 Configuração da rede

Algoritmo 2 – Funções de configuração da malha.

```
1: esp_mesh_set_config(config)
2: esp_mesh_set_self_organized(enable, select_parent)
```

Essas funções permitem definir os parâmetros operacionais da rede e habilitar o modo de organização automática, no qual os nós selecionam dinamicamente seus pais com base na qualidade do enlace.

A.3 Identificação do papel do nó

Algoritmo 3 – Verificação do papel do dispositivo na malha.

```
1: esp_mesh_is_root()
```

Essa função permite verificar se o dispositivo atua como nó raiz (*root*) da malha.

A.4 Comunicação entre os nós

Algoritmo 4 – Funções de envio e recebimento de dados.

```
1: esp_mesh_send(to, data, flag, opt, opt_count)
2: esp_mesh_recv(from, data, timeout_ms, flag, opt, opt_count)
```

Na função `esp_mesh_send`, os parâmetros possuem os seguintes significados:

- `to`: endereço do destinatário final do pacote.
- `data`: estrutura contendo o pacote de dados a ser transmitido.
- `flag`: define a direção e o modo de envio.
- `opt` e `opt_count`: parâmetros opcionais de controle da transmissão.

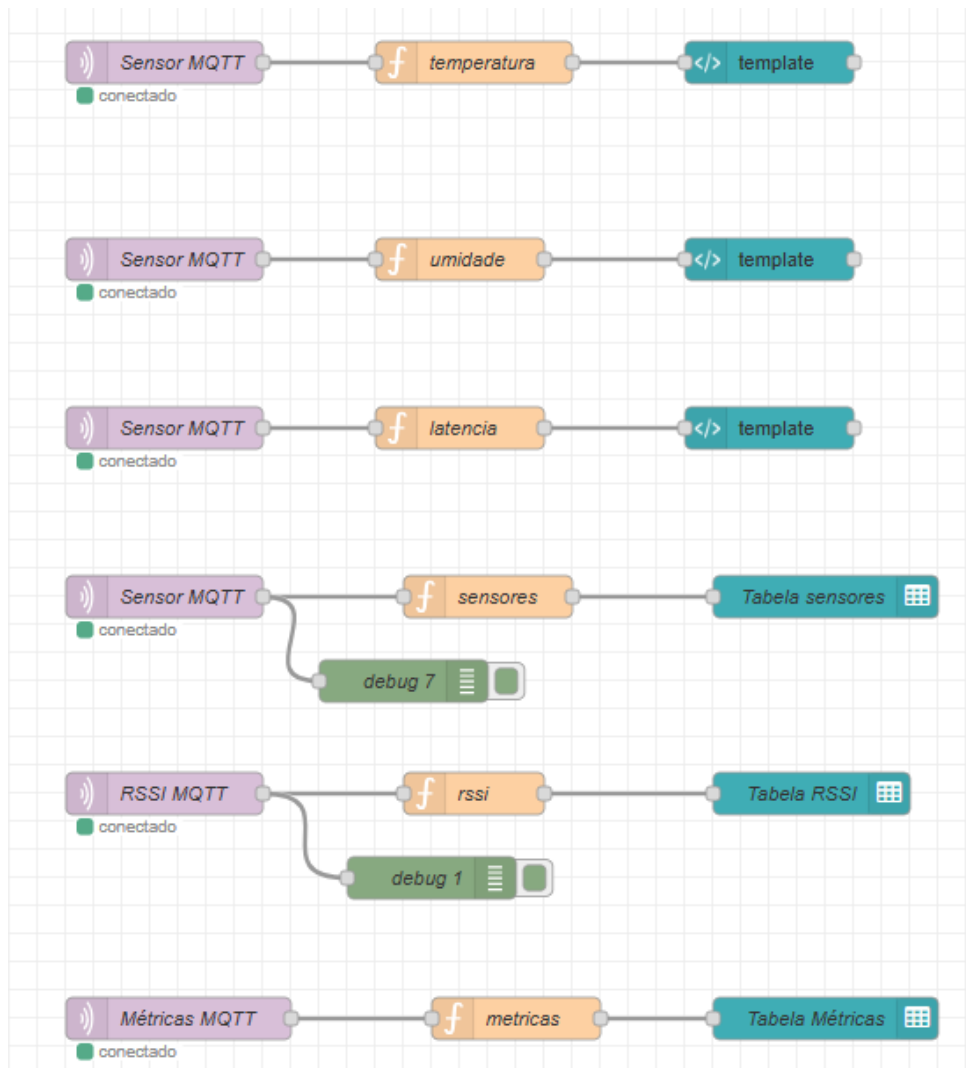
A função `esp_mesh_recv` é utilizada para o recebimento de dados provenientes da rede mesh ou de redes IP externas, cujos parâmetros são descritos a seguir:

- `from`: endereço do nó de origem.
- `data`: estrutura que armazena os dados recebidos.
- `timeout_ms`: tempo máximo de espera para recebimento.
- `flag`: identifica a origem do pacote recebido.
- `opt` e `opt_count`: opções adicionais de controle.

APÊNDICE B – Fluxos detalhados do Node-RED

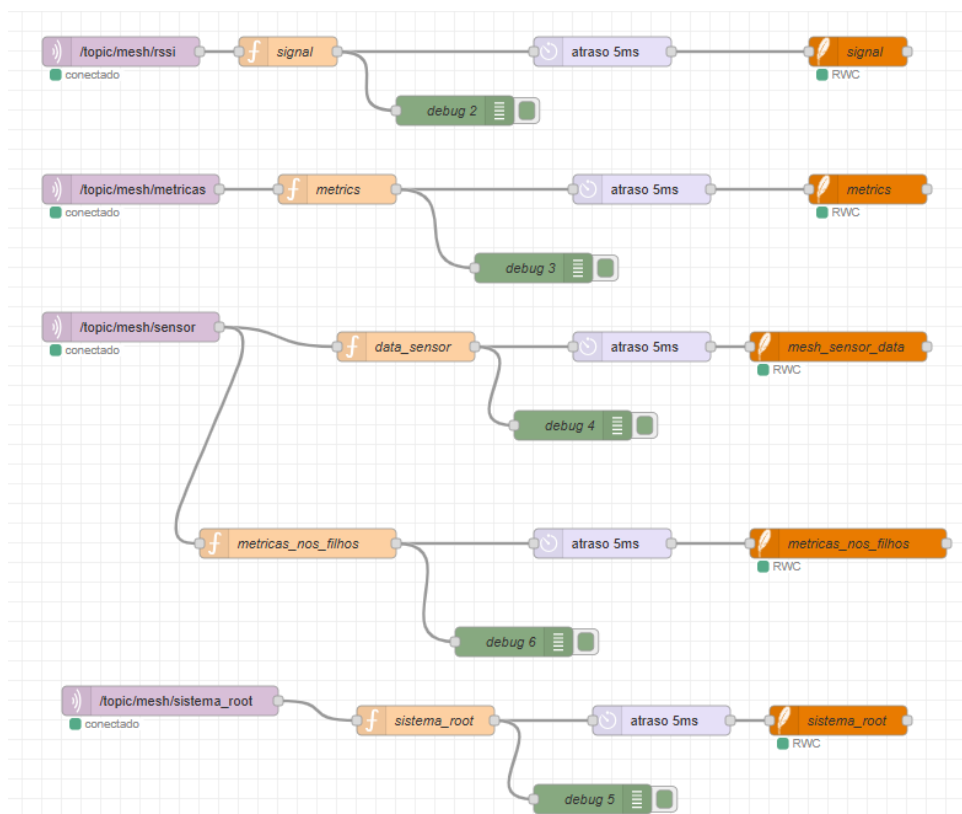
Este apêndice apresenta os fluxos completos implementados no Node-RED para coleta e armazenamento dos dados.

Figura 29 – Fluxo de coleta e exibição dos dados transmitidos pelo ESP32-C6 *gateway*.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30 – Fluxo completo de armazenamento dos dados no Node-RED.



Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE C – Estrutura das tabelas no banco de dados

Este apêndice apresenta a estrutura das tabelas implementadas no banco de dados SQLite para armazenamento das informações coletadas durante os experimentos.

C.1 Tabela **metrics**

Algoritmo 5 – Estrutura da tabela **metrics**

- 1: id : INTEGER (PK, autoincrement)
 - 2: timestamp : DATETIME
 - 3: sucesso : REAL
 - 4: perda : REAL
 - 5: layer : INTEGER
 - 6: nos : INTEGER
 - 7: trocas_pai : INTEGER
 - 8: ult_troca : INTEGER
-

C.2 Tabela **signal**

Algoritmo 6 – Estrutura da tabela **signal**

- 1: id : INTEGER (PK, autoincrement)
 - 2: timestamp : DATETIME
 - 3: mac : TEXT
 - 4: rssi : INTEGER
 - 5: snr : INTEGER
 - 6: mac_pai : TEXT
-

C.3 Tabela **mesh_sensor_data**

Algoritmo 7 – Estrutura da tabela **mesh_sensor_data**

- 1: id : INTEGER (PK, autoincrement)
 - 2: timestamp : DATETIME
 - 3: mac : TEXT
 - 4: temperatura : FLOAT
 - 5: umidade : FLOAT
 - 6: latencia : INTEGER
 - 7: hops : INTEGER
-

C.4 Tabela `system_metrics`

Algoritmo 8 – Estrutura da tabela `system_metrics`

- 1: `id` : INTEGER (PK, autoincrement)
 - 2: `timestamp` : DATETIME
 - 3: `mac` : TEXT
 - 4: `temp_interna` : FLOAT
 - 5: `free_heap` : INTEGER
 - 6: `cpu_total` : FLOAT
 - 7: `cpu_idle` : FLOAT
-

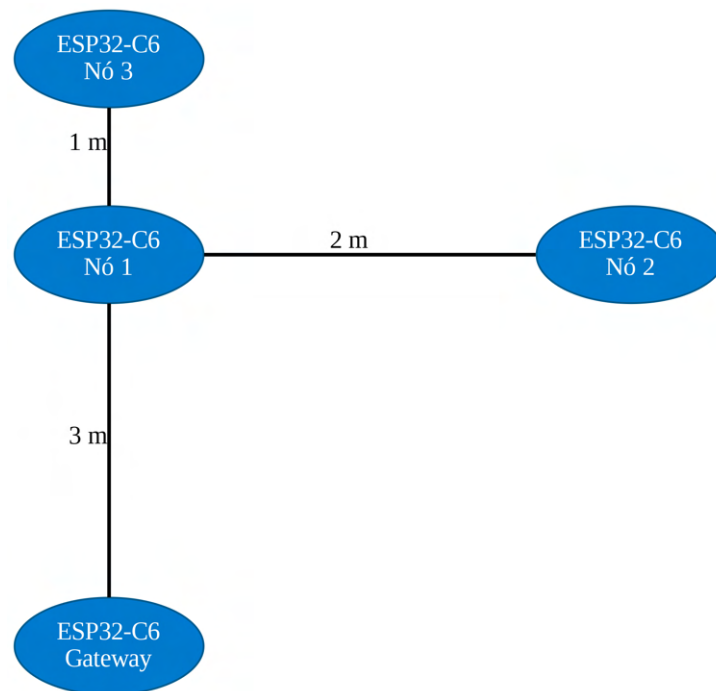
APÊNDICE D – Resultados complementares

Este apêndice apresenta resultados experimentais complementares realizados durante o desenvolvimento desta pesquisa. Tais experimentos envolveram variações adicionais de topologia, configurações operacionais e análises estatísticas que, embora relevantes, não foram incluídas no corpo principal do texto a fim de preservar a objetividade da discussão.

D.1 Avaliação de desempenho em topologia com 3 Nós Filhos

A Figura 31 apresenta a configuração experimental composta por um nó atuando como *gateway* e três nós filhos, mantendo-se a distância fixa entre os dispositivos. Esse cenário intermediário foi considerado com o intuito de observar a evolução do desempenho da rede em relação à configuração com único nó filho, permitindo avaliar o impacto inicial da expansão da malha.

Figura 31 – Configuração experimental com 1 *gateway* e 3 nós filhos.

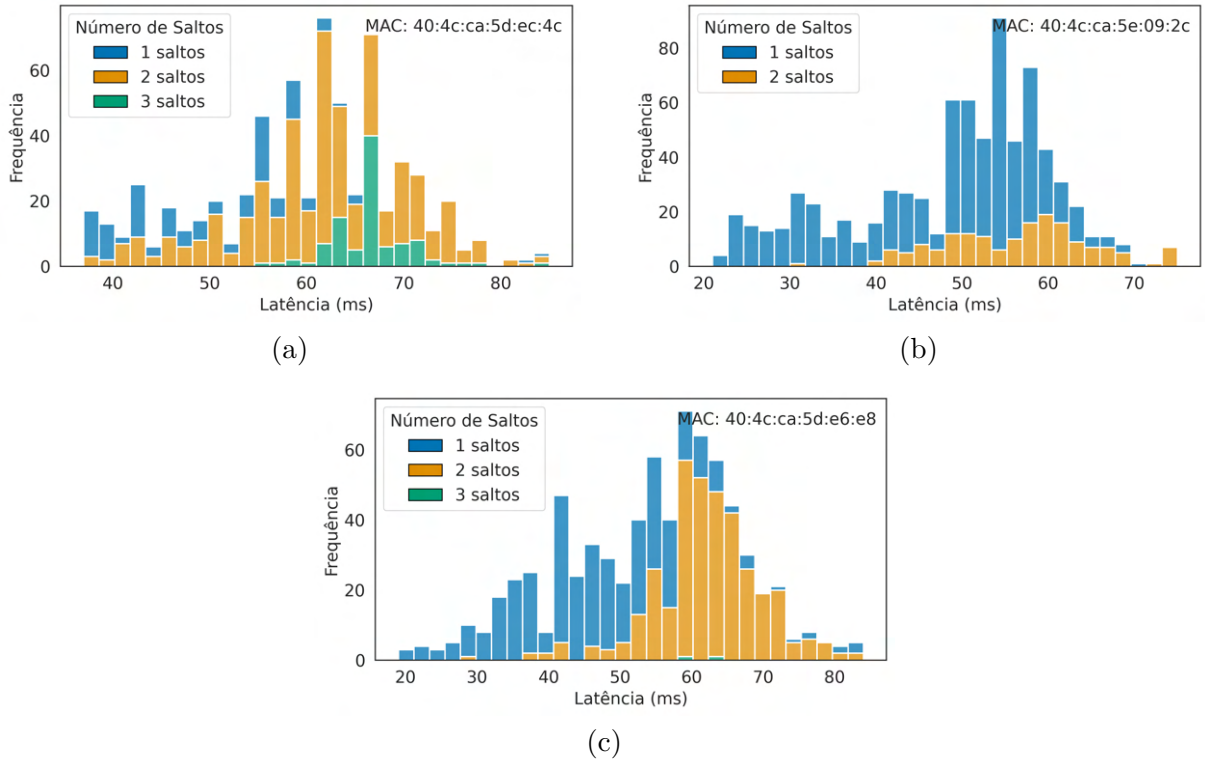


Fonte: Elaborado pela autora.

D.1.1 Avaliação da latência ao longo do tempo

A Figura 32 apresenta o histograma da latência ao longo do tempo. Com o aumento da densidade da rede, observa-se um incremento nos valores de latência.

Figura 32 – Histograma da latência ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 26 a 29 de outubro: (a) nó 1; (b) nó 2; (c) nó 3.



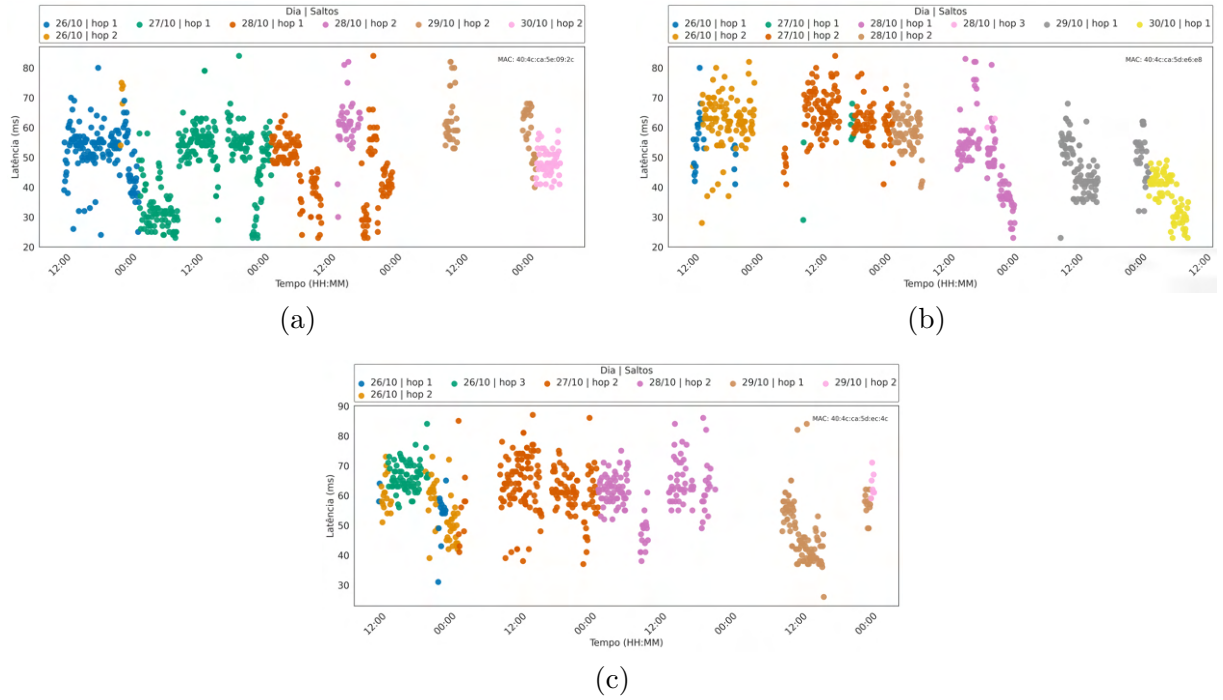
Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que a maior parte das amostras de latência concentra-se na faixa de 50 ms a 65 ms. Ao comparar esses resultados com a topologia contendo apenas um nó filho 11, na qual a latência se concentrava na faixa de 20 ms a 40 ms, constata-se que a topologia com três nós filhos e um nó gateway apresenta um aumento expressivo da latência.

A análise temporal apresentado na Figura 33, reforça os resultados observados nos histogramas. Embora sejam registrados valores de latência distribuídos aproximadamente entre 20 ms e 90 ms, verifica-se que a maior concentração das amostras situa-se na faixa de 50 ms a 70 ms.

A alternância observada no número de saltos para um mesmo nó evidencia o mecanismo de reconfiguração topológica automática da rede, acionado em resposta às variações na qualidade do canal sem fio. Ademais, observa-se estabilidade temporal do sistema, uma vez que não são identificadas tendências de aumento ou de redução progressiva da latência ao longo do período analisado.

Figura 33 – Dispersão da latência ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 26 a 29 de outubro: (a) nó 1; (b) nó 2; (c) nó 3.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, a Tabela 17 sintetiza os valores médios de latência e desvio padrão em função do número de saltos da rede.

Tabela 17 – Latência média e desvio padrão por dia (26 a 30 de outubro).

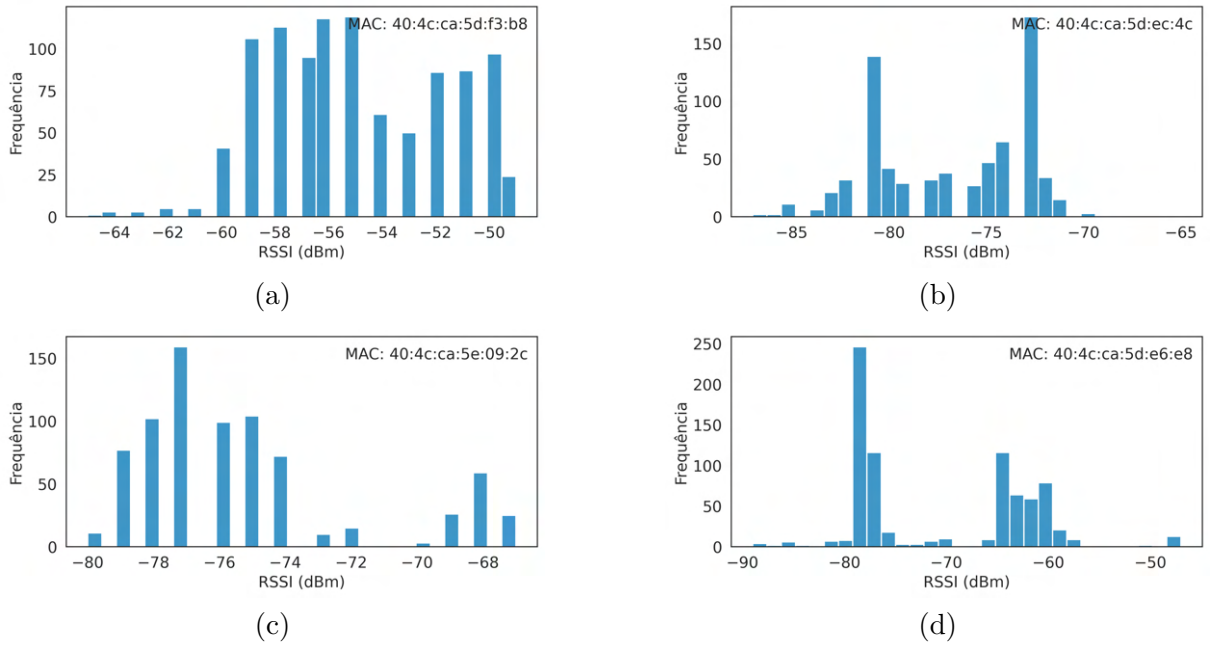
Nó	Dia	Salt.	Méd. (ms)	DP (ms)	Nó	Dia	Salt.	Méd. (ms)	DP (ms)
nó 1	26/10	1	51,75	8,95	nó 2	28/10	1	49,81	12,24
nó 1	26/10	2	68,80	8,70	nó 2	28/10	2	58,27	6,33
nó 1	27/10	1	47,29	12,54	nó 2	28/10	3	61,50	2,12
nó 1	28/10	1	44,74	11,09	nó 2	29/10	1	48,16	8,32
nó 1	28/10	2	61,03	8,68	nó 2	30/10	1	36,92	6,96
nó 1	29/10	2	60,83	8,88	nó 3	26/10	1	54,29	7,79
nó 1	30/10	2	48,37	4,49	nó 3	26/10	2	55,75	8,40
nó 2	26/10	1	55,38	8,91	nó 3	26/10	3	66,62	4,13
nó 2	26/10	2	62,03	8,67	nó 3	27/10	2	63,19	9,24
nó 2	27/10	1	56,67	11,24	nó 3	28/10	2	60,85	8,46
nó 2	27/10	2	63,37	7,05	nó 3	29/10	1	48,82	9,38
					nó 3	29/10	2	63,71	4,19

Fonte: Elaborado pela autora.

D.1.2 Avaliação da qualidade do sinal ao longo do tempo

A Figura 34 apresenta os histogramas de RSSI para os nós da rede ao longo do período de coleta.

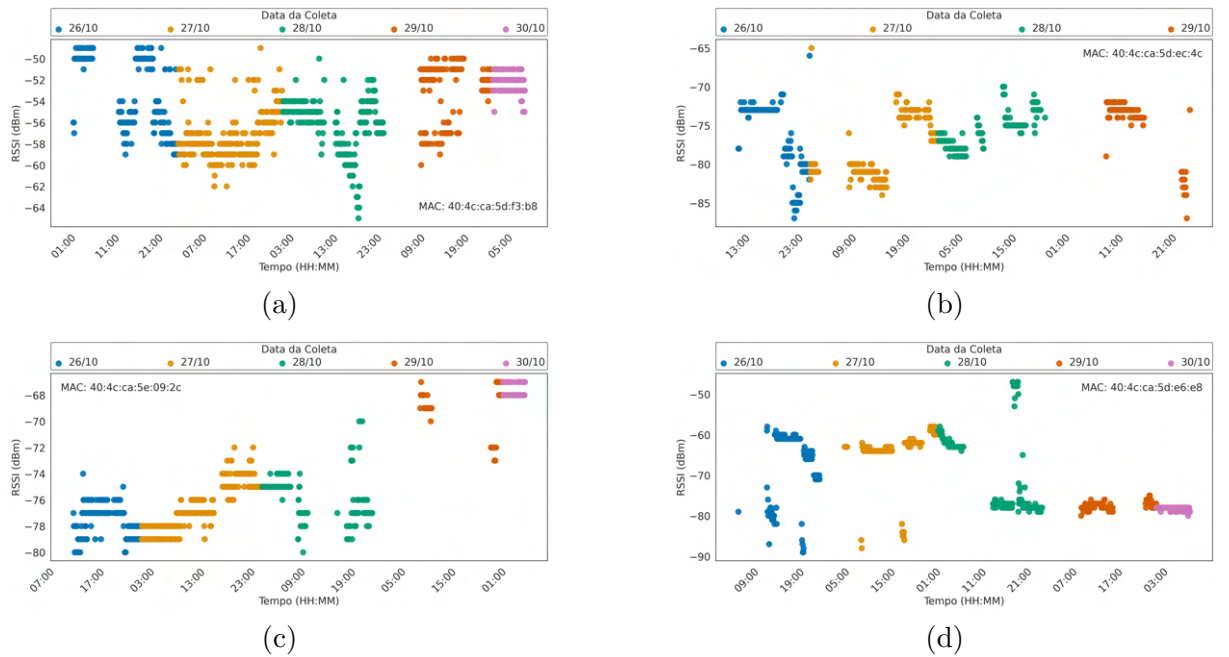
Figura 34 – Histogramas de RSSI ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 26 a 29 de Outubro: (a) nó *gateway*; (b) nó 1; (c) nó 2; (d) nó 3.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que o nó *gateway* concentra seus valores em faixas entre -52 dBm e -57 dBm. Em contraste, os demais nós apresentam distribuições centradas entre -75 dBm e -79 dBm.

Figura 35 – Dispersão de RSSI ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 26 a 29 de Outubro: (a) nó *gateway*; (b) nó 1; (c) nó 2; (d) nó 3.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 35, os gráficos de dispersão permitem analisar o comportamento temporal do RSSI. Verifica-se que o nó *gateway* mantém comportamento mais homogêneo ao longo do tempo, com menor oscilação entre medições consecutivas.

Os nós 1 e 3 também apresentam padrões relativamente estáveis, com pequenas flutuações distribuídas ao longo dos dias. Já o nó 2 evidencia maior variação temporal em alguns períodos específicos, com pontos mais espalhados verticalmente, o que indica maior sensibilidade a variações do ambiente ou condições do enlace.

De forma geral, a análise visual dos histogramas e das dispersões é confirmada quantitativamente pelos valores médios e desvios padrão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – RSSI médio e desvio padrão por dia (26 a 30 de Outubro).

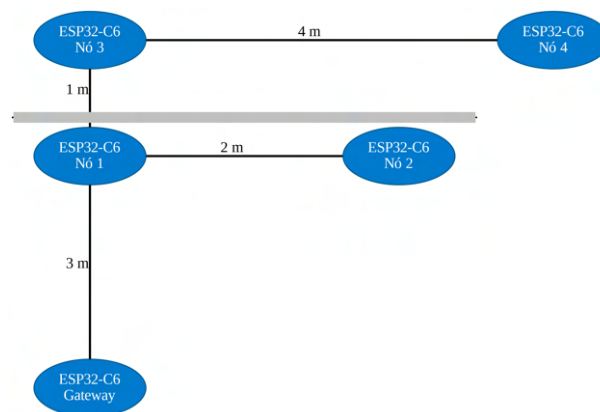
Nó	Dia	Méd. (dBm)	DP (dBm)	Nó	Dia	Méd. (dBm)	DP (dBm)
nó <i>gateway</i>	26/10	-53,22	3,38	nó 2	26/10	-66,90	8,25
nó <i>gateway</i>	27/10	-57,36	2,23	nó 2	27/10	-63,78	4,85
nó <i>gateway</i>	28/10	-56,22	2,47	nó 2	28/10	-70,74	9,32
nó <i>gateway</i>	29/10	-52,87	2,74	nó 2	29/10	-77,56	0,81
nó <i>gateway</i>	30/10	-52,28	0,92	nó 2	30/10	-78,18	0,41
nó 1	26/10	-77,56	1,22	nó 3	26/10	-76,35	4,47
nó 1	27/10	-76,38	1,72	nó 3	27/10	-78,83	3,68
nó 1	28/10	-75,86	1,66	nó 3	28/10	-75,83	2,14
nó 1	29/10	-69,03	1,67	nó 3	29/10	-74,25	3,14
nó 1	30/10	-67,69	0,47				

Fonte: Elaborado pela autora.

D.2 Avaliação de desempenho em topologia com 4 Nós Filhos

A Figura 36 apresenta a configuração experimental composta por um nó atuando como *gateway* e quatro nós filhos.

Figura 36 – Configuração experimental com 1 *gateway* e 4 nós filhos.

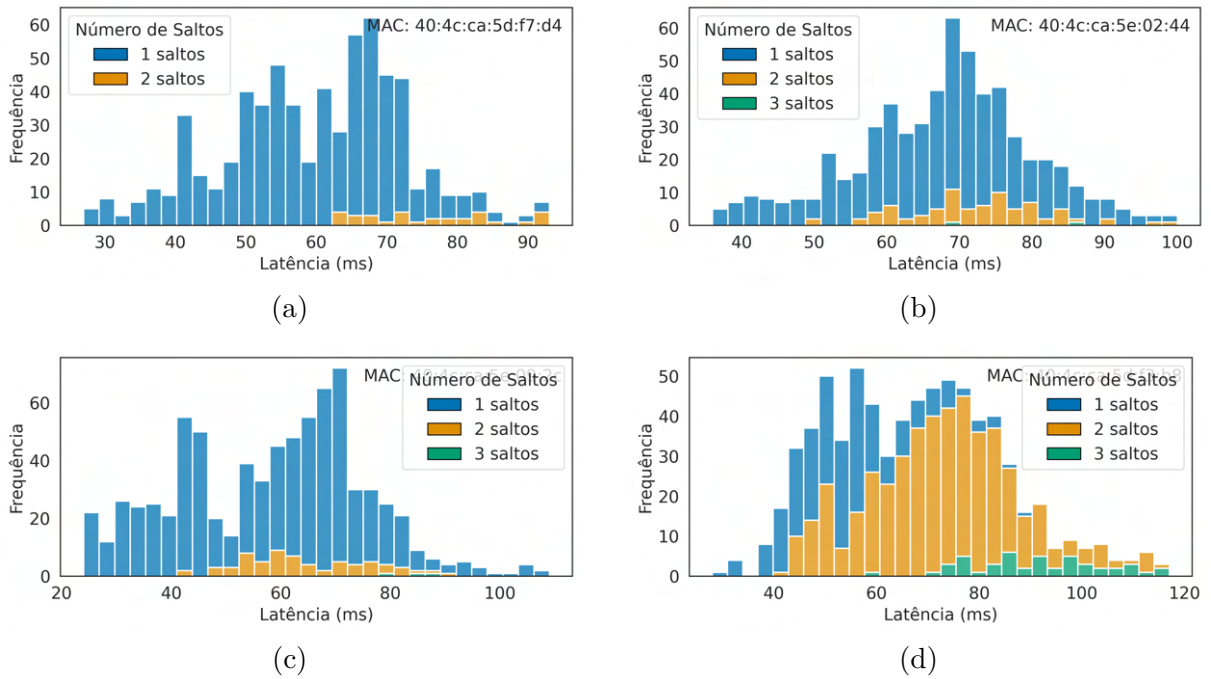


Fonte: Elaborado pela autora.

D.2.1 Avaliação da latência ao longo do tempo

Com a adição de um quarto nó filho, observa-se uma nova elevação nos valores de latência em comparação às topologias anteriores. Os resultados correspondentes são apresentados na Figura 37, que reúne os histogramas da latência para os quatro nós no período de coleta considerado.

Figura 37 – Histogramas da latência ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 15 a 20 de novembro: (a) nó 1; (b) nó 2; (c) nó 3; (d) nó 4.



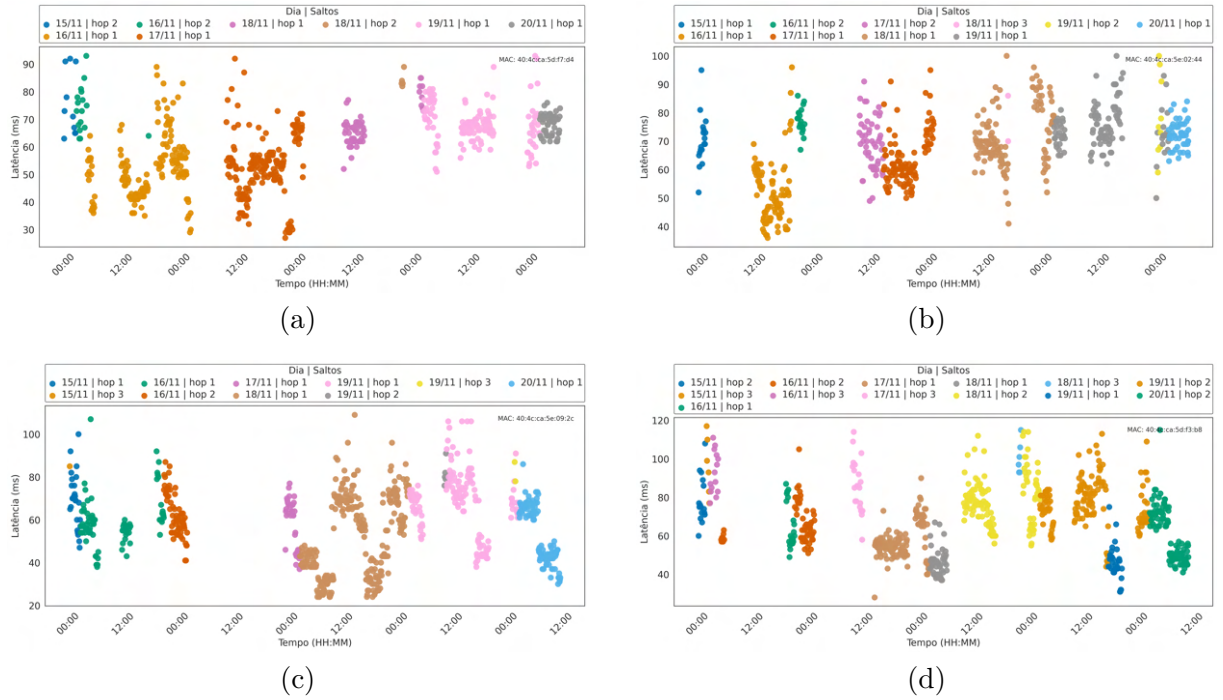
Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que a distribuição das latências se estende aproximadamente de 40 ms a 100 ms, com maior concentração entre 60 ms e 80 ms. Em comparação direta com a topologia composta por três nós filhos, cuja faixa predominante situava-se entre 50 ms e 65 ms, verifica-se um aumento perceptível tanto na média quanto na dispersão dos valores de latência. Esse comportamento indica que a inclusão de um novo nó contribui para o aumento do tempo de comunicação na rede, possivelmente em decorrência do maior número de saltos e do compartilhamento do meio de transmissão entre um número maior de dispositivos.

Esse comportamento é reforçado pela dispersão da latência ao longo do tempo, apresentada na Figura 38.

Observa-se uma tendência de aumento da latência média à medida que cresce o número de saltos na rota, evidenciando o impacto da profundidade da malha no desempenho da comunicação. As rotas com um único salto apresentam valores inferiores e maior estabilidade, enquanto rotas com dois e três saltos exibem maior variabilidade e, em alguns casos, elevação mais acentuada da latência.

Figura 38 – Dispersão da latência ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 15 a 20 de novembro: (a) nó 1; (b) nó 2; (c) nó 3; (d) nó 4.



Fonte: Elaborado pela autora.

Entretanto, esse aumento não ocorre de forma estritamente linear, uma vez que determinados nós mantêm níveis moderados de latência mesmo em rotas mais longas. Esse comportamento evidencia a influência de fatores adicionais, como a qualidade do enlace, o algoritmo de seleção de rotas e as condições do meio de transmissão.

A Tabela 19 apresenta a latência média e o desvio padrão, sintetizando de forma quantitativa os resultados previamente observados nos gráficos e permitindo uma análise comparativa mais objetiva do comportamento da rede.

D.2.2 Avaliação da qualidade do sinal ao longo do tempo

A Figura 39 apresenta a distribuição dos valores de RSSI para cada nó no intervalo analisado. Em seguida, a Figura 40 evidencia como esses valores variam ao longo do tempo, destacando eventuais oscilações e períodos de maior instabilidade.

Observa-se, a partir dos histogramas e dos gráficos de dispersão apresentados nas Figuras 39 e 40, que o nó *gateway* apresentou os maiores valores de RSSI, entre aproximadamente -55 dBm e -58 dBm, indicando melhor qualidade de enlace ao longo de todo o período analisado. Além disso, nota-se baixa variabilidade diária, com desvios padrão inferiores a 3 dBm, o que evidencia estabilidade do sinal.

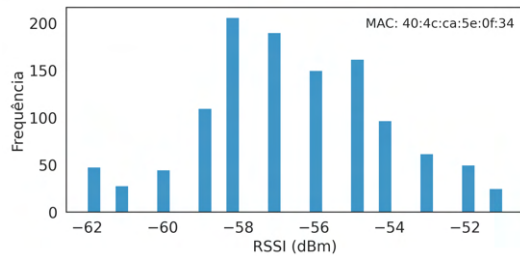
Os nós filhos, apresentaram níveis de RSSI intermediários, em torno de -72 dBm a -79 dBm, mantendo comportamento relativamente estável ao longo dos dias.

Tabela 19 – Latência média e desvio padrão por dia (15 a 20 de Novembro).

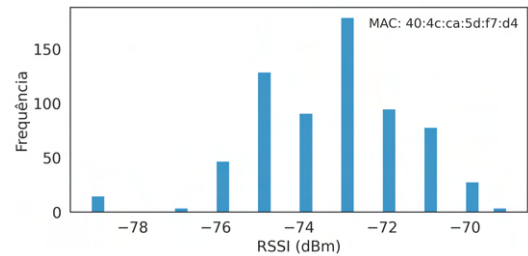
Nó	Dia	Salt.	Méd. (ms)	DP (ms)	Nó	Dia	Salt.	Méd. (ms)	DP (ms)
nó 1	15/11	2	75,60	11,71	nó 3	16/11	2	62,75	10,54
nó 1	16/11	1	51,85	11,32	nó 3	17/11	1	58,68	11,47
nó 1	16/11	2	73,59	8,34	nó 3	18/11	1	51,74	18,74
nó 1	17/11	1	52,76	11,44	nó 3	19/11	1	68,21	14,96
nó 1	18/11	1	67,25	6,81	nó 3	19/11	2	81,60	5,68
nó 1	19/11	1	68,21	7,08	nó 3	20/11	1	53,03	13,25
nó 1	20/11	1	68,32	3,71	nó 4	15/11	2	78,62	12,24
nó 2	15/11	1	70,28	9,03	nó 4	15/11	3	96,50	15,39
nó 2	16/11	2	77,26	4,59	nó 4	16/11	2	66,28	10,49
nó 2	17/11	1	63,70	9,00	nó 4	16/11	3	92,71	10,95
nó 2	17/11	2	69,00	9,14	nó 4	17/11	1	57,10	9,36
nó 2	18/11	1	71,46	10,61	nó 4	17/11	3	86,48	13,68
nó 2	18/11	3	78,00	11,31	nó 4	18/11	1	46,09	7,16
nó 2	19/11	2	78,67	14,26	nó 4	18/11	3	100,83	8,54
nó 2	20/11	1	72,52	4,72	nó 4	19/11	1	45,83	8,66
nó 3	15/11	1	69,12	12,82	nó 4	19/11	2	77,09	12,05
nó 3	15/11	3	85,00	0,0	nó 4	20/11	2	60,81	13,44

Fonte: Elaborado pela autora.

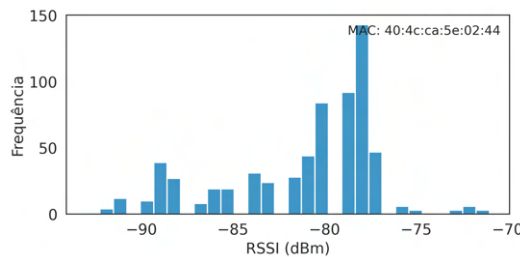
Figura 39 – Histogramas de RSSI ao longo do tempo, com coleta realizada de 15 a 20 de Novembro: (a) nó gateway; (b) nó 1; (c) nó 2; (d) nó 3; (e) nó 4.



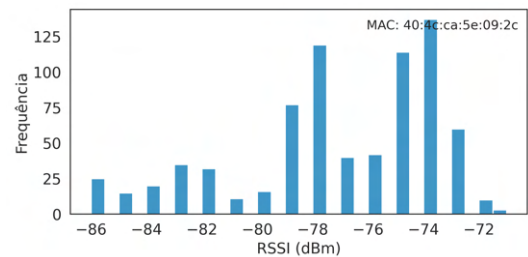
(a) nó gateway



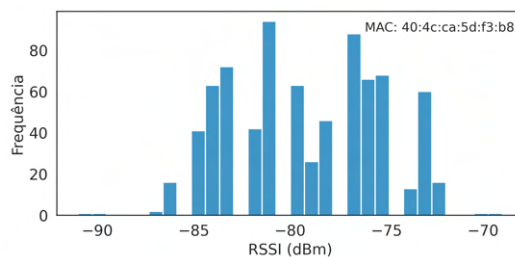
(b) nó 1



(c) nó 2



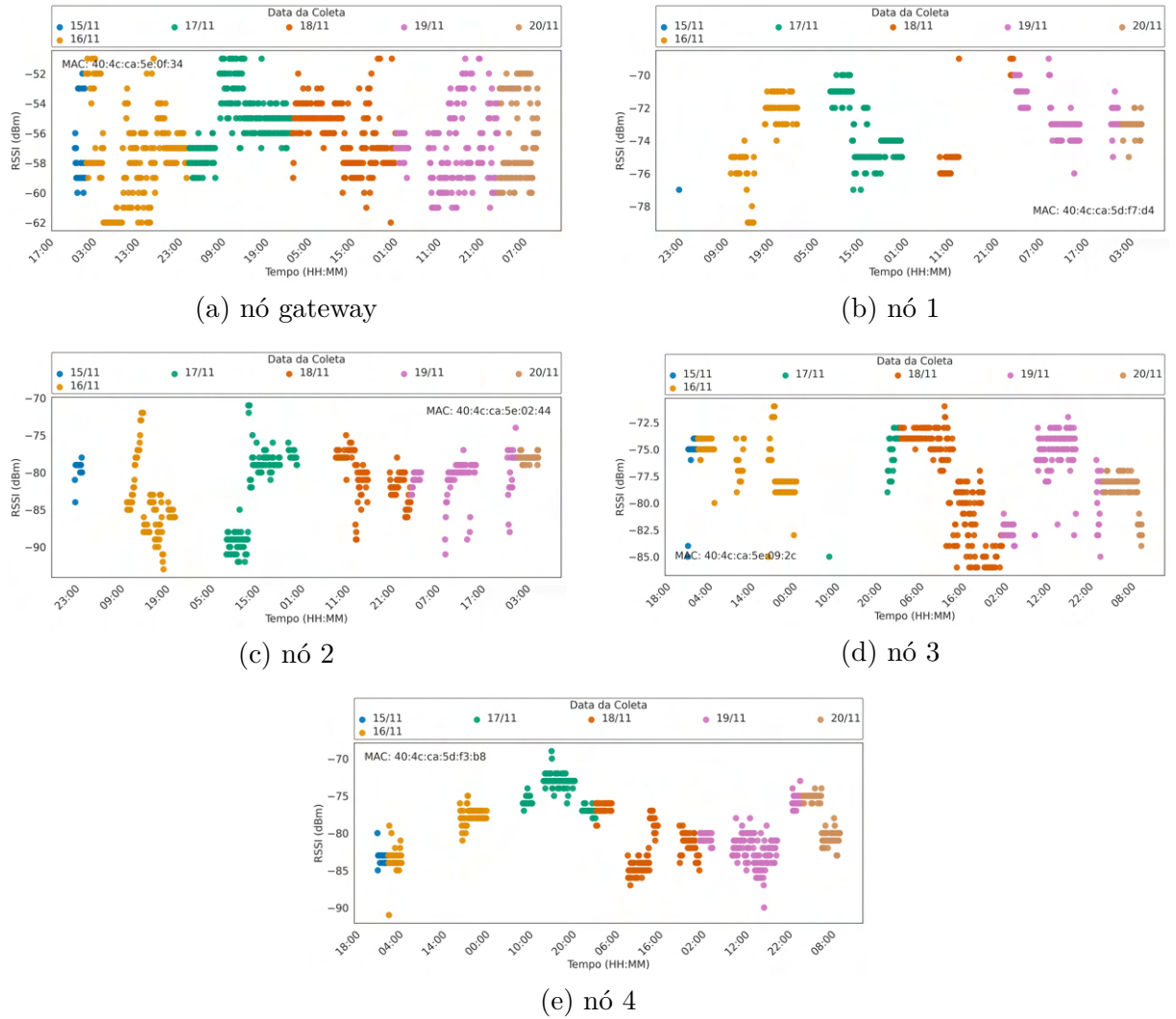
(d) nó 3



(e) nó 4

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 40 – Dispersão do RSSI ao longo do tempo para os nós, com coleta realizada no período de 15 a 20 de Novembro: (a) nó gateway; (b) nó 1; (c) nó 2; (d) nó 3; (e) nó 4.



Fonte: Elaborado pela autora.

De forma geral, a partir da Tabela 20, verifica-se que, apesar das diferenças na intensidade do sinal entre os nós, não foram observadas variações abruptas ou instabilidades significativas ao longo do tempo, apresentando baixa dispersão dos valores.

Tabela 20 – RSSI médio e desvio padrão por dia (15 a 20 de Novembro).

Nó	Dia	Méd. (dBm)	DP (dBm)	Nó	Dia	Méd. (dBm)	DP (dBm)
nó <i>gateway</i>	15/11	-57,23	2,54	nó 2	18/11	-80,40	2,85
nó <i>gateway</i>	16/11	-57,88	2,79	nó 2	19/11	-80,27	2,47
nó <i>gateway</i>	17/11	-55,28	1,95	nó 2	20/11	-78,00	0,40
nó <i>gateway</i>	18/11	-56,15	1,83	nó 3	15/11	-75,52	2,53
nó <i>gateway</i>	19/11	-57,11	2,45	nó 3	16/11	-76,54	2,27
nó <i>gateway</i>	20/11	-56,54	2,68	nó 3	17/11	-75,28	2,27
nó 1	15/11	-77,00	1,53	nó 3	18/11	-77,75	4,64
nó 1	16/11	-73,75	2,40	nó 3	19/11	-77,22	3,65
nó 1	17/11	-73,49	1,83	nó 3	20/11	-78,65	1,54
nó 1	18/11	-74,37	2,31	nó 4	15/11	-83,20	0,81
nó 1	19/11	-72,75	1,07	nó 4	16/11	-79,59	3,03
nó 1	20/11	-73,06	0,47	nó 4	17/11	-74,42	1,95
nó 2	15/11	-79,45	1,23	nó 4	18/11	-81,05	3,37
nó 2	16/11	-83,85	4,76	nó 4	19/11	-80,95	2,98
nó 2	17/11	-82,07	5,49	nó 4	20/11	-77,94	2,90

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE E – Código-fonte do projeto

O código-fonte completo desenvolvido neste trabalho encontra-se disponível em repositório público no GitHub, no endereço:

[<https://github.com/Graziele-Rodrigues/rede_mesh_esp32>](https://github.com/Graziele-Rodrigues/rede_mesh_esp32)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Computação



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado Implementação e caracterização de uma rede Wi-Fi Mesh para sistemas eletrônicos embarcados é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 6 de março de 2026.

Graziele de Cássia Rodrigues