



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA**  
**CENTRO DE CIÊNCIA EXATAS E TECNOLOGIA - CCET**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEE**

**LUÍS FELIPE MACIEL PINHEIRO**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO PARA IOT BASEADO EM UM  
GATEWAY CROSS-BAND COM TECNOLOGIA WI-FI 6 E ESP32-C5**

**São Luís – MA**

**2026**

**LUÍS FELIPE MACIEL PINHEIRO**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO PARA IOT BASEADO EM UM  
GATEWAY CROSS-BAND COM TECNOLOGIA WI-FI 6 E ESP32-C5**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. M.Sc Marcos Tadeu Rezende de Araujo

São Luís – MA  
2026

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Maciel Pinheiro, Luís Felipe.

SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO PARA IOT BASEADO EM UM  
GATEWAY CROSS-BAND COM TECNOLOGIA WI-FI 6 E ESP32-C5 /  
Luís Felipe Maciel Pinheiro. - 2026.

1 f.

Orientador(a): Marcos Tadeu Rezende de Araujo.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,  
Universidade Federal do Maranhão, Ufma - Cceet, 2026.

1. Internet das Coisas. 2. Esp32-c5. 3. Gateway  
Cross-band. I. Rezende de Araujo, Marcos Tadeu. II.  
Título.

**LUÍS FELIPE MACIEL PINHEIRO**

**Sistema de Monitoramento Remoto para IoT Baseado em um Gateway Cross-Band com  
Tecnologia Wi-Fi 6 e ESP32-C5**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. M.Sc Marcos Tadeu Rezende de Araujo

**Professor orientador**

Prof. M.Sc Marcos Tadeu Rezende de Araujo  
Universidade Federal do Maranhão

**Membros da banca examinadora**

Prof. Dr. Carlos Alberto Brandão Barbosa Leite  
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Angel Fernando Torrico Caceres  
Universidade Federal do Maranhão

São Luís – MA  
2026

## AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho não representa apenas o fim de um ciclo acadêmico, mas a vitória de todos aqueles que, de forma direta ou indireta, caminharam ao meu lado.

Aos meus pais, Jane Santiago Maciel e Jefferson Claudino Costa Pinheiro, que são o meu alicerce e a minha maior inspiração. Obrigado pelo apoio incondicional, pelos sacrifícios muitas vezes silenciosos e por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que eu duvidei. Tudo o que sou e o que conquistei até aqui devo a vocês.

Aos meus irmãos, João Victor, João Marcos e Maria Ísis, pela parceria de uma vida inteira. Obrigado por serem meu porto seguro, pelas palavras de incentivo e por tornarem a caminhada mais leve com a presença e o companheirismo de sempre.

Aos meus amigos de vida, Carlos Eduardo, Davi e Gustavo, que estiveram presentes nos momentos de lazer e de descanso, garantindo o equilíbrio necessário para seguir em frente. E aos meus amigos e companheiros de faculdade, Carlos Eduardo, Derik, Felipe, Felype, Gonçalo, João Gabriel, Khristian, Maísa, Rodrigo, Rômulo e Yury, que dividiram comigo as noites em claro, as angústias das provas e as alegrias das pequenas vitórias. Sem as discussões em grupo e o apoio mútuo, este caminho teria sido muito mais difícil.

À minha namorada, Giovanna, meu agradecimento especial por todo o amor e compreensão. Obrigado por ser minha maior incentivadora, por ouvir meus desabafos sobre prazos e por ter a paciência necessária para entender as ausências exigidas por este trabalho.

Aos meus professores, que compartilharam não apenas conhecimento técnico, mas também lições de ética e profissionalismo. Em especial, agradeço ao meu orientador, pela paciência, pelas críticas construtivas e pela condução deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para que este projeto chegasse ao nível de excelência desejado.

A todos vocês, o meu mais sincero muito obrigado.

*Aos meus pais, Jane Santiago Maciel e  
Jefferson Claudino Costa Pinheiro, por  
sempre estarem presentes em todos os  
momentos da minha vida.*

## RESUMO

O crescente ecossistema da Internet das Coisas (IoT) apresenta desafios de conectividade, especialmente pela coexistência de dispositivos operando exclusivamente na congestionada banda de 2.4 GHz, com redes modernas de 5.8 GHz. Este Trabalho de Conclusão de Curso objetiva projetar, implementar e analisar o desempenho de um *gateway IoT cross band* de baixo custo, utilizando o microcontrolador ESP32-C5 com suporte nativo a Wi-Fi 6 dual-band. A solução proposta opera simultaneamente como Estação Cliente (CPE) em 5.8 GHz e como Ponto de Acesso (AP) em 2.4 GHz, para coletar dados de nós sensores, e conectando-se a rede principal, retransmitindo informações de sensores e atuadores. A arquitetura será validada através de um protótipo funcional que poderá integrar múltiplos nós sensores baseados em ESP8266, com os dados sendo exibidos em uma interface web para monitoramento em tempo real. A análise de desempenho focará em métricas de latência, taxa de transferência e jitter demonstrando a eficácia da abordagem cross-band na redução de contenção de canal e na otimização da comunicação. O trabalho contribuirá com uma solução prática e acessível para modernizar a infraestrutura de redes IoT heterogêneas, garantindo a interoperabilidade e aumentando a eficiência de todo o sistema.

**Palavras-chave:** Internet das Coisas (IoT); ESP32-C5; Gateway Cross-Band; Wi-Fi Dual Band; Redes de Sensores Sem Fio.

## ABSTRACT

The growing Internet of Things (IoT) ecosystem presents significant connectivity challenges, particularly due to the coexistence of devices operating exclusively in the congested 2.4 GHz band alongside modern networks in the 5.8 GHz band. This undergraduate thesis aims to design, implement, and analyze the performance of a low-cost cross-band IoT gateway using the ESP32-C5 microcontroller, which provides native support for dual-band Wi-Fi 6. The proposed solution operates simultaneously as a 2.4 GHz Access Point (AP) to collect data from sensor nodes and as a 5.8 GHz Client Premises Equipment (CPE) to connect to the main network, forwarding information from sensors and actuators. The architecture is validated through a functional prototype capable of integrating multiple ESP8266-based sensor nodes, with data displayed on a web interface for real-time monitoring. Performance analysis focuses on latency, throughput, and jitter metrics, demonstrating the effectiveness of the cross-band approach in reducing channel contention and optimizing communication. This work contributes a practical and affordable solution for modernizing heterogeneous IoT network infrastructures, ensuring interoperability and improving overall system efficiency.

**Keywords:** Internet of Things (IoT); ESP32-C5; Cross-Band Gateway; Dual-Band Wi-Fi; Wireless Sensor Networks.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de funcionamento de um repetidor single band.....	17
Figura 2 - Microcontrolador ESP32-C5 .....	20
Figura 3 - Blocos básicos da IoT .....	23
Figura 4 - Arquitetura de LAN IEEE 802.11 .....	25
Figura 5 - Características de enlaces de padrões selecionados de rede sem fio .....	25
Figura 6 - Banda ISM 2.4 GHz: Zigbee (802.15.4), BLE (802.15.1) e canais Wi-Fi (802.11).....	29
Figura 7 - Modelo geométrico de interferência de redes sem fio .....	32
Figura 8 - Exemplo de transmissão OFDMA no IEEE 802.11ax, com alocação simultânea de <i>Resource Units</i> para múltiplas estações no enlace de descida e confirmação paralela no enlace de subida. ....	36
Figura 9 - Canais Wi-Fi 5 GHz .....	37
Figura 10 - Arquitetura 5G-IoT com balanceamento de carga em gateways de borda. ....	41
Figura 11 - Arquitetura Geral do Sistema .....	42
Figura 12 - Diagrama de Blocos Conceitual do Gateway Cross-band baseado no ESP32-C5 .....	43
Figura 13 - Espressif Systems ESP32-C5 .....	46
Figura 14 - Descrição dos componentes do ESP32-C5.....	46
Figura 15 – Pinout do ESP32-C5 .....	47
Figura 16 - Microcontrolador WeMos D1 Mini ESP-12F, Chip do ESP8266.....	48
Figura 17 - Pinout WeMos D1 .....	49
Figura 18 - Roteador Huawei Ax2s Ws7000.....	50
Figura 19-Bloco de Código 1 .....	51
Figura 20 Bloco de código 2 .....	53
Figura 21-Bloco de código 3 .....	53
Figura 22-Bloco de código 4 .....	54
Figura 23- Bloco de código 5 .....	54
Figura 24- Bloco de código 6 .....	54
Figura 25-Bloco de código 7 .....	55
Figura 26-Bloco de código 8 .....	55
Figura 27-Bloco de código 9 .....	56
Figura 28-Bloco de código 10 .....	56
Figura 29 - Painel de Controle - Gateway Cross-Band (Interface Homem Máquina) .....	57
Figura 30-Bloco de código 11 .....	58
Figura 31- Bloco de código 12 .....	58
Figura 32 - Cartões da interface de cada nó sensor. ....	59
Figura 33-Bloco de código 13 .....	60
Figura 34- Bloco de código 14 .....	60
Figura 35- Bloco de código 15 .....	60
Figura 36-Bloco de código 16 .....	61
Figura 37 - Gráfico da interface do Histórico do Tempo de Resposta (ms).....	61
Figura 38 - Gráfico da interface do Histórico do RSSI (dBm).....	62
Figura 39 - Gráfico da interface do Histórico de Vazão (KB/s).....	62
Figura 40 - Botão para Download de dados coletados .....	63
Figura 41- Bloco de código 17 .....	64
Figura 42-Bloco de código 18 .....	64
Figura 43-Bloco de código 19 .....	65

Figura 44-Bloco de código 20 .....	65
Figura 45 - Diagrama em blocos do Cenário 1 .....	67
Figura 46 - Montagem do protótipo sem Gateway na protoboard .....	68
Figura 47 - Dados coletados via interface do Cenário <i>Baseline</i> .....	68
Figura 48 - Diagrama de Blocos do <i>Gateway</i> em 2.4 GHz baseado no ESP32-C5 .....	70
Figura 49-Bloco de código 21 .....	71
Figura 50 - Montagem do protótipo com microcontrolador auxiliar na protoboard .....	72
Figura 51 - Diagrama de Blocos do Gateway Cross-band baseado no ESP32-C5 associado ao ESP8266 via comunicação serial (2.4 - 2.4 GHz) .....	73
Figura 52 - Diagrama de Blocos do Gateway Cross-band baseado no ESP32-C5 associado ao ESP8266 via comunicação serial (2.4 - 5.8 GHz) .....	74
Figura 53 – Microcontrolador Esp-12E Esp8266 com Display Oled de 0,96" .....	76
Figura 54 - Pinout Esp-12E .....	76
Figura 55 - Histórico de Tempo de Resposta do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 2.4 GHz.....	80
Figura 56 - Histórico de RSSI do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 2.4 GHz.....	81
Figura 57 - Histórico de Vazão do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 2.4 GHz.....	81
Figura 58 - Cartões dos dispositivos 1 e 2 para do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 2.4 GHz.....	82
Figura 59 - Histórico de RSSI do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 5.8 GHz.....	85
Figura 60 - Histórico de Vazão do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 5.8 GHz.....	85
Figura 61 - Cartões dos dispositivos 1 e 2 para do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 5.8 GHz.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre IEEE 802.11ac e IEEE 802.11ax sob a perspectiva de IoT .....	35
Tabela 2- Tabela de componentes ESP32-C5 .....	46
Tabela 3- Especificações técnicas do Roteador AX2S Ws7000 .....	50
Tabela 4-Dados do Cenário de Baseline.....	69
Tabela 5- Aparelhos conectados à rede de 2.4 GHz.....	77
Tabela 6- Dados do Cenário de Baseline.....	78
Tabela 7- Dados do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 2.4 GHz .....	82
Tabela 8- Dados do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 5.8 GHz .....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicação
<i>Basic Service Set</i>	BSS
<i>Bluetooth Low Energy</i>	BLE
<i>Cascading Style Sheets</i>	CSS
Camadas Física	PHY
<i>Clear Channel Assessment</i>	CCA
Controle de Acesso ao Meio	MAC
Decibéis-miliwatt	dBm
Dynamic Host Configuration Protocol	DHCP
Espectro de Espalhamento por Salto de Frequência	FHSS
<i>Internet of Things</i>	IoT
Estação	STA
<i>Federal Communications Commission</i>	FCC
GigaHertz	GHz
<i>Head-of-Line</i>	HoL
<i>HyperText Markup Language</i>	HTML
<i>Hypertext Transfer Protocol</i>	HTTP
<i>Industrial, Scientific and Medical</i>	ISM
Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos	IEEE
<i>Kilobytes por segundo</i>	KB/s
Localizador Uniforme de Recursos	URL
<i>Long Short-Term Memory</i>	LSTM
MegaHertz	MHz
<i>massive Machine Type Communication</i>	mMTC
Memória de Acesso Aleatório	RAM
Redes Metropolitanas	MAN
<i>Multi-access Edge Computing</i>	MEC
<i>Multi-User Multiple Input Multiple Output</i>	MU-MIMO
Ponto de Acesso	AP
<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>	OFDMA
Pessoais Sem Fio de Baixa Taxa	LR-WPAN

Protocolo de Internet	IP
Protocol Point-to-Point over Ethernet	PPoE
Quadros de Confirmação	ACKs
Qualidade de Serviço	QoS
Received Signal Strength Indicator	RSSI
Redes Locais	LAN
Rede Privada Virtual	VPN
Representational State Transfer	REST
<i>Resource Units</i>	RUs
Short Interframe Space	SIF
<i>Time Division Multiplexing</i>	TDM
<i>Ultra-Reliable Low-Latency Communication</i>	URLLC
União Internacional de Telecomunicações	ITU
Unidade Central de Processamento	CPU
Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	UART
<i>Wi-Fi Protected Access</i>	WPA
<i>Wi-Fi Protected Access</i> de segunda geração	WPA 2
<i>Wireless Personal Area Networks</i>	WPAN

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	JUSTIFICATIVA.....	18
3	OBJETIVO GERAL.....	20
	3.1 Objetivos específicos .....	20
4	Fundamentação teórica.....	22
	4.1 Internet das coisas (IoT): Conceitos e evolução .....	22
	4.2 Os Protocolos IEEE 802 .....	24
	4.3 A Banda ISM .....	27
	4.3.1 Desafios da coexistência na banda ISM 2.4 GHz.....	28
	4.3.2 Interferência Cruzada e Degradação de Desempenho .....	30
	4.3.3 Modelo Geométrico de Interferência entre Redes Sem Fio .....	32
	4.4 Wi-Fi 6 (802.11ax) e Eficiência em IoT.....	33
	4.4.1 OFDMA como Mecanismo Central do IEEE 802.11ax.....	34
	4.4.2 Funcionamento do OFDMA no Wi-Fi 6 .....	34
	4.4.3 A banda de 5.8 GHz .....	37
	4.5 Arquiteturas de Edge Computing e Balanceamento de Carga.....	38
	4.5.1 Modelo de Balanceamento de Carga Adaptativo .....	39
	4.5.2 Integração com Recursos de Rede 5G.....	40
5	METODOLOGIA .....	41
	5.1 Arquitetura do Sistema Proposto .....	42
	5.1.1.1 Camada de Percepção (Nós Sensores).....	43
	5.1.1.2 Camada de Borda (Gateway Cross-Band).....	44
	5.1.1.3 Camada de Infraestrutura – Roteador Principal (Wi-Fi 5.8 GHz).....	44
	5.1.1.4 Camada de Aplicação (Interface de monitoramento) .....	44
	5.2 Materiais e Ferramentas.....	45
	5.2.1 Hardware .....	45
	5.2.1.1 ESP32-C5: microcontrolador <i>dual-band</i> com suporte nativo ao padrão IEEE 802.11ax, utilizado como <i>gateway cross-band</i> . .....	45
	5.2.1.2 ESP8266 (NodeMCU): microcontroladores empregados como nós sensores IoT operando na banda de 2.4 GHz. ....	47
	5.2.1.3 Roteador HUAWEI AX2S Ws 7000: equipamento de infraestrutura com suporte a Wi-Fi 6, responsável por prover o enlace de <i>backhaul</i> na banda de 5.8 GHz.	
	49	
	5.2.2 Software.....	51
	5.2.2.1 Frameworks e bibliotecas utilizadas na implementação do Gateway.....	52

a)	<i>Framework</i> Arduino IDE para ESP32-C5 e ESP8266 .....	52
b)	Biblioteca WiFi.h – Gerenciamento de Conectividade Dual (AP + STA).....	53
c)	Biblioteca WebServer.h – Servidor HTTP Embarcado.....	54
d)	Biblioteca HTTPClient.h – Comunicação com os Nós Sensores.....	55
e)	Biblioteca ArduinoJson – Serialização e Desserialização de Dados.....	56
f)	STL (vector) – Estruturas de Dados para Histórico .....	56
5.2.2.2	Frameworks Web no Lado do Cliente .....	57
5.3	Cálculo e Interpretação das Métricas Avaliadas no Painel de Controle .....	63
5.3.1	Último Tempo de Resposta .....	63
5.3.2	Tempo de Resposta Médio .....	64
5.3.3	Sinal Wi-Fi (RSSI) .....	64
5.3.4	Perda de Pacotes ( <i>Packet Loss</i> ) .....	65
5.3.5	Vazão (Throughput) .....	66
5.4	Cenários de Teste.....	66
5.4.1	Cenário Experimental 1 ( <i>Baseline</i> ) .....	66
5.4.2	Cenário Experimental 2: <i>gateway</i> único em 2.4 GHz .....	69
5.4.3	Cenário Experimental 3: <i>gateway</i> utilizando uma ponte em 2.4 GHz .....	71
5.4.4	Cenário Experimental 4: <i>gateway</i> utilizando uma ponte em 2.4 GHz – 5.8 GHz (Cenário proposto).....	73
5.4.4.1	Hardware integrado ao Gateway: Esp-12E Esp8266.....	75
6	Resultados e Discussão .....	77
6.1	Apresentação dos resultados.....	77
6.1.1	Cenário 1 – Operação Exclusiva em 2.4 GHz.....	78
6.1.2	Cenário Experimental – Arquitetura <i>Cross-Band</i> .....	80
a)	Gateway Cross-band 2.4 – 2.4 GHz .....	80
b)	Gateway Cross-band 2.4 – 5.8 GHz .....	84
7	Conclusão .....	88
	REFERÊNCIAS .....	90

## 1 INTRODUÇÃO

A ascensão da Internet das Coisas (*Internet of things* - IoT) representa uma significativa evolução tecnológica do século XXI, redefinindo profundamente a interação entre o mundo físico e o digital. O cenário atual observa uma onipresença de dispositivos conectados, variando desde sensores ambientais e atuadores industriais até eletrodomésticos inteligentes. Essa infraestrutura gera um volume de dados sem precedentes, habilitando funcionalidades que otimizam processos, aumentam a eficiência operacional e melhoram a qualidade de vida. Projeções de mercado corroboram essa tendência, indicando que o número de dispositivos IoT ativos ultrapassará a marca de 29 bilhões até o ano de 2030, evidenciando uma expansão massiva e contínua do setor (Statista, 2022).

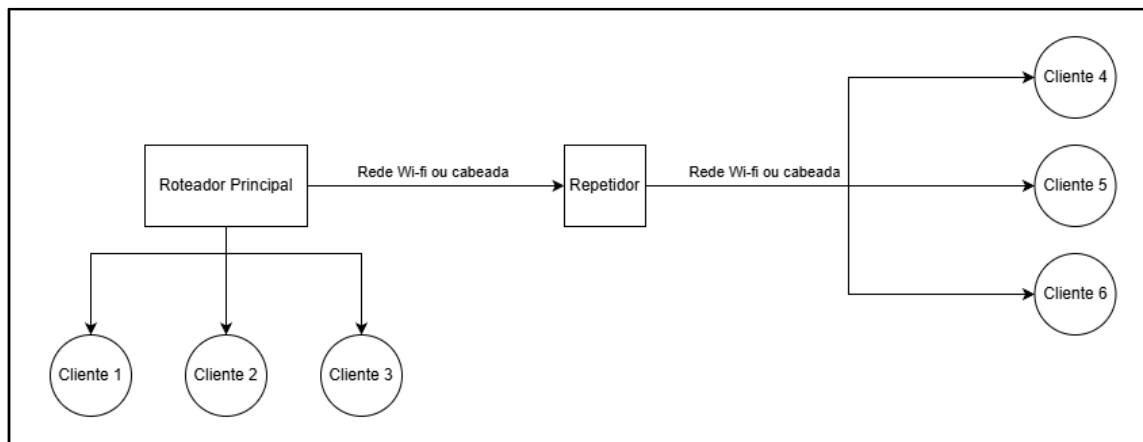
Entretanto, esse crescimento exponencial impõe desafios substanciais à infraestrutura de redes sem fio existente. A grande maioria dos dispositivos IoT de baixo custo — projetados para serem economicamente viáveis em implementações de larga escala — opera exclusivamente na banda de frequência de 2.4 GHz. Embora esta faixa ofereça benefícios físicos, como maior alcance e melhor penetração através de obstáculos, ela encontra-se notoriamente congestionada. O espectro de 2.4 GHz é compartilhado por uma vasta gama de tecnologias, incluindo redes Wi-Fi legadas, Bluetooth, ZigBee e até interferências não-comunicantes como fornos de micro-ondas. O resultado é um ambiente de radiofrequência (RF) ruidoso e altamente suscetível a interferências, o que pode degradar significativamente o desempenho e a confiabilidade da comunicação crítica em sistemas IoT (Tanenbaum; Wetherall, 2011).

Em contrapartida, a banda de 5.8 GHz oferece um espectro mais amplo, com uma maior quantidade de canais não sobrepostos e menor congestionamento, proporcionando maior velocidade e estabilidade de conexão. Por essa razão, redes Wi-Fi modernas em ambientes residenciais e corporativos têm migrado progressivamente para esta frequência, priorizando aplicações que demandam alta largura de banda. Esse movimento cria, contudo, um hiato tecnológico: de um lado, existe uma multidão de dispositivos IoT restritos à banda de 2.4 GHz; de outro, uma infraestrutura de rede principal (*backhaul*) que privilegia a banda de 5.8 GHz. A integração eficiente e confiável desses dois espectros tornou-se um problema fundamental para a viabilidade de sistemas IoT robustos.

As soluções convencionais para este cenário, como o uso de repetidores de sinal *single-band*, Figura 1, mostram-se inadequadas. Um repetidor que opera apenas em 2.4 GHz necessita utilizar o mesmo canal para receber e retransmitir pacotes. Este processo, conforme

descrito por Kurose e Ross (2017), divide inerentemente a largura de banda disponível e aumenta a contenção no canal, exacerbando o problema de congestionamento em vez de mitigá-lo. Surge, portanto, a necessidade premente de uma solução mais inteligente, capaz de atuar como uma ponte entre as duas bandas de frequência, aproveitando as características vantajosas de cada uma.

Figura 1 – Exemplo de funcionamento de um repetidor single band



Fonte: Autor, 2025

Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento e a análise de desempenho de um *gateway* IoT *cross-band* de baixo custo, utilizando o microcontrolador ESP32-C5 da Espressif Systems. Este componente destaca-se por ser um dos primeiros em sua categoria a incorporar a tecnologia Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) com suporte nativo e às bandas de 2.4 GHz e 5.8 GHz. A arquitetura proposta consiste em um sistema que opera em modo Ponto de Acesso (AP) na frequência de 2.4 GHz — criando uma rede dedicada para a coleta de dados de múltiplos nós sensores ou cargas — enquanto atua simultaneamente como Estação (STA) na frequência de 5.8 GHz, conectando-se à rede principal para retransmitir as informações coletadas.

A hipótese central deste estudo é que a abordagem *cross-band* pode mitigar significativamente a contenção de canal e a perda de pacotes, resultando em um sistema de comunicação com menor latência e maior taxa de transferência efetiva em comparação com soluções baseadas em banda única. Para validar esta hipótese, foi desenvolvido um protótipo funcional, integrando os nós sensores baseados no microcontrolador ESP8266, e conduzidos testes de desempenho para observar as métricas de eficácia da solução. O objetivo final é não apenas construir um dispositivo funcional, mas realizar uma análise crítica de seu

desempenho, contribuindo com uma solução prática, documentada e acessível para a modernização de infraestruturas de redes IoT heterogêneas.

## 2 JUSTIFICATIVA

A motivação primordial para este trabalho reside no descompasso entre a crescente demanda por conectividade IoT e a saturação da infraestrutura de espectro disponível, conhecida como esgotamento espectral, para dispositivos na banda ISM. A banda de 2.4 GHz, historicamente adotada como padrão para a vasta maioria dos sensores e atuadores devido ao seu alcance e custo reduzido de implementação, atingiu um ponto crítico de congestionamento. Em ambientes urbanos e industriais, a coexistência de redes Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoraWan e interferências eletromagnéticas não-comunicantes transformou este espectro em um meio ruidoso, onde a perda de pacotes e a latência elevada comprometem a confiabilidade de aplicações críticas (Natarajan; Zand; Nabi, 2016).

As abordagens tradicionais para estender o alcance ou melhorar a conectividade nestes cenários mostram-se frequentemente ineficientes. A utilização de repetidores convencionais de banda única (*single-band*) agrava o problema que se propõem a resolver: ao receber e retransmitir dados no mesmo canal de frequência, esses dispositivos aumentam a contenção pelo meio físico e reduzem drasticamente a taxa de transferência efetiva da rede (Kuruse; Ross, 2017). Por outro lado, soluções corporativas que utilizam gerenciamento avançado de espectro e múltiplos rádios possuem um custo proibitivo para a escala massiva exigida pela Internet das Coisas. Existe, portanto, uma lacuna tecnológica e de mercado para soluções que ofereçam desempenho superior ao de um repetidor comum, mas mantenham o custo acessível de um nó IoT.

A justificativa técnica para o uso do microcontrolador ESP32-C5, lançado pela Espressif Systems, fundamenta-se em sua capacidade de democratizar o acesso à banda de 5.8 GHz e à tecnologia Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) no segmento de sistemas embarcados. Diferentemente de seus antecessores, restritos ao espectro de 2.4 GHz, este componente abre a possibilidade de migrar o tráfego de *backhaul* (a comunicação entre o *gateway* e a internet) para uma faixa de frequência mais limpa e veloz, preservando a compatibilidade com sensores legados na faixa de 2.4 GHz.

A relevância acadêmica e prática deste trabalho está na validação experimental desta arquitetura de "ponte" (*bridge*) utilizando componentes de prateleira. Embora o conceito de roteamento *cross-band* seja conhecido em redes de computadores, sua aplicação e análise de

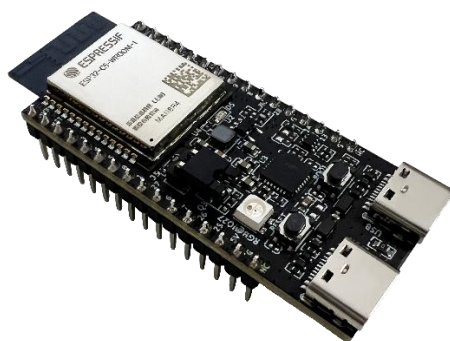
desempenho em microcontroladores de baixo custo carecem de documentação extensiva. Ao mensurar quantitativamente os ganhos de latência, *throughput*, *packet-lost* e largura de banda proporcionados por essa estratégia, esta monografia fornece dados preliminares valiosos para desenvolvedores e pesquisadores das áreas de telecomunicações e redes de computadores.

Por fim, o desenvolvimento de uma arquitetura de referência aberta contribui para o ecossistema de hardware livre, oferecendo uma alternativa viável para a modernização de redes de sensores sem a necessidade de descartar dispositivos legados ou investir em infraestrutura proprietária de alto custo.

### 3 OBJETIVO GERAL

Nesse sentido, o trabalho em questão visa contornar um problema cada vez mais presente na atual conjuntura do sistema de redes de comunicações móveis e pessoais. Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver e validar um gateway IoT *cross-band* de baixo custo, baseado no microcontrolador ESP32-C5, capaz de otimizar a comunicação em redes de sensores sem fio. O sistema proposto visa atuar como uma ponte eficiente entre a banda de frequência de 2.4 GHz, frequentemente congestionada por dispositivos legados, e a banda de alta velocidade de 5.8 GHz, garantindo maior estabilidade e desempenho na transmissão de dados.

Figura 2 - Microcontrolador ESP32-C5



Fonte: Espressif Systems.

#### 3.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os fundamentos teóricos das redes sem fio operando nas faixas de frequência de 2.4 GHz e 5.8 GHz, analisando as características técnicas do microcontrolador ESP32-C5 e os princípios do roteamento *cross-band* para mitigação de interferências.
- Desenvolver um firmware para o microcontrolador ESP32-C5, implementando a funcionalidade simultânea de Ponto de Acesso (AP) na banda de 2.4 GHz e de Estação (STA) na banda de 5.8 GHz.
- Implementar um protótipo funcional do sistema completo, integrando o *gateway* central a múltiplos nós sensores baseados no microcontrolador ESP8266, simulando um ambiente realista de Internet das Coisas (IoT).

- Avaliar o desempenho do *gateway* desenvolvido por meio de testes sistemáticos, focando na medição de métricas críticas de rede, tais como latência, taxa de transferência de dados (*throughput*) e estabilidade da conexão (*jitter*).
- Analisar os resultados experimentais obtidos, realizando um comparativo de eficiência entre a solução *cross-band* proposta e as abordagens convencionais de banda única, documentando as vantagens, limitações e a viabilidade técnica do sistema.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos e tecnologias que servem de base para o desenvolvimento da proposta deste trabalho. São discutidos os principais fundamentos relacionados às redes sem fio aplicadas à Internet das Coisas, com ênfase nos desafios de comunicação em ambientes com alta densidade de dispositivos conectados.

A análise contempla aspectos técnicos das redes Wi-Fi, das faixas de frequência utilizadas e das limitações impostas pelo compartilhamento do espectro, especialmente em cenários *indoor*. Também são abordadas evoluções recentes dos padrões de comunicação sem fio, voltadas para maior eficiência e melhor gerenciamento de múltiplas conexões simultâneas.

Além disso, são apresentados conceitos relacionados à computação de borda e estratégias de organização e distribuição de tráfego, que fundamentam a arquitetura proposta. Esses elementos teóricos permitem compreender os problemas enfrentados, justificar as decisões de projeto adotadas e embasar a análise dos resultados experimentais discutidos nos capítulos seguintes.

### 4.1 Internet das coisas (IoT): Conceitos e evolução

A Internet das Coisas (IoT) representa uma mudança de paradigma na computação e nas telecomunicações, estendendo a conectividade da Internet para além dos dispositivos computacionais tradicionais. Segundo Santos *et al.* (2016), a IoT pode ser definida como uma extensão da Internet atual que proporciona aos objetos do dia a dia — dotados de capacidade computacional e de comunicação — a habilidade de se conectarem à rede mundial.

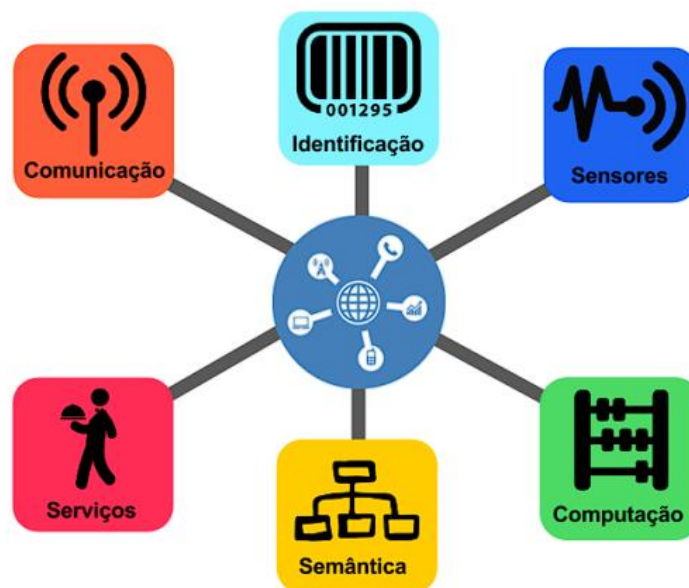
Esta visão é corroborada e expandida em "*Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions.*" Gubbi *et al.* (2013), que descrevem a IoT como a próxima revolução tecnológica na transformação da Internet em uma "Internet do Futuro" totalmente integrada. Os autores argumentam que estamos transitando de uma *Web* estática (WWW), passando pela *Web* social (Web 2.0), em direção à *Web* ubíqua (Web 3.0), onde a necessidade de dados sob demanda e sensoriamento onipresente se torna crítica. Nesse contexto, a IoT surge da convergência de três pilares: Redes de Sensores Sem Fio (WSN), acesso à Internet e Computação Distribuída.

A unidade básica dessa rede é o Objeto Inteligente (*Smart Object*), em que podemos ver os blocos básicos da IoT na Figura 3. Santos *et al.* (2016) definem que, para um

dispositivo ser considerado um objeto inteligente, ele deve apresentar quatro unidades básicas:

1. Unidade de Processamento/Memória: Microcontroladores (como o ESP32-C5).
2. Unidade de Comunicação: Rádios de baixo custo e consumo de energia (Wi-Fi, Bluetooth, LoraWan).
3. Fonte de Energia Autônoma: Baterias ou *energy harvesting*.
4. Unidade de Sensores/Atuadores: A interface otimizada com o mundo físico.

Figura 3 - Blocos básicos da IoT



Fonte: Santos *et al.*, 2016

Essa proliferação de objetos inteligentes permitiu o que Gubbi *et al.* (2013) chamam de Sensoriamento Ubíquo (*Ubiquitous Sensing*): a capacidade de medir, inferir e compreender indicadores ambientais de forma contínua e invisível. No entanto, isso trouxe desafios de escalabilidade. A arquitetura da IoT é frequentemente descrita através de Blocos Básicos de Construção (Santos *et al.*, 2016): Identificação, Sensores, Comunicação, Computação, Serviços e Semântica.

Em termos de camadas de abstração, a literatura (Al-Fuqaha *et al.*, 2015; Gubbi *et al.*, 2013) converge para uma arquitetura composta por três níveis principais:

1. *Camada de Percepção*: Composta pelos sensores e atuadores que realizam o sensoriamento ubíquo. Neste trabalho, esta camada é representada pelos nós ESP8266.
2. *Camada de Rede*: Responsável pela transmissão dos dados. É nesta camada que ocorrem os gargalos de espectro na banda de 2.4 GHz (Natarajan *et al.*, 2016). A

solução proposta neste trabalho atua aqui, utilizando um *gateway cross-band* para otimizar o fluxo de informações.

3. *Camada de Aplicação*: Onde os dados são processados e apresentados. Gubbi *et al.* (2013) defendem uma visão centrada na Nuvem (*Cloud-centric IoT*), onde a nuvem atua como o integrador final, oferecendo armazenamento escalável e ferramentas de visualização para que os dados brutos se transformem em conhecimento útil para o usuário final.

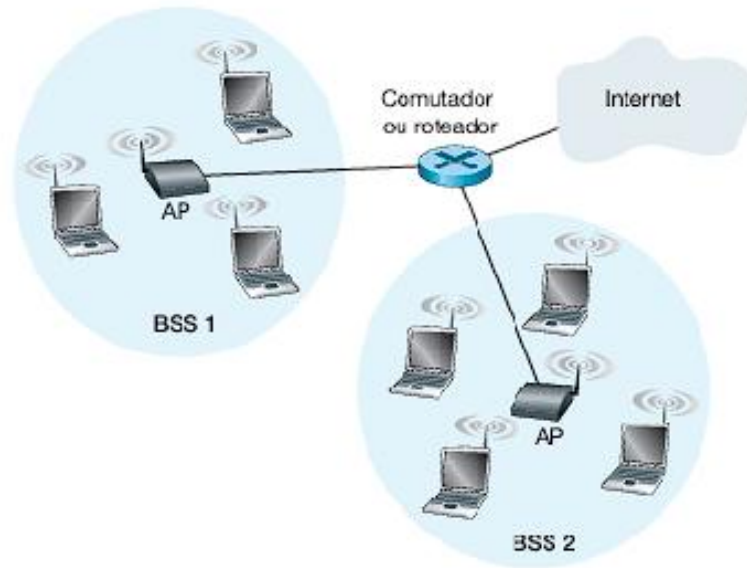
## 4.2 Os Protocolos IEEE 802

A padronização é um pilar fundamental para a interoperabilidade em redes de computadores. O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) desempenha um papel central neste processo através do comitê IEEE 802, responsável por definir os padrões para redes locais (LAN) e metropolitanas (MAN). Conforme detalhado por Tanenbaum e Wetherall (2011), esta família de protocolos especifica as camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC) do modelo OSI, permitindo que dispositivos de diferentes fabricantes se comuniquem de forma transparente.

Além disso, a arquitetura de LAN sem fio baseada no padrão IEEE 802.11 estrutura-se sobre o conceito de Conjunto Básico de Serviços (*Basic Service Set* — BSS), o qual constitui o bloco de construção fundamental dessas redes, como vemos na Figura 4. Um BSS é composto por uma ou mais estações sem fio e uma estação-base central, denominada Ponto de Acesso (*Access Point* — AP), que gerencia a comunicação dentro da célula. Em cenários típicos, como residências ou pequenos escritórios, o AP conecta-se a um dispositivo de interconexão — frequentemente um roteador integrado — que provê o acesso à Internet, servindo como ponte entre a rede sem fio (BSS) e a infraestrutura de rede cabeada ou externa (Tanenbaum; Wetherall, 2011).

Adicionalmente, a identificação única dos dispositivos é garantida pelo endereçamento MAC (*Media Access Control*). Assim como nas redes Ethernet, cada estação sem fio 802.11 e cada interface de rádio do AP possuem um endereço MAC de 6 *bytes* (48 bits), gravado no *firmware* do adaptador de rede. Estes endereços são administrados globalmente pelo IEEE para assegurar que sejam exclusivos, permitindo a correta entrega de quadros na camada de enlace (Tanenbaum; Wetherall, 2011).

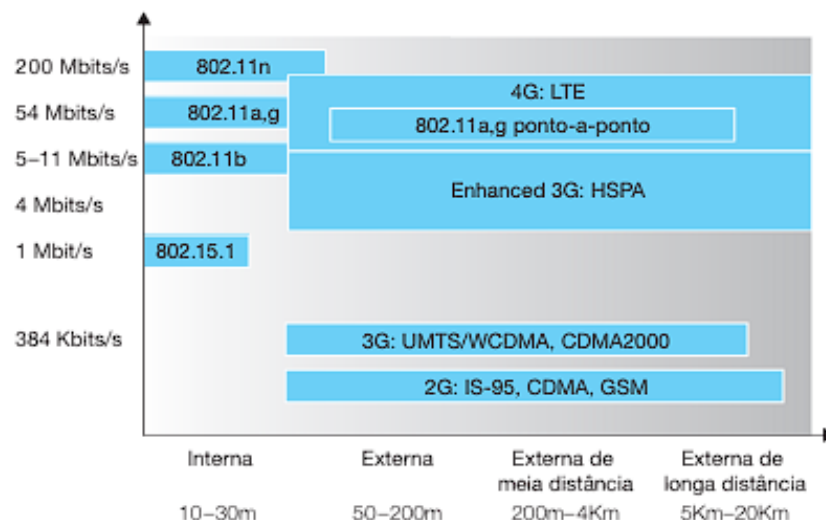
Figura 4 - Arquitetura de LAN IEEE 802.11



Fonte: Tanenbaum; Wetherall, 2011

Ademais, em termos de cobertura espacial, o padrão IEEE 802.11 é projetado para viabilizar a comunicação entre dispositivos situados a uma distância de até 100 metros, salvo em configurações específicas ponto a ponto com antenas de alto ganho. Esta característica o posiciona em um ponto intermediário no espectro de tecnologias sem fio do IEEE: ele oferece um alcance significativamente maior que os padrões de curta distância, como o Bluetooth (IEEE 802.15.1) e o Zigbee (IEEE 802.15.4), mas inferior ao WiMAX (IEEE 802.16), que é desenvolvido para redes metropolitanas de longa escala (Tanenbaum; Wetherall, 2011). O padrão para uso interno, externo e em longas distâncias, pode-se observar na Figura 5.

Figura 5 - Características de enlaces de padrões selecionados de rede sem fio



Fonte: Tanenbaum; Wetherall, 2011

Por outro lado, o padrão IEEE 802.15.1, o Bluetooth, opera em curto alcance, com baixa potência e custo reduzido. Diferentemente do 802.11, que é uma tecnologia de "acesso" de maior velocidade e alcance, o 802.15.1 atua fundamentalmente como uma tecnologia de "substituição de cabos" para interconectar dispositivos pessoais como notebooks, periféricos e smartphones. Por essa razão, estas redes são denominadas Redes Pessoais Sem Fio (WPAN — *Wireless Personal Area Networks*). As redes 802.15.1 operam na faixa não licenciada de 2.4 GHz utilizando o modo TDM (*Time Division Multiplexing*) com intervalos de tempo de 625  $\mu$ s. Para mitigar interferências, emprega-se o Espectro de Espalhamento por Salto de Frequência (FHSS), onde o transmissor alterna entre 79 canais de maneira pseudoaleatória a cada intervalo, espalhando a transmissão pelo espectro ao longo do tempo e atingindo velocidades de até 4 Mbits/s (Held, 2001; Bisdikian, 2001; IEEE 802.15, 2012).

Uma segunda rede pessoal padronizada pelo IEEE de grande relevância é o IEEE 802.15.4, conhecido comercialmente como Zigbee. Enquanto as redes Bluetooth oferecem taxas de dados em até 3 Mbit/s, focando na interconexão de periféricos, o Zigbee é voltado para aplicações que exigem ainda menos potência, menores taxas de dados e ciclos de trabalho (*duty cycles*) extremamente reduzidos. Esta filosofia de design reconhece que nem todas as aplicações de rede necessitam de alta largura de banda; dispositivos como sensores domésticos de temperatura, iluminação, sistemas de segurança e interruptores são inerentemente simples e devem operar por longos períodos com baterias pequenas. Portanto, o Zigbee é a solução ideal para este nicho, definindo taxas de canal variáveis de 20, 40, 100 e 250 Kbits/s, dependendo da frequência de operação do canal (IEEE 802.15, 2012).

Em suma, no contexto da Internet das Coisas (IoT), três grupos de trabalho do IEEE 802 são particularmente relevantes:

- IEEE 802.11: Popularmente conhecido como Wi-Fi, define os padrões para redes locais sem fio (WLAN), focando em alta taxa de transferência e mobilidade.
- IEEE 802.15.1: Base para a tecnologia Bluetooth, focado em redes pessoais (WPAN) de curto alcance para periféricos e áudio.
- IEEE 802.15.4: Define a base para redes pessoais sem fio de baixa taxa (LR-WPAN), sendo o alicerce para tecnologias como Zigbee, essenciais para dispositivos IoT de baixo consumo (SANTOS et al., 2016).

### 4.3 A Banda ISM

Para que estes protocolos operem sem a necessidade de licenças individuais, eles utilizam as bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Essas faixas do espectro de radiofrequência são reservadas internacionalmente pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) para aplicações não comerciais e de uso livre, desde que atendidos limites específicos de potência de transmissão, largura de banda e requisitos de interferência estabelecidos por órgãos reguladores nacionais, como a FCC nos Estados Unidos e a ANATEL no Brasil (ITU, 2016; ANATEL, 2022).

Dentre as diversas faixas ISM disponíveis, a banda de 2.4 GHz — compreendida entre 2.400 e 2.4835 GHz — consolidou-se como o padrão de fato para a conectividade sem fio de curto e médio alcance. Essa ampla adoção decorre de um conjunto de fatores técnicos, regulatórios e econômicos que favoreceram sua padronização ao longo dos anos (IEEE, 2020; Gast, 2013).

Um dos principais fatores é a disponibilidade global, uma vez que a banda de 2.4 GHz apresenta regulamentação harmonizada em praticamente todos os países. Isso permite que dispositivos sejam desenvolvidos para operar mundialmente sem a necessidade de adaptações específicas para cada região, reduzindo custos de certificação e facilitando a interoperabilidade entre fabricantes (Rappaport, 2002; Stallings, 2021).

Do ponto de vista físico, a banda oferece um equilíbrio entre propagação e capacidade de transmissão. As ondas eletromagnéticas nessa faixa apresentam boa capacidade de penetração em obstáculos comuns, como paredes e móveis, quando comparadas a frequências mais elevadas, ao mesmo tempo em que disponibilizam largura de banda suficiente para aplicações que exigem taxas moderadas de dados. Esse compromisso torna a banda especialmente adequada para ambientes residenciais, comerciais e industriais (Goldsmith, 2005; Molisch, 2011).

Outro aspecto relevante é o custo de implementação. A adoção massiva da banda de 2.4 GHz por tecnologias como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee e outras levou a uma expressiva economia de escala na fabricação de circuitos integrados de radiofrequência. Como consequência, o custo dos transceptores tornou-se significativamente baixo, viabilizando o desenvolvimento de soluções compactas, energeticamente eficientes e de baixo custo, especialmente no contexto da IoT (Gubbi *et al.*, 2013; Al-Fuqaha *et al.*, 2015).

Entretanto, a popularidade da banda também implica alta densidade de dispositivos e maior suscetibilidade a interferências, uma vez que múltiplas tecnologias compartilham o mesmo espectro. Para mitigar esses efeitos, os protocolos de comunicação que operam nessa faixa empregam técnicas como espalhamento espectral, seleção dinâmica de canais e mecanismos de coexistência, buscando garantir a confiabilidade da comunicação mesmo em cenários congestionados.

Dessa forma, a banda ISM de 2.4 GHz permanece como uma solução amplamente adotada e versátil, equilibrando alcance, desempenho, custo e disponibilidade global, apesar dos desafios inerentes ao seu uso compartilhado.

#### **4.3.1 Desafios da coexistência na banda ISM 2.4 GHz**

A proliferação de dispositivos operando na banda não licenciada de 2.4 GHz criou um cenário de elevada densidade espectral, no qual múltiplas tecnologias sem fio competem pelos mesmos recursos de frequência limitados. Esse fenômeno, denominado coexistência, torna-se particularmente desafiador quando tecnologias heterogêneas — caracterizadas por diferentes potências de transmissão, esquemas de modulação, larguras de canal e mecanismos de acesso ao meio — operam simultaneamente sem mecanismos explícitos de cooperação ou coordenação.

Segundo a análise apresentada por Natarajan, Zand e Nabi (2016), a coexistência entre diferentes tecnologias sem fio pode ser classificada em três domínios fundamentais:

- Espaçamento adequado entre as redes;
- Compartilhamento controlado do tempo do canal;
- Separação de frequência adequada entre as redes;

A coexistência espacial refere-se à separação física adequada entre redes, de modo que a atenuação do sinal reduza os níveis de interferência mútua. A coexistência temporal baseia-se no compartilhamento controlado do canal, por meio de técnicas de acesso ao meio ou escalonamento de transmissões em instantes distintos. Já a coexistência em frequência depende da separação espectral suficiente entre os sinais, minimizando a sobreposição de canais e, conseqüentemente, a interferência co-canal ou adjacente.

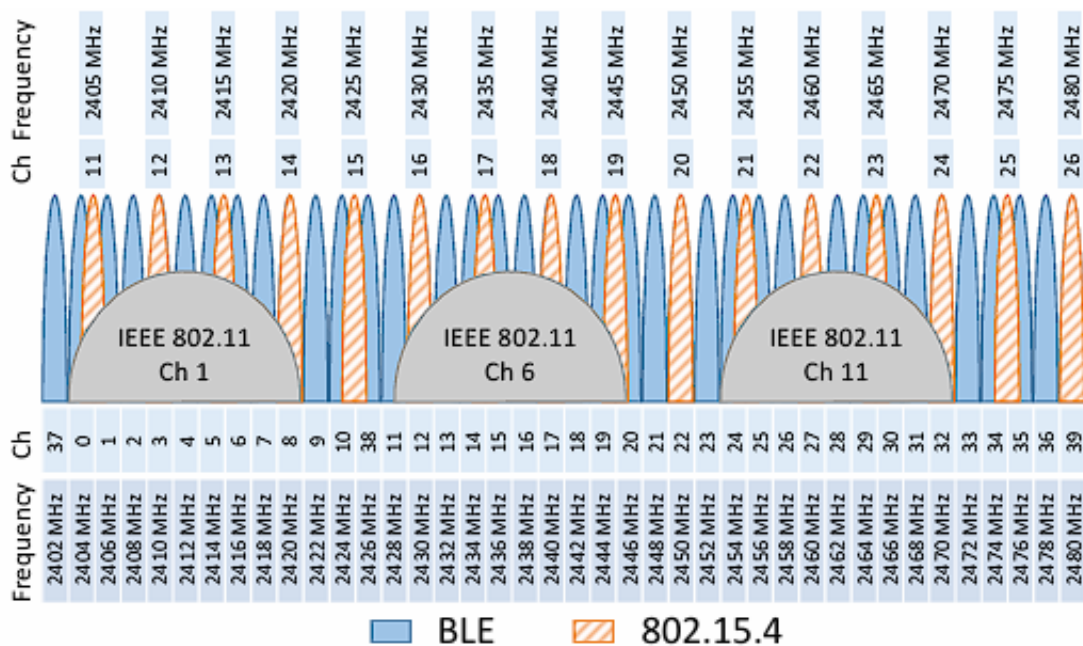
No contexto específico da banda de 2.4 GHz, o principal desafio identificado por Natarajan, Zand e Nabi (2016) está relacionado à assimetria de potência de transmissão e à sobreposição espectral entre o padrão dominante de alta taxa de dados, o IEEE 802.11 (Wi-Fi), e os padrões de baixa potência, como o IEEE 802.15.4 (Zigbee) e o Bluetooth Low

Energy (BLE). Enquanto um ponto de acesso Wi-Fi pode operar com potências de transmissão de até 100 mW (20 dBm) ou superiores, dispositivos IoT baseados em Zigbee ou BLE tipicamente transmitem com potências da ordem de 1 mW (0 dBm), tornando-os mais suscetíveis à interferência proveniente de transmissões Wi-Fi próximas.

Essa disparidade de potência, aliada ao uso de canais mais largos pelo Wi-Fi (tipicamente 20 MHz ou 40 MHz) em contraste com os canais estreitos do IEEE 802.15.4 (2 MHz), resulta em um cenário no qual transmissões Wi-Fi podem facilmente sobrepor e degradar comunicações de redes de baixa potência. Como consequência, observa-se aumento na taxa de erros de pacote, retransmissões e consumo energético adicional nos dispositivos IoT, comprometendo a confiabilidade e a eficiência da comunicação. Assim, a adoção de estratégias eficazes de coexistência nos domínios espacial, temporal e espectral torna-se essencial para garantir o desempenho adequado de sistemas heterogêneos operando na banda ISM de 2.4 GHz.

A Figura 6 apresenta um diagrama do espectro de frequência da banda ISM de 2.4 GHz, ilustrando a sobreposição espectral entre três tecnologias sem fio amplamente utilizadas: IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.4 (Zigbee) e Bluetooth *Low Energy* (BLE). O eixo horizontal representa a frequência, em megahertz (MHz), abrangendo o intervalo de 2.400 MHz a aproximadamente 2.483,5 MHz, correspondente à totalidade da banda ISM de 2.4 GHz.

Figura 6 - Banda ISM 2.4 GHz: Zigbee (802.15.4), BLE (802.15.1) e canais Wi-Fi (802.11)



Fonte: Natarajan (2016)

Os semicírculos de maior largura, identificados como IEEE 802.11 *Ch 1*, *Ch 6* e *Ch 11*, representam os canais mais utilizados do padrão Wi-Fi. Cada um desses canais possui largura espectral significativamente maior — tipicamente 20 MHz — o que faz com que ocupem grande parte da banda disponível. A figura evidencia que, mesmo utilizando os três canais considerados não sobrepostos, o Wi-Fi praticamente cobre todo o espectro, deixando poucas regiões livres de interferência.

Abaixo dos canais Wi-Fi são representados os canais do padrão IEEE 802.15.4, utilizados por tecnologias como Zigbee e Thread. Esses canais possuem largura espectral reduzida, em torno de 2 MHz, e estão distribuídos ao longo da banda. Observa-se, contudo, que a maioria deles encontra-se total ou parcialmente sobreposta aos canais Wi-Fi. Essa sobreposição espectral, aliada à assimetria de potência de transmissão entre as tecnologias, torna as redes IEEE 802.15.4 particularmente vulneráveis à interferência causada por transmissões Wi-Fi, resultando em degradação do desempenho e aumento na taxa de perda de pacotes. Apenas alguns canais específicos, como os canais 15, 20, 25 e 26, situam-se nas regiões intermediárias entre os canais Wi-Fi, sendo frequentemente recomendados para mitigar os efeitos da interferência.

Os arcos de menor largura representam os canais do Bluetooth Low Energy. Em particular, destacam-se os canais de *advertising* do BLE (canais 37, 38 e 39), posicionados estrategicamente em regiões menos ocupadas do espectro, o que caracteriza uma estratégia de coexistência no domínio da frequência. Essa abordagem busca reduzir a interferência por meio da separação espectral. Entretanto, os canais de dados do BLE utilizam salto de frequência (*frequency hopping*), percorrendo toda a banda de 2.4 GHz e, conseqüentemente, estando sujeitos a colisões ocasionais com transmissões Wi-Fi.

Dessa forma, a figura ilustra de maneira clara os desafios de coexistência na banda ISM de 2,4 GHz, evidenciando um cenário típico de competição espectral entre tecnologias heterogêneas. Observa-se que a coexistência eficaz nesse ambiente depende da combinação de estratégias nos domínios espacial, temporal e espectral, a fim de minimizar os impactos da interferência e garantir o desempenho adequado das redes de baixa potência.

### **4.3.2 Interferência Cruzada e Degradação de Desempenho**

A interferência em sistemas de comunicação sem fio ocorre quando dois ou mais transmissores operam simultaneamente na mesma faixa de frequência, ou em frequências adjacentes sujeitas a vazamento espectral, resultando na degradação do sinal recebido. No

contexto da banda ISM de 2.4 GHz, esse fenômeno é agravado pela coexistência de múltiplas tecnologias heterogêneas. Em particular, a interferência cruzada (*cross-technology interference*), caracterizada pela interferência entre tecnologias distintas que compartilham o mesmo espectro, representa um dos principais desafios para redes de sensores e aplicações de Internet das Coisas (IoT).

Conforme destacado por Natarajan, Zand e Nabi (2016), o tráfego Wi-Fi atua como uma fonte agressora severa para redes de baixa potência, como IEEE 802.15.4 e Bluetooth Low Energy. Devido à sua maior potência de transmissão e à largura de banda significativamente superior — tipicamente 20 MHz por canal — uma única transmissão Wi-Fi é capaz de sobrepor-se a múltiplos canais estreitos utilizados por tecnologias de sensores. Como resultado, pacotes Zigbee ou BLE que ocorram simultaneamente em canais parcial ou totalmente sobrepostos podem ser facilmente corrompidos ou completamente suprimidos, mesmo quando o nó sensor se encontra relativamente próximo ao receptor.

Os efeitos dessa interferência cruzada sobre a confiabilidade e o desempenho da rede IoT podem ser quantificados por meio de métricas de desempenho amplamente utilizadas, destacando-se:

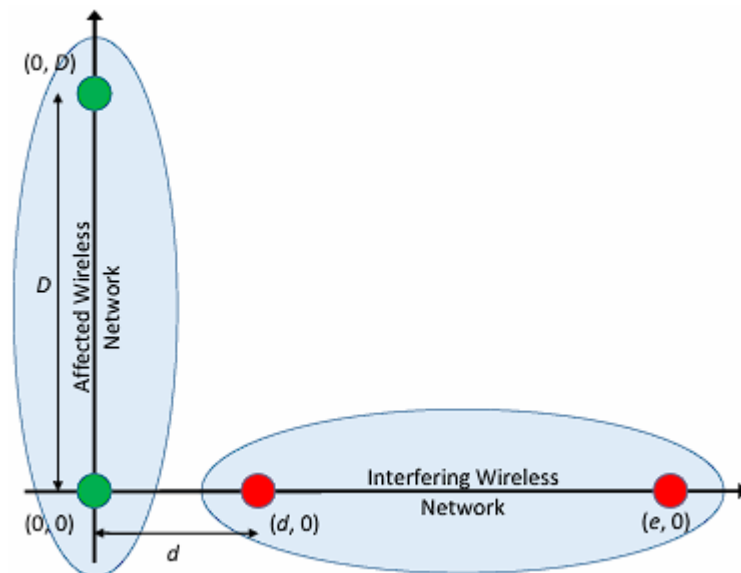
- **Aumento da Taxa de Erro de Pacotes:** A colisão entre sinais de diferentes tecnologias resulta na corrupção de bits durante a recepção, levando ao descarte integral dos pacotes recebidos com erro. Sob condições de tráfego Wi-Fi intenso, a taxa de erro de pacotes em redes IEEE 802.15.4 pode atingir níveis elevados, tornando a comunicação instável ou até inviável para aplicações que exigem confiabilidade mínima (IEEE, 2020; Gast, 2013).
- **Elevação da Latência e do *Jitter*:** Como mecanismo de recuperação, os protocolos da camada de enlace empregam retransmissões automáticas de pacotes perdidos. Embora essas retransmissões aumentem a probabilidade de entrega dos dados, cada tentativa adicional introduz atrasos variáveis na comunicação, resultando em maior latência média e aumento do *jitter*. Esse comportamento é particularmente prejudicial para aplicações sensíveis ao tempo, como sistemas de controle, automação industrial e monitoramento em tempo real.
- **Aumento do Consumo Energético:** Dispositivos IoT alimentados por bateria são projetados para operar em ciclos curtos de atividade, alternando rapidamente entre estados de transmissão, recepção e sono profundo. Em ambientes com elevada interferência, a necessidade de múltiplas retransmissões, bem como o aumento do tempo de escuta do canal durante os procedimentos de *Clear Channel Assessment*

(CCA), eleva significativamente o consumo energético. Esse comportamento resulta na redução prematura da vida útil da bateria, comprometendo a escalabilidade e a manutenção da rede de sensores.

### 4.3.3 Modelo Geométrico de Interferência entre Redes Sem Fio

A Figura 7 ilustra um modelo geométrico bidimensional utilizado para representar a interferência entre duas redes sem fio coexistentes: uma rede afetada (*Affected Wireless Network*) e uma rede interferente (*Interfering Wireless Network*). O modelo tem como objetivo analisar o impacto espacial da interferência gerada por uma rede sobre a outra, considerando a posição relativa dos transmissores e receptores no plano cartesiano.

Figura 7 - Modelo geométrico de interferência de redes sem fio



Fonte: Autor, 2025.

No diagrama, o sistema de coordenadas é definido de modo que a rede afetada esteja posicionada ao longo do eixo vertical (eixo y), com seus nós localizados entre os pontos  $(0,0)$  e  $(0,D)$ . Esses pontos, destacados em verde, representam os extremos da área de cobertura ou os nós comunicantes da rede afetada, cuja extensão espacial é dada pelo parâmetro  $D$ .

A rede interferente, por sua vez, está posicionada ao longo do eixo horizontal (eixo x), estendendo-se do ponto pontos  $(d,0)$  até pontos  $(e,0)$ , onde  $d$  representa a distância mínima entre as duas redes e  $e$  define a extensão da rede interferente. Os nós interferentes são indicados por pontos vermelhos, e a região sombreada ao redor desses pontos representa a área de influência do sinal interferente, considerando a propagação do sinal no espaço.

A distância  $d$  é um parâmetro fundamental do modelo, pois define o grau de separação espacial entre as duas redes. À medida que  $d$  aumenta, a interferência percebida pela rede afetada tende a diminuir devido à atenuação do sinal com a distância. De forma análoga, valores menores de  $d$  indicam maior proximidade entre as redes e, conseqüentemente, maior probabilidade de interferência significativa.

As elipses que envolvem ambas as redes representam, de maneira simplificada, as áreas de cobertura ou regiões nas quais os sinais transmitidos apresentam potência suficiente para causar comunicação ou interferência. Esse tipo de abstração geométrica é amplamente utilizado em estudos de coexistência para avaliar cenários de interferência cruzada (*cross-technology interference*), permitindo a análise do impacto da topologia espacial na degradação de desempenho de redes de baixa potência.

Em síntese, a figura demonstra como a disposição espacial relativa entre uma rede interferente e uma rede afetada influencia diretamente o nível de interferência observado, reforçando a importância da coexistência no domínio espacial, conforme discutido na literatura sobre redes sem fio heterogêneas.

#### **4.4 Wi-Fi 6 (802.11ax) e Eficiência em IoT**

O crescimento exponencial de dispositivos conectados impulsionado pela Internet das Coisas (IoT) impôs desafios significativos às redes sem fio tradicionais, especialmente em ambientes caracterizados por alta densidade de nós, tráfego predominantemente composto por pacotes curtos e requisitos rigorosos de latência e eficiência energética. Os padrões Wi-Fi legados foram concebidos com o objetivo principal de maximizar a taxa de transmissão por enlace individual, o que resulta em baixa eficiência global quando um grande número de dispositivos concorre simultaneamente pelo meio de transmissão.

Nesse contexto, o padrão IEEE 802.11ax, comercialmente conhecido como Wi-Fi 6, introduz uma mudança de paradigma ao deslocar o foco do aumento da taxa de dados nominal para a eficiência do sistema como um todo, priorizando o desempenho agregado da rede em cenários de alta densidade. O Wi-Fi 6 foi projetado para melhorar a eficácia global da comunicação sem fio, permitindo que múltiplos dispositivos compartilhem o meio de forma mais organizada e previsível, reduzindo a contenção e o desperdício de recursos espectrais (Memoona e Kim; 2025).

Diferentemente das gerações anteriores, o IEEE 802.11ax incorpora melhorias significativas nas camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC), com o

objetivo explícito de atender aplicações caracterizadas por alta densidade de dispositivos e tráfego assíncrono, como redes de sensores IoT. Entre essas melhorias destacam-se a adoção do acesso múltiplo por divisão ortogonal de frequência (OFDMA), o suporte aprimorado a transmissões multiusuário e mecanismos de agendamento centralizado, que reduzem a latência, o *jitter* e o consumo energético dos dispositivos finais.

Essas características tornam o Wi-Fi 6 particularmente adequado para ambientes como redes industriais, edifícios inteligentes e infraestruturas de monitoramento em larga escala, nos quais centenas ou milhares de sensores precisam transmitir pequenas quantidades de dados de forma confiável e eficiente. Assim, o IEEE 802.11ax estabelece-se como uma tecnologia habilitadora para aplicações IoT modernas, fornecendo a base necessária para arquiteturas escaláveis e eficientes, como a abordagem *cross-band* proposta neste trabalho.

#### 4.4.1 OFDMA como Mecanismo Central do IEEE 802.11ax

Apesar das melhorias incrementais introduzidas em padrões Wi-Fi anteriores, como o IEEE 802.11ac, chamado também de Wi-Fi legado, a arquitetura de acesso ao meio permaneceu fundamentalmente baseada em um modelo de transmissão *single-user*, no qual apenas uma estação pode ocupar todo o canal em determinado instante. Nesse modelo, mesmo quando os dados a serem transmitidos são pequenos — como é típico em aplicações IoT — o canal completo permanece reservado a um único dispositivo, resultando em uso ineficiente do espectro, aumento da latência e intensificação do fenômeno de *Head-of-Line* (HoL) *delay*.

O IEEE 802.11ax rompe com essa limitação ao introduzir o *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) como mecanismo central de acesso ao meio. Essa técnica, amplamente utilizada em redes celulares, foi adaptada ao contexto do Wi-Fi com o objetivo explícito de melhorar a eficiência espectral e a previsibilidade da comunicação em cenários de alta densidade de dispositivos. Conforme discutido por Memoona e Kim (2025), o OFDMA permite que múltiplos dispositivos compartilhem simultaneamente o mesmo canal físico, reduzindo significativamente a contenção e o desperdício de recursos.

#### 4.4.2 Funcionamento do OFDMA no Wi-Fi 6

No OFDMA, o canal Wi-Fi é subdividido em unidades menores denominadas *Resource Units* (RUs), compostas por subconjuntos de subportadoras ortogonais. Cada RU pode ser alocada dinamicamente pelo ponto de acesso a diferentes estações, tanto no enlace de subida (*uplink*) quanto no de descida (*downlink*). Dessa forma, um único intervalo de tempo

pode acomodar transmissões paralelas de diversos nós sensores, cada um utilizando apenas a fração do espectro necessária para seu tráfego (Memoona; Kim, 2025).

Essa abordagem contrasta diretamente com o funcionamento do IEEE 802.11ac, no qual um sensor IoT que transmite poucos bytes ocupa todo o canal de 20 ou 40 MHz, impedindo que outros dispositivos transmitam simultaneamente. No Wi-Fi 6, o ponto de acesso atua como um escalonador centralizado, organizando as transmissões e reduzindo atrasos causados por contenção e colisões (IEEE 802.11ax, 2021).

Tabela 1 - Comparação entre IEEE 802.11ac e IEEE 802.11ax sob a perspectiva de IoT

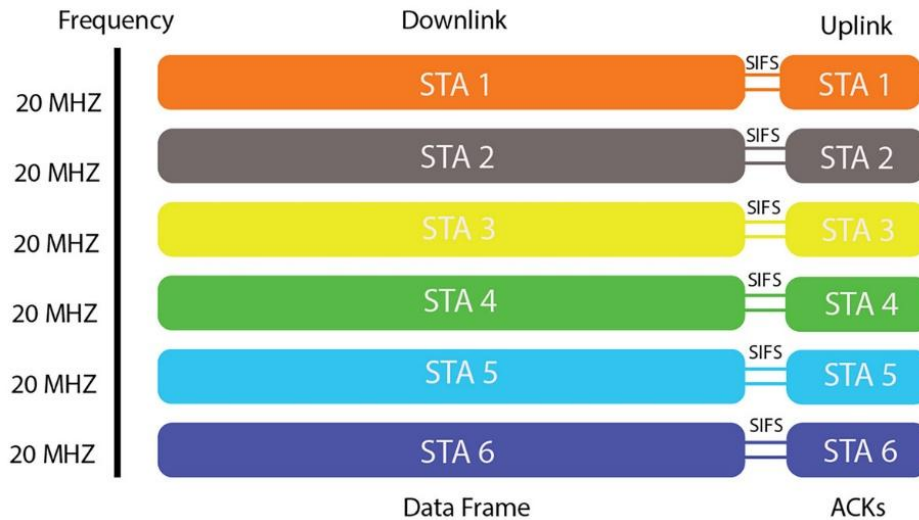
<b>Características</b>	<b>IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)</b>	<b>IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)</b>
Técnicas de acesso ao meio	OFDM ( <i>single-user</i> )	OFDMA ( <i>multi-user</i> )
Ocupação do canal	Um dispositivo por vez	Múltiplos dispositivos simultaneamente
Eficiência para pacotes pequenos	Baixa	Alta
Latência em cenários densos	Elevada	Reduzida
<i>Head-of-line Delay</i>	Frequente	Mitigado
Adequação para IoT	Limitada	Elevada

Fonte: Adaptado de (IEEE 802.11ax, 2021) pelo próprio autor.

Observa-se que o IEEE 802.11ax foi projetado explicitamente para superar as limitações do Wi-Fi legado em ambientes densos, nos quais o desempenho agregado da rede é mais relevante do que a taxa de dados máxima por enlace individual. A introdução do OFDMA permite que sensores IoT transmitam seus dados de forma mais eficiente e previsível, reduzindo atrasos, consumo energético e interferência desnecessária.

A Figura 8 ilustra o funcionamento do mecanismo de OFDMA introduzido pelo IEEE 802.11ax, evidenciando de forma prática as vantagens discutidas nas seções anteriores. Diferentemente do modelo tradicional de acesso ao meio baseado em OFDM, no qual uma única estação ocupa todo o canal durante a transmissão, o OFDMA permite que múltiplas estações (STAs) sejam atendidas simultaneamente dentro de um mesmo intervalo de tempo.

Figura 8 - Exemplo de transmissão OFDMA no IEEE 802.11ax, com alocação simultânea de *Resource Units* para múltiplas estações no enlace de descida e confirmação paralela no enlace de subida.



Fonte: Adaptado de Memoona e Kim (2025).

No eixo vertical da figura é representada a divisão do espectro em blocos de frequência, enquanto o eixo horizontal representa o tempo. Observa-se que, durante o enlace de descida (*downlink*), o ponto de acesso transmite dados para múltiplas STAs de forma paralela, alocando a cada uma RU distinta dentro do canal de 20 MHz. Essa alocação dinâmica permite que cada estação utilize apenas a fração do espectro necessária para sua transmissão, evitando a ocupação integral do canal por pacotes de pequeno tamanho, situação comum em aplicações IoT.

Após a transmissão dos quadros de dados, as STAs respondem com quadros de confirmação (ACKs) no enlace de subida (*uplink*), respeitando um curto intervalo de guarda (Short Interframe Space – SIFS). Assim como no *downlink*, o *uplink* também pode ser coordenado de forma paralela pelo ponto de acesso, reduzindo o número de acessos competitivos ao meio e minimizando colisões.

Essa operação paralela contrasta diretamente com o comportamento observado em redes IEEE 802.11ac, nas quais cada STA transmitiria de forma sequencial, ocupando todo o canal, mesmo para transmissões de baixa taxa. Como consequência, no Wi-Fi legado, sensores com pacotes curtos podem ficar bloqueados atrás de transmissões longas de outros dispositivos, caracterizando o fenômeno de *Head-of-Line (HoL) delay*. A Figura 8 demonstra como o OFDMA mitiga esse problema ao permitir que múltiplos sensores transmitam ou

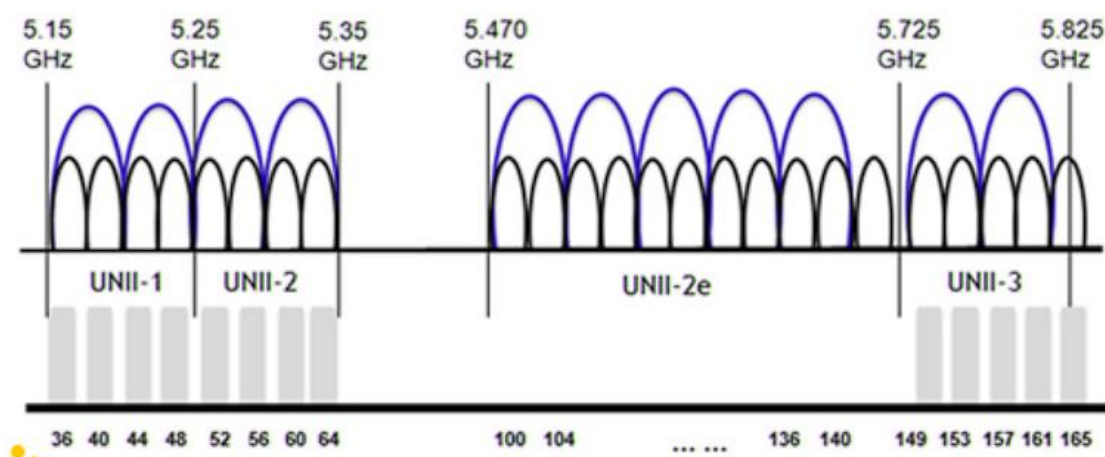
recebam dados simultaneamente, reduzindo significativamente a latência média e o *jitter* da rede (Memoona; Kim, 2025).

#### 4.4.3 A banda de 5.8 GHz

A banda de 5.8 GHz integra a faixa de radiofrequência de 5 GHz destinada às comunicações sem fio, sendo amplamente utilizada por tecnologias baseadas no padrão IEEE 802.11, como os protocolos 802.11a, 802.11ac e 802.11ax, o já mencionado Wi-Fi 6. Em diversos países, incluindo o Brasil, essa banda é classificada como de uso não licenciado, desde que sejam respeitados os limites estabelecidos pelos órgãos reguladores quanto à potência de transmissão e às condições de operação (IEEE, 2020; ANATEL, 2022).

Uma das principais vantagens da banda de 5.8 GHz é a sua ampla disponibilidade espectral. Essa faixa possui aproximadamente 500 MHz de largura de espectro, sendo subdividida em 24 canais individuais com largura de banda de 20 MHz, vistos na Figura 9, o que possibilita uma maior quantidade de canais não sobrepostos quando comparada à banda de 2.4 GHz. Essa característica contribui significativamente para a redução de interferências e da contenção de canal, especialmente em ambientes com alta densidade de dispositivos conectados (Stallings, 2020; Kurose; Ross, 2021).

Figura 9 - Canais Wi-Fi 5 GHz



Fonte: <https://thinkpalm.com>

Além disso, a banda de 5.8 GHz permite o uso de larguras de banda superiores, como 40 MHz, 80 MHz e 160 MHz, possibilitando taxas de transmissão mais elevadas, menor latência e melhor desempenho geral da rede. Tais características tornam essa faixa de frequência adequada para aplicações que demandam alta capacidade de dados, como

transmissão de vídeo em alta definição, comunicação em tempo real e enlaces de *backbone* em redes sem fio (Gast, 2013; Cisco, 2020).

Com a introdução do padrão Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), a banda de 5.8 GHz passou a ser ainda mais eficiente, incorporando tecnologias como OFDMA mencionado no tópico anterior, MU-MIMO (*Multi-User Multiple Input Multiple Output*) e mecanismos avançados de gerenciamento espectral. Esses recursos permitem que múltiplos dispositivos compartilhem o meio de transmissão de forma mais eficiente, reduzindo a latência e aumentando o *throughput* agregado da rede, mesmo em cenários de alta concorrência (IEEE, 2021; Bellalta, 2016).

Entretanto, apesar de suas vantagens, a banda de 5.8 GHz apresenta menor alcance e menor capacidade de penetração em obstáculos físicos, como paredes e estruturas sólidas, quando comparada à banda de 2.4 GHz. Essa limitação é decorrente da maior frequência do sinal, que sofre maior atenuação durante a propagação. Dessa forma, sua aplicação é mais indicada para ambientes com distâncias moderadas ou como enlace de *backbone* em redes IoT e infraestruturas sem fio modernas (Rappaport, 2002; Stallings, 2021).

#### 4.5 Arquiteturas de Edge Computing e Balanceamento de Carga

A ascensão da Internet das Coisas (IoT) e a consequente massificação de dispositivos conectados impuseram desafios significativos às infraestruturas tradicionais de comunicação e processamento. Arquiteturas baseadas exclusivamente em computação em nuvem (*Cloud Computing*) apresentam limitações importantes, sobretudo no que diz respeito à latência, ao consumo excessivo de largura de banda e à dependência de enlaces de longa distância, fatores críticos para aplicações IoT sensíveis ao tempo. Nesse contexto, a Computação de Borda (*Edge Computing*) emerge como um paradigma essencial ao aproximar recursos computacionais e de armazenamento dos dispositivos finais, reduzindo atrasos e melhorando a eficiência global do sistema (Amrullah, 2024).

Dentro dessa arquitetura distribuída, os *gateways* de borda desempenham um papel central como intermediários inteligentes entre os nós IoT e a infraestrutura de rede de maior capacidade. Esses *gateways* são responsáveis por agregar dados provenientes de dispositivos heterogêneos, realizar pré-processamento local, aplicar políticas de controle e encaminhar o tráfego de forma otimizada em direção à nuvem ou a outros nós de borda. Em redes 5G, essa integração é potencializada pelo conceito de *Multi-access Edge Computing* (MEC), que

possibilita a execução dessas funcionalidades com ultra-baixa latência, alta confiabilidade e maior proximidade lógica da camada de acesso rádio (Amrullah, 2024).

Entretanto, à medida que o número de dispositivos e o volume de dados aumentam, os *gateways* de borda tornam-se potenciais gargalos de desempenho. A natureza dinâmica, heterogênea e imprevisível do tráfego IoT torna inadequadas abordagens tradicionais de gerenciamento baseadas em políticas estáticas. Assim, mecanismos inteligentes de balanceamento de carga adaptativo tornam-se fundamentais para garantir escalabilidade, qualidade de serviço e resiliência do sistema.

#### 4.5.1 Modelo de Balanceamento de Carga Adaptativo

Um dos principais desafios para a escalabilidade em sistemas IoT em larga escala é a variabilidade temporal do tráfego, caracterizada por picos súbitos de demanda e padrões altamente não lineares. Estratégias estáticas de distribuição de carga mostram-se ineficientes nesse cenário, podendo sobrecarregar gateways específicos e comprometer métricas críticas como latência, vazão e disponibilidade. Para mitigar esse problema, Amrullah (2024) propõe um modelo de balanceamento de carga adaptativo, estruturado em quatro componentes principais, capazes de operar de forma integrada e dinâmica.

O Monitor de Recursos é responsável pela coleta contínua de métricas em tempo real, incluindo utilização de CPU, consumo de memória, latência de processamento e tamanho das filas no gateway. Essas informações fornecem uma visão atualizada do estado operacional do sistema.

Com base nesses dados, o Mecanismo de Predição baseado em Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina emprega algoritmos como Redes Neurais de Longo e Curto Prazo (*Long Short-Term Memory – LSTM*) e técnicas de Aprendizado por Reforço (*Reinforcement Learning*), permitindo antecipar padrões de tráfego e flutuações de carga antes que situações de congestionamento ocorram.

O Tomador de Decisão utiliza tanto as métricas instantâneas quanto as previsões geradas para determinar a estratégia mais adequada de tratamento das tarefas, decidindo se estas devem ser processadas localmente no *gateway*, encaminhadas para um *gateway* vizinho ou delegadas à nuvem. Essa tomada de decisão dinâmica é essencial para manter o equilíbrio entre desempenho e utilização eficiente dos recursos.

Por fim, o Roteador de Tráfego executa as decisões definidas, garantindo que os requisitos de Qualidade de Serviço (QoS) de cada aplicação sejam atendidos, respeitando restrições de latência, confiabilidade e prioridade.

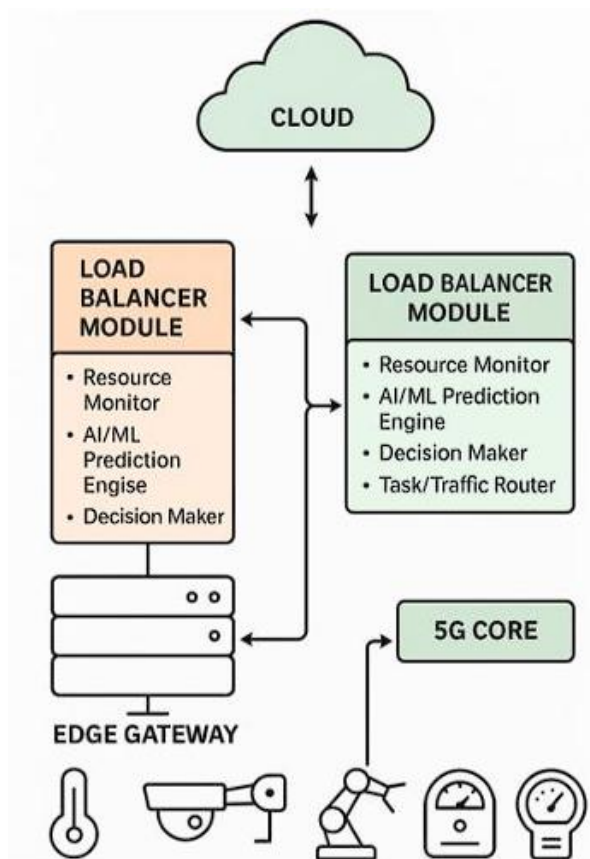
#### 4.5.2 Integração com Recursos de Rede 5G

A eficácia do modelo de balanceamento de carga adaptativo é ampliada quando integrada às capacidades nativas das redes 5G. Em particular, o uso de Fatiamento de Rede (*Network Slicing*) permite a alocação lógica de recursos dedicados para diferentes classes de aplicações IoT. Serviços que exigem alta confiabilidade e baixa latência podem ser atendidos por fatias do tipo *Ultra-Reliable Low-Latency Communication* (URLLC), enquanto as aplicações caracterizadas por grande volume de dispositivos e baixo tráfego individual podem utilizar fatias *massive Machine Type Communication* (mMTC) (Amrullah, 2024).

Essa abordagem distribuída e inteligente reforça a arquitetura proposta neste trabalho, na qual o *gateway* atua como um ponto central de decisão, combinando coleta eficiente de dados na camada de acesso sem fio com processamento local e encaminhamento otimizado. Ao aliviar o congestionamento do espectro e distribuir de forma adaptativa o processamento e o tráfego, a solução contribui para a escalabilidade, confiabilidade e eficiência energética do sistema IoT como um todo (Amrullah, 2024).

A Figura 10 ilustra o fluxo de dados desde os dispositivos IoT até a nuvem, destacando o papel dos gateways equipados com módulos de *Load Balancer*, evidenciando a inteligência distribuída e a tomada de decisão adaptativa discutidas neste capítulo.

Figura 10 - Arquitetura 5G-IoT com balanceamento de carga em gateways de borda.



Fonte: Adaptado de Amrullah (2024).

## 5 METODOLOGIA

Diante desse cenário de saturação espectral na banda de 2.4 GHz, soluções exclusivamente baseadas em software, como algoritmos adaptativos de seleção ou desvio de canal, apresentam eficácia limitada, especialmente quando grande parte do espectro se encontra ocupada por transmissões Wi-Fi. Esse contexto fundamenta a abordagem arquitetural proposta neste trabalho, que consiste na migração do tráfego de *backhaul* para uma banda menos congestionada, especificamente a banda de 5.8 GHz, por meio de um *gateway cross-band*. Essa estratégia visa reduzir a pressão sobre a banda de 2.4 GHz, permitindo que as redes de sensores operem de forma mais confiável, eficiente e energeticamente sustentável.

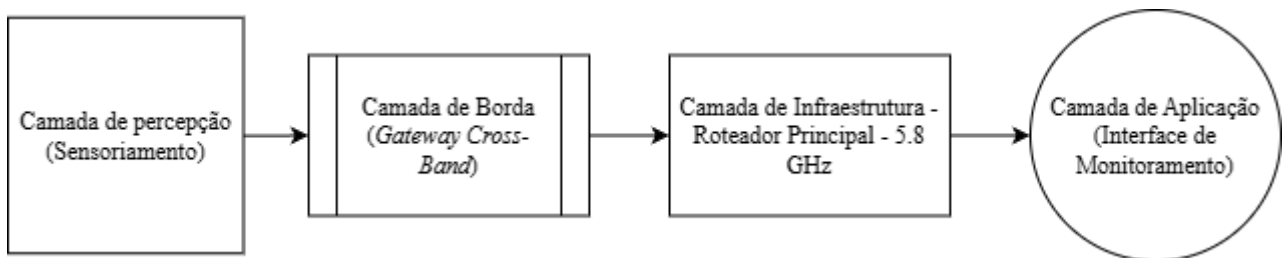
Este capítulo descreve os procedimentos, ferramentas e cenários utilizados para a implementação e avaliação do *gateway cross-band* proposto. A pesquisa adota uma

abordagem experimental e quantitativa, focada na análise de desempenho de uma rede IoT sob condições de congestionamento espectral e a eficácia da migração de tráfego para a banda de 5.8 GHz.

### 5.1 Arquitetura do Sistema Proposto

A arquitetura do sistema foi projetada seguindo o modelo de computação de borda (*Edge Computing*), onde o *gateway* atua como o nó central de processamento e decisão. O modelo lógico do sistema é organizado em quatro camadas principais, conforme descrito na Figura 11.

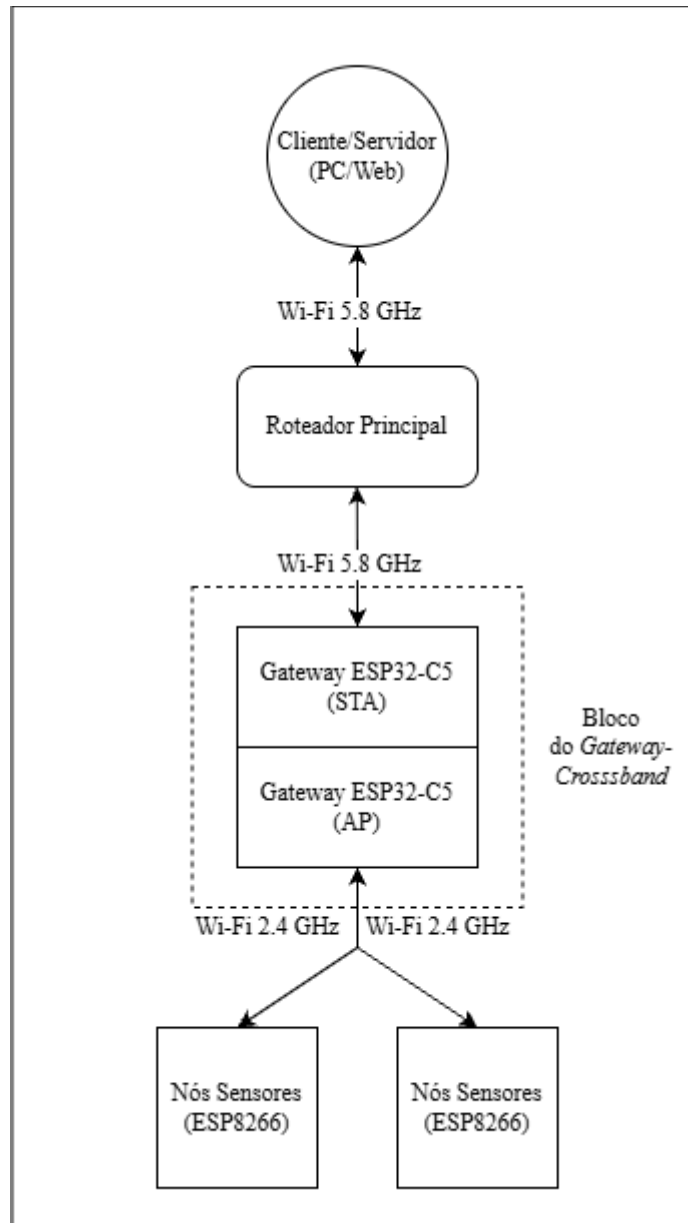
Figura 11 - Arquitetura Geral do Sistema



Fonte: Autor, 2025.

A Figura 12 apresenta o diagrama de blocos funcional do sistema proposto, ilustrando de forma clara a arquitetura *cross-band* implementada e o fluxo de dados entre os diferentes componentes da rede IoT. O diagrama evidencia a separação entre a banda de acesso utilizada pelos nós sensores e a banda dedicada ao *backhaul*, bem como o papel central do *gateway* ESP32-C5 como elemento de agregação e decisão.

Figura 12 - Diagrama de Blocos Conceitual do Gateway Cross-band baseado no ESP32-C5



Fonte: Autor, 2025.

#### 5.1.1.1 Camada de Percepção (Nós Sensores)

Na base do diagrama da Figura 12, encontram-se os nós sensores, implementados com microcontroladores ESP8266. Esses dispositivos operam exclusivamente na banda de 2.4 GHz, conectando-se ao *gateway* por meio de comunicação Wi-Fi no modo estação (*station*). Essa escolha é justificada pelas características favoráveis dessa banda para dispositivos IoT, como maior alcance, melhor penetração em obstáculos e ampla compatibilidade com *hardware* de baixo custo. Cada nó é responsável pela transmissão de informações por meio do protocolo IEEE 802.11ax operando na banda de 2.4 GHz.

### 5.1.1.2 Camada de Borda (Gateway Cross-Band)

O elemento central da arquitetura é o *gateway* ESP32-C5, destacado no diagrama da Figura 12 como o “Bloco do Gateway Cross-Band”. Esse *gateway* opera simultaneamente em dois modos distintos, desempenhando funções complementares:

- Interface AP (*Access Point* – 2.4 GHz):

Na parte inferior do bloco, o ESP32-C5 atua como ponto de acesso Wi-Fi na banda de 2.4 GHz. Nessa função, ele recebe as conexões dos nós sensores e coleta os dados transmitidos, funcionando como concentrador local de tráfego IoT.

- Interface STA (*Station* – 5.8 GHz):

Na parte superior do bloco, o mesmo dispositivo opera como estação conectada ao roteador principal por meio da banda de 5.8 GHz, utilizando um enlace Wi-Fi 6. Essa interface é responsável por encaminhar o tráfego agregado para a rede de maior capacidade, caracterizando o enlace de *backhaul*.

A coexistência dessas duas interfaces no mesmo dispositivo materializa a estratégia *cross-band*, permitindo a separação funcional entre tráfego de acesso (sensoriamento) e tráfego de transporte (agregação), reduzindo a competição espectral na banda de 2.4 GHz.

### 5.1.1.3 Camada de Infraestrutura – Roteador Principal (Wi-Fi 5.8 GHz)

Acima do *gateway*, o diagrama apresenta o roteador principal, conectado ao ESP32-C5 exclusivamente pela banda de 5.8 GHz. Esse roteador atua como ponto de interligação entre a rede local de borda e a rede de aplicação, oferecendo maior largura de banda e menor interferência em comparação à banda de 2.4 GHz.

Essa separação garante que o tráfego de *backhaul*, potencialmente mais volumoso, não interfira diretamente na comunicação entre os sensores e o *gateway*.

### 5.1.1.4 Camada de Aplicação (Interface de monitoramento)

A camada de aplicação é composta por um servidor local, responsável por hospedar uma interface *web* de monitoramento. Essa interface permite a visualização dos dados dos sensores em tempo real, bem como o acompanhamento das métricas de desempenho da rede.

A comunicação entre o *gateway* e o servidor utiliza protocolo leve, especificamente o HTTP, adequados a aplicações IoT devido ao seu baixo *overhead*. O *dashboard* foi

desenvolvido com tecnologias *web* (HTML, JavaScript e Chart.js), permitindo a análise gráfica da telemetria e dos indicadores de desempenho coletados durante os experimentos.

## 5.2 Materiais e Ferramentas

Esta seção descreve os principais componentes físicos e ferramentas de desenvolvimento utilizados na implementação do protótipo experimental do gateway IoT cross-band. A seleção dos materiais considerou critérios como baixo custo, disponibilidade comercial e compatibilidade com tecnologias Wi-Fi modernas.

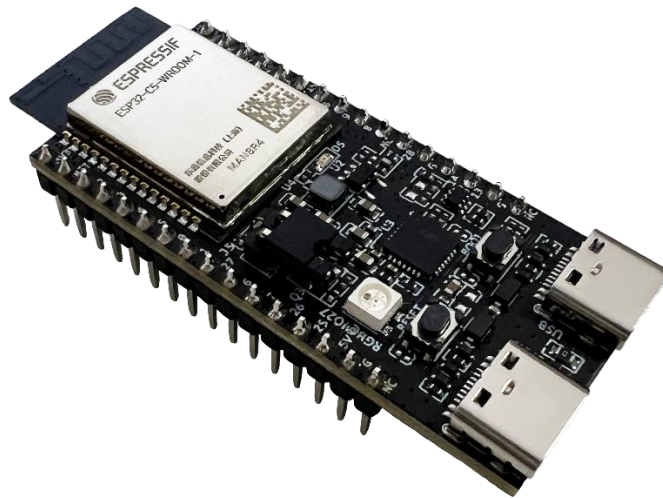
### 5.2.1 Hardware

Para a implementação do protótipo experimental, foram selecionados componentes de hardware e software que conciliam baixo custo, disponibilidade comercial e suporte a tecnologias modernas de rede, garantindo a reprodutibilidade da metodologia.

5.2.1.1 ESP32-C5: microcontrolador *dual-band* com suporte nativo ao padrão IEEE 802.11ax, utilizado como *gateway cross-band*.

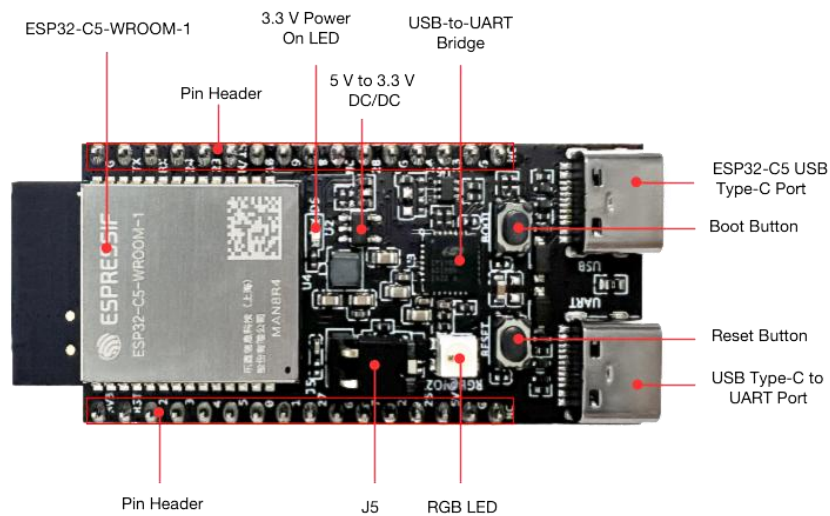
O microcontrolador ESP32-C5, Figura 13 e Figura 14, representa uma evolução significativa no ecossistema da Espressif, destacando-se como o primeiro SoC da fabricante a integrar conectividade Wi-Fi 6 dual-band, operando tanto na frequência de 2.4 GHz quanto na de 5.8 GHz. Desenvolvido sobre uma arquitetura RISC-V de 32 bits, este chip foi projetado para solucionar problemas críticos de congestionamento de rede, permitindo que dispositivos IoT operem na banda de 5 GHz, que é geralmente menos saturada e oferece maior estabilidade de conexão. Além da conectividade sem fio avançada, o ESP32-C5 oferece suporte completo ao Bluetooth 5 (BLE) e ao protocolo IEEE 802.15.4, o que o torna nativamente compatível com tecnologias como Zigbee e Thread, sendo uma peça fundamental para o padrão *Matter* de conectividade inteligente. Sua eficiência energética é potencializada por recursos do Wi-Fi 6, como o *Target Wake Time*, que otimiza o consumo e prolonga a vida útil da bateria em aplicações portáteis. Complementando suas capacidades, o chip inclui uma ampla variedade de periféricos para sensores e atuadores, além de robustas funcionalidades de segurança integradas ao *hardware*, consolidando-se como uma solução versátil para automação residencial, infraestrutura industrial e sistemas que exigem alta confiabilidade em ambientes com alta densidade de sinais sem fio, como podemos ver nos dados da Tabela 2 e o Pinout apresentado na Figura 15 (Espressif Systems, 2024).

Figura 13 - Espressif Systems ESP32-C5



Fonte: Espressif Systems

Figura 14 - Descrição dos componentes do ESP32-C5



Fonte: Espressif Systems

Tabela 2- Tabela de componentes ESP32-C5

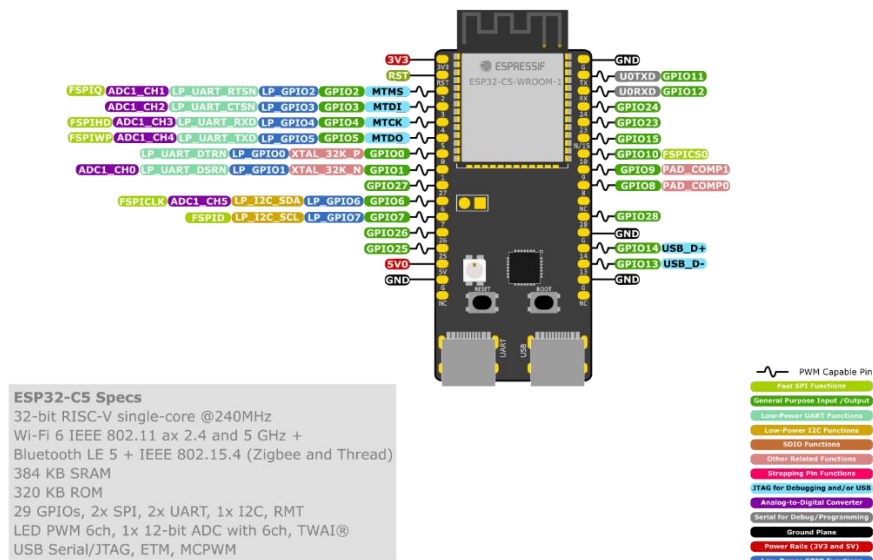
Componente Principal	Descrição
ESP32-C5-WROOM-1	Módulo dual-band (Wi-Fi 6, BT 5, Zigbee/Thread) com antena integrada.
Barramento de Pinos (Pin Header)	Acesso físico aos pinos de entrada e saída (GPIO) do chip.

DC/DC de 5 V para 3,3 V	Regulador de tensão que converte uma alimentação de 5 V em uma saída de 3,3 V.
LED de Ligado (3,3 V)	Acende quando a placa está conectada à alimentação via USB.
Ponte USB-para-UART	Ponte USB-para-UART de chip único que oferece taxa de transferência de até 3 Mbps.
Porta USB Tipo-C do ESP32-C5	Porta direta do chip para dados (12 Mbps), energia e depuração JTAG.
Botão Boot	Usado para colocar a placa em modo de gravação de firmware.
Botão Reset	Pressione este botão para reiniciar o sistema.
Porta USB Tipo-C para UART	Porta para alimentação e gravação via ponte serial.
LED RGB	LED RGB endereçável, controlado pelo pino GPIO27.
J5	Usado para medição de corrente.

Fonte: Espressif Systems

Figura 15 – Pinout do ESP32-C5

ESP32-C5-DevKitC-1



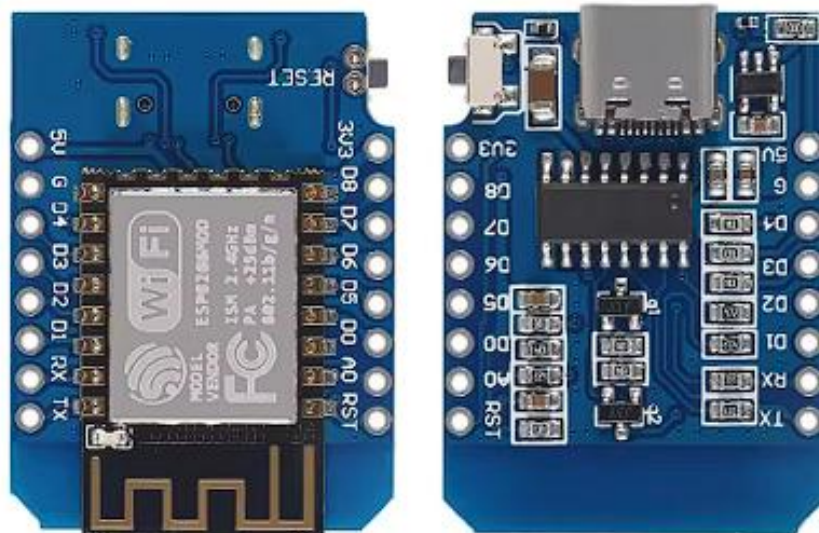
Fonte: Espressif Systems

5.2.1.2 ESP8266 (NodeMCU): microcontroladores empregados como nós sensores IoT operando na banda de 2.4 GHz.

A placa de desenvolvimento WeMos ESP8266 D1 Mini Pro visto na Figura 16 destaca-se como uma solução compacta e eficiente para projetos de Internet das Coisas (IoT),

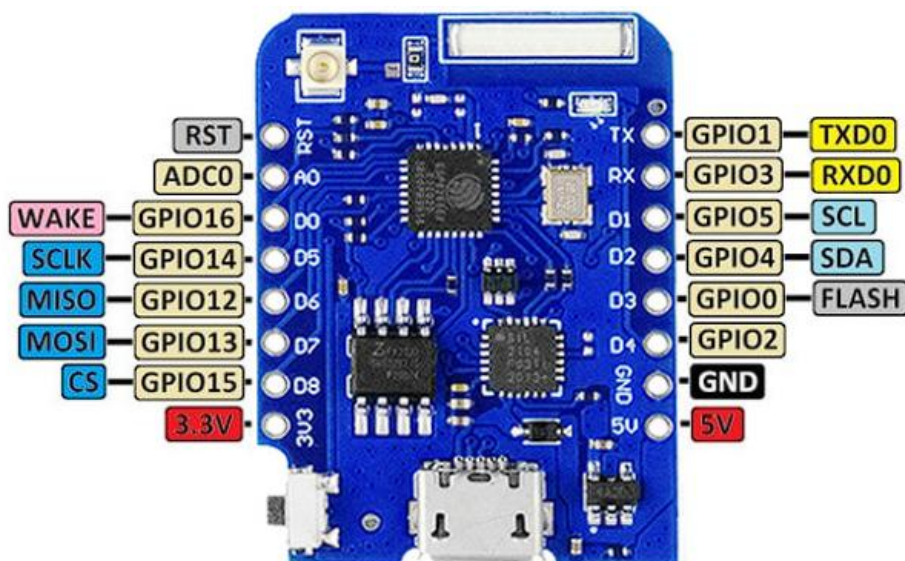
integrando o microcontrolador ESP8266EX em dimensões reduzidas de aproximadamente 34mm x 26mm. Operando com uma velocidade de processamento de até 160 MHz, esta plataforma oferece conectividade Wi-Fi nos padrões 802.11 b/g/n, o que facilita a comunicação sem fio e a integração com serviços online para o controle remoto de dispositivos e troca de dados. Apesar do seu formato reduzido, a placa disponibiliza 11 pinos digitais de entrada e saída na Figura 17, garantindo versatilidade na conexão de diversos sensores e periféricos em prototipagens rápidas. Além disso, sua ampla aceitação no mercado é reforçada pelo suporte massivo da comunidade de desenvolvedores, que provê uma vasta biblioteca de códigos e exemplos, tornando-a uma das opções mais acessíveis e práticas para o desenvolvimento de sistemas embarcados conectados (Wemos, 2024).

Figura 16 - Microcontrolador WeMos D1 Mini ESP-12F, Chip do ESP8266



Fonte: [www.usinainfo.com.br/esp8266/nodemcu-v3-esp8266](http://www.usinainfo.com.br/esp8266/nodemcu-v3-esp8266)

Figura 17 - Pinout WeMos D1



Fonte: [www.usinainfo.com.br/esp8266/nodemcu-v3-esp8266](http://www.usinainfo.com.br/esp8266/nodemcu-v3-esp8266)

5.2.1.3 Roteador HUAWEI AX2S Ws 7000: equipamento de infraestrutura com suporte a Wi-Fi 6, responsável por prover o enlace de *backhaul* na banda de 5.8 GHz.

O roteador Huawei WiFi AX2S (WS7000) visto na Figura 18 é um dispositivo de rede avançado que oferece conectividade *dual-band* através do padrão Wi-Fi 6 (802.11ax), alcançando velocidades de transmissão de até 1201 Mbps na frequência de 5.8 GHz e 300 Mbps em 2.4 GHz. Equipado com 128 MB de RAM e 128 MB de memória ROM, o aparelho utiliza tecnologias como MU-MIMO e OFDMA para otimizar a eficiência de múltiplos fluxos de dados, garantindo uma conexão estável mesmo com diversos aparelhos conectados simultaneamente. Sua infraestrutura física conta com quatro portas WAN/LAN Gigabit com adaptação automática, além de botões dedicados para funções WPS (H) e Reset. No que tange às funcionalidades de software, o AX2S suporta protocolos modernos como IPv6 e 802.11kv, oferecendo recursos robustos de gerenciamento que incluem controle parental, rede para convidados, filtragem de endereços MAC e suporte a VPN. Versátil em sua operação, o dispositivo permite configurações via PPPoE, DHCP ou IP estático, podendo atuar tanto no modo WAN quanto no modo Bridge para se adequar a diferentes necessidades de topologia de rede, onde as especificações técnicas serão demonstradas nas Tabela 3 (Huawei, 2024).

Figura 18 - Roteador Huawei Ax2s Ws7000



Fonte: <https://consumer.huawei.com/br/routers/ax2s/specs/>

Tabela 3- Especificações técnicas do Roteador AX2S Ws7000

<b>Categoria</b>	<b>Detalhes Técnicos</b>
Memória	128 MB de RAM e 128 MB de ROM.
Padrão de Transmissão	Suporta 802.11ax/ac/a/n 2 × 2 e 802.11b/g/n 2 × 2, com tecnologias MU-MIMO, OFDMA
Taxa de Transmissão	Até 300 Mb/s em rede WiFi de 2.4 GHz e até 1201 Mb/s em rede WiFi de 5 GHz.
Bandas de Frequência	Operação em dual-band: 2.4 GHz e 5 GHz.
Portas de Rede	Quatro portas WAN/LAN de 100/1000 Mbps com adaptação automática.
Botões	Botão WPS (H) e Botão Reset.
Protocolos e Recursos	802.11kv, suporte a IPv4/IPv6, VPN, DMZ/servidor virtual e métodos de conexão PPPoE/DHCP/IP estático.
Gestão e Segurança	Temporizador de WiFi, WiFi para convidados, limitação de velocidade por dispositivo, filtro de endereço MAC.
Modos de Operação	Métodos de conexão WAN e Bridge.

Fonte: <https://consumer.huawei.com/br/routers/ax2s/specs/>

### 5.2.2 Software

A arquitetura de software do *gateway cross-band* proposto foi projetada segundo um modelo orientado a serviços e centrado em computação de borda, no qual um único dispositivo embarcado desempenha múltiplos papéis funcionais: ponto de acesso para os nós sensores, cliente de rede para o enlace de *backhaul* e servidor web para interação com a aplicação final.

Do ponto de vista lógico, o *firmware* implementado no ESP32-C5 pode ser compreendido como a integração de três blocos principais:

- *Camada de Conectividade*, responsável pelo gerenciamento simultâneo das interfaces Wi-Fi em bandas distintas;
- *Camada de Comunicação e Controle*, encarregada da troca de mensagens HTTP com os nós sensores e com a interface de monitoramento;
- *Camada de Apresentação*, que disponibiliza ao usuário um painel *web* para visualização em tempo real das métricas e envio de comandos.

Essa organização reflete diretamente a estratégia *cross-band* proposta neste trabalho, na qual o *gateway* atua como elemento intermediário inteligente, isolando o tráfego de acesso (sensores em 2.4 GHz) do tráfego de agregação (*backhaul* em 5.8 GHz), sem a necessidade de infraestrutura adicional.

No código-fonte conforme a Figura 19, essa arquitetura manifesta-se claramente já na fase de inicialização do sistema, onde o ESP32-C5 é configurado para operar simultaneamente como *Access Point* (AP) e *Station* (STA):

Figura 19-Bloco de Código 1

```
// 1. Define o modo de operação para AP + STA
WiFi.mode(WIFI_AP_STA);
```

Fonte: Autor, 2025.

Essa linha sintetiza o conceito central da arquitetura de software: a coexistência de duas pilhas de comunicação independentes dentro do mesmo dispositivo embarcado, permitindo a separação funcional das responsabilidades de rede.

Além disso, o *gateway* executa um servidor HTTP embarcado, responsável por expor serviços REST para monitoramento e controle, ao mesmo tempo em que atua como cliente HTTP ao consultar periodicamente o estado dos nós sensores. Esse comportamento híbrido é

essencial para a coleta de métricas experimentais, como latência, RSSI e disponibilidade dos dispositivos.

Por fim, a interface de usuário é implementada como uma aplicação *web* leve, servida diretamente pelo *gateway*, utilizando tecnologias padrão da *Web*. Essa abordagem elimina dependências externas e reforça o papel do *gateway* como um nó autônomo de borda, alinhado aos princípios de *Edge Computing* discutidos na fundamentação teórica.

Em síntese, a arquitetura de *software* proposta combina simplicidade de implementação com flexibilidade funcional, permitindo avaliar de forma controlada o impacto da separação espectral e do balanceamento de carga estático sobre o desempenho de redes IoT em ambientes congestionados.

#### 5.2.2.1 Frameworks e bibliotecas utilizadas na implementação do Gateway

A implementação do gateway foi feita usando o Arduino IDE, que fornece o ambiente de desenvolvimento para microcontroladores ESP32 e ESP8266. No código do gateway, foram utilizadas bibliotecas que gerenciam a conectividade sem fio, criam o servidor HTTP embarcado, permitem que o gateway faça requisições, processam os dados em formato JSON e estruturam dados para armazenar as métricas.

No lado da interface web, o painel é construído com HTML, CSS e JavaScript, incluindo o uso de Chart.js para exibir gráficos de desempenho.

##### a) **Framework Arduino IDE para ESP32-C5 e ESP8266**

O desenvolvimento do *firmware* do projeto foi realizado utilizando o *Framework* Arduino IDE, que fornece uma camada de abstração de alto nível sobre o hardware do microcontrolador, integrando suporte nativo à pilha TCP/IP, ao sistema operacional de tempo real (FreeRTOS) e aos periféricos de comunicação sem fio.

A adoção do *framework* Arduino justifica-se pela sua ampla utilização em aplicações IoT, facilidade de prototipagem e grande ecossistema de bibliotecas compatíveis, permitindo o rápido desenvolvimento de aplicações embarcadas complexas, como *gateways* de borda com múltiplas interfaces de rede.

Nos códigos-fonte apresentados, o uso do *framework* Arduino IDE é evidenciado pela estrutura clássica do programa, composta pelas funções *setup()* e *loop()*, que definem o ciclo de vida da aplicação embarcada conforme a Figura 20.

Figura 20 Bloco de código 2

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  ...
}

void loop() {
  server.handleClient();
  ...
}

```

Fonte: Autor, 2025.

A função *setup()* é executada uma única vez durante a inicialização do sistema e é responsável pela configuração dos recursos fundamentais do *gateway*, como a inicialização da interface serial para depuração, a configuração dos modos de operação da rede Wi-Fi e o início do servidor *web*. Já a função *loop()* é executada continuamente, permitindo o processamento de requisições HTTP, a verificação periódica do estado dos nós sensores e a atualização das métricas de desempenho.

Além disso, o *framework* Arduino abstrai o controle de temporização e eventos por meio de funções como *millis()* e *delay()*, amplamente utilizadas no código para a implementação de mecanismos de monitoramento e controle temporal conforme a Figura 21.

Figura 21-Bloco de código 3

```

unsigned long currentMillis = millis();
if (currentMillis - lastStatusCheck >= statusCheckInterval) {
  lastStatusCheck = currentMillis;
  checkSlaveStatus(1);
  checkSlaveStatus(2);
}

```

Fonte: Autor, 2025.

## b) Biblioteca WiFi.h – Gerenciamento de Conectividade Dual (AP + STA)

A biblioteca WiFi.h é responsável pelo gerenciamento completo das interfaces de comunicação sem fio do *gateway* ESP32-C5. No contexto deste trabalho, essa biblioteca

desempenha um papel central ao permitir que o dispositivo opere simultaneamente como ponto de acesso (AP) e estação (STA), característica essencial para a implementação da arquitetura *cross-band*, já vista no Bloco de código 1.

Após a definição do modo de operação, o *gateway* cria uma rede Wi-Fi própria na banda de 2.4 GHz para os nós sensores, utilizando a função `WiFi.softAP()` conforme a Figura 22:

Figura 22-Bloco de código 4

```
WiFi.softAP(AP_SSID);
```

Fonte: Autor, 2025.

Paralelamente, o *gateway* estabelece uma conexão como estação em uma rede distinta, operando na banda de 5.8 GHz, por meio da função `WiFi.begin()` conforme a Figura 23:

Figura 23- Bloco de código 5

```
WiFi.begin(STA_SSID, STA_PASS);
```

Fonte: Autor, 2025.

Essa configuração simultânea de AP e STA permite a separação funcional entre o tráfego de acesso (sensores IoT) e o tráfego de *backhaul*, materializando em nível de *software* o conceito de balanceamento de carga estático no domínio espectral discutido na fundamentação teórica.

### c) Biblioteca `WebServer.h` – Servidor HTTP Embarcado

A biblioteca `WebServer.h` é utilizada para implementar um servidor HTTP embarcado no *gateway*, responsável por hospedar a interface *web* de monitoramento e disponibilizar serviços REST para controle e consulta de estado.

O servidor é instanciado na porta padrão HTTP conforme a Figura 24:

Figura 24- Bloco de código 6

```
WebServer server(80);
```

Fonte: Autor, 2025

As rotas são definidas de forma explícita, associando URLs a funções específicas do *firmware* conforme a Figura 25:

Figura 25-Bloco de código 7

```
server.on("/", handleRoot);  
server.on("/status", handleStatus);  
server.on("/toggle", handleToggle);
```

Fonte: Autor, 2025.

Essa abordagem permite que o *gateway* exponha recursos acessíveis por navegadores *web* ou aplicações cliente, seguindo o paradigma RESTful, amplamente adotado em sistemas IoT por sua simplicidade e interoperabilidade.

#### d) Biblioteca HTTPClient.h – Comunicação com os Nós Sensores

A biblioteca HTTPClient.h é utilizada para permitir que o *gateway* atue como cliente HTTP, realizando requisições ativas aos nós sensores ESP8266.

Por meio dessa biblioteca, o *gateway*:

- Envia comandos de controle (/ligar e /desligar);
- Consulta o status dos sensores (/status);
- Mede métricas de desempenho, como latência de resposta.

A medição da latência é implementada diretamente no código, calculando o tempo decorrido entre o envio da requisição e o recebimento da resposta visto na Figura 26:

Figura 26-Bloco de código 8

```
unsigned long startTime = millis();  
http.GET();  
long latency = millis() - startTime;
```

Fonte: Autor, 2025.

Essa instrumentação permite a coleta de dados quantitativos fundamentais para a avaliação experimental do impacto da arquitetura *cross-band*.

### e) Biblioteca ArduinoJson – Serialização e Desserialização de Dados

A biblioteca ArduinoJson é utilizada para o processamento de dados estruturados no formato JSON, tanto na comunicação com os nós sensores quanto na interação com a interface *web*.

No *gateway*, os dados recebidos dos sensores são desserializados para extração de métricas, como RSSI, visto na Figura 27:

Figura 27-Bloco de código 9

```
JsonDocument doc;
deserializeJson(doc, payload);
long rssi = doc["rssi"];
```

Fonte: Autor, 2025.

Além disso, o *gateway* gera respostas JSON para o *endpoint /status*, estruturando informações de estado, histórico e métricas de desempenho. O uso de JSON garante padronização, baixo *overhead* e compatibilidade com aplicações *web* modernas.

### f) STL (vector) – Estruturas de Dados para Histórico

A biblioteca padrão STL <vector> é utilizada para armazenar o histórico de métricas de cada nó sensor, como latência e intensidade do sinal Wi-Fi.

Cada amostra é representada pela estrutura visto na Figura 28:

Figura 28-Bloco de código 10

```
struct DataPoint {
    long latency;
    long rssi;
};
```

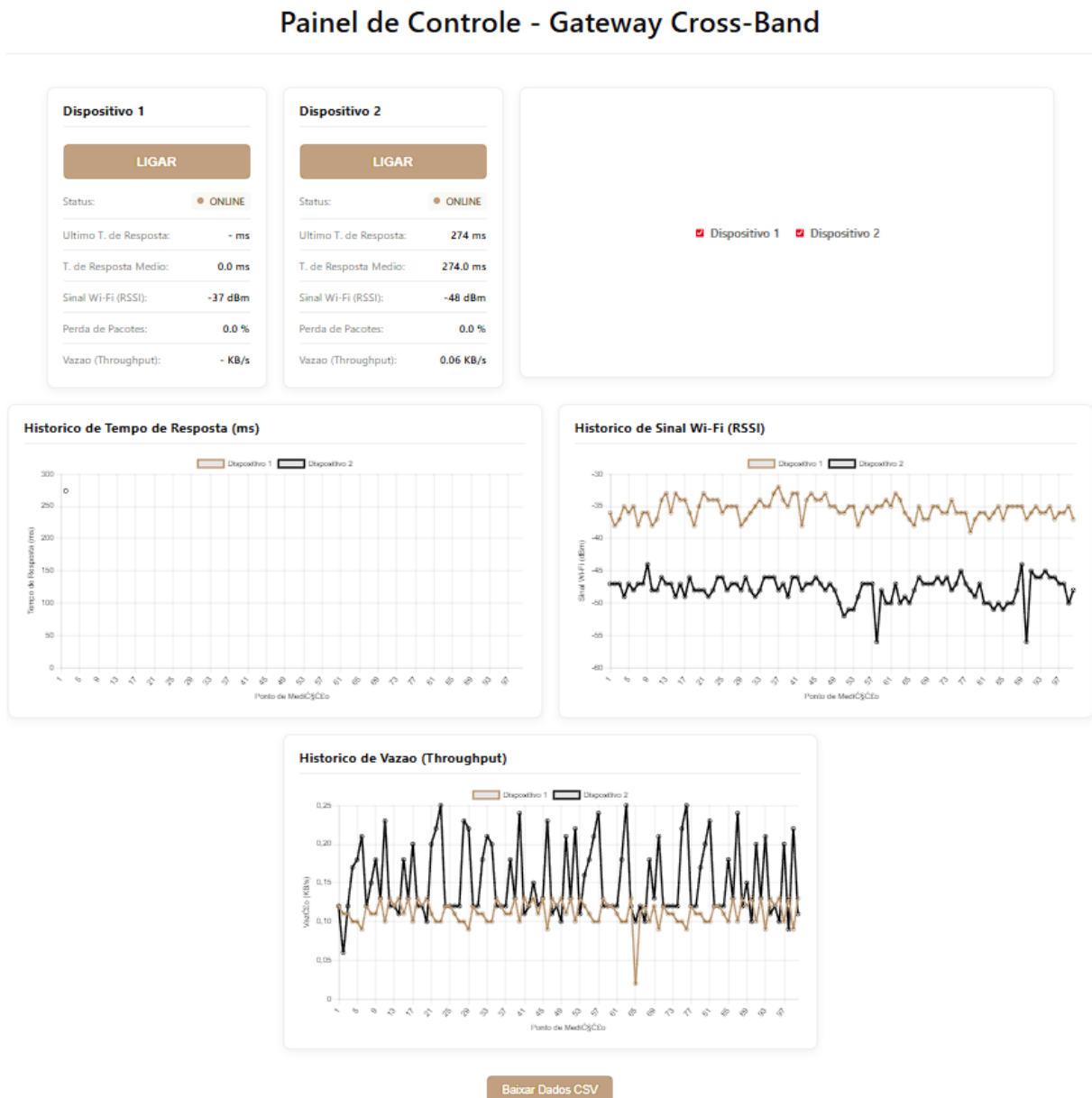
Fonte: Autor, 2025.

Os vetores *history1* e *history2* funcionam como *buffers* circulares, limitados por um tamanho máximo, conforme implementado na função *addDataPoint()*. Essa estratégia permite a análise temporal do desempenho da rede sem comprometer excessivamente os recursos de memória do dispositivo embarcado.

### 5.2.2.2 Frameworks Web no Lado do Cliente

A interface de monitoramento do sistema proposto da Figura 29 é implementada como uma aplicação *web* leve, servida diretamente pelo *gateway* ESP32-C5. Essa abordagem elimina a necessidade de servidores externos e reforça o papel do *gateway* como um nó autônomo de computação de borda, capaz de prover visualização e controle em tempo real.

Figura 29 - Painel de Controle - *Gateway Cross-Band* (Interface Homem Máquina)



Fonte: Interface Autor, 2025.

A aplicação *web* utiliza tecnologias padrão da *Web* — HTML, CSS e JavaScript — complementadas pelo *framework Chart.js* para visualização gráfica de métricas de desempenho. Essas tecnologias são incorporadas diretamente no *firmware* do *gateway* por meio de uma resposta HTTP do tipo *text/html*, gerada pela função *handleRoot()*.

A escolha por tecnologias *web* padrão garante portabilidade, baixo acoplamento e facilidade de manutenção. Além disso, o fato de a interface ser hospedada diretamente no *gateway* elimina a necessidade de infraestrutura adicional, reduzindo latência e dependências externas.

Do ponto de vista metodológico, o painel de controle não atua apenas como uma interface visual, mas como um instrumento de medição experimental, permitindo a coleta, visualização e análise das métricas definidas neste trabalho.

### a) HTML e CSS – Estrutura e Apresentação da Interface

O HTML é responsável pela estruturação lógica da interface de usuário, definindo os elementos visuais do painel de controle, como cartões de dispositivos, botões de comando e áreas de exibição de métricas. No código, o HTML é construído como uma *string* literal e enviado ao navegador pelo servidor HTTP embarcado, como mostra o Bloco de código 11 Conforme figura 30:

Figura 30-Bloco de código 11

```
server.send(200, "text/html", html);
```

Fonte: Autor, 2025.

Elementos como títulos, botões e campos de status são definidos diretamente na marcação HTML, conforme figura 31:

Figura 31- Bloco de código 12

```
<h3>Dispositivo 1</h3>
<button id="toggleButton1" class="toggleButton">LIGAR</button>
<p>Status: <span id="status1">OFFLINE</span></p>
```

Fonte: Autor, 2025.

A partir dessas estruturas de código, podemos ver como fica visível na interface pela Figura 20.

Figura 32 - Cartões da interface de cada nó sensor.

## Painel de Controle - Gateway Cross-Band



Fonte: Interface do Painel de Controle desenvolvida pelo próprio autor.

Os cartões da interface mostram, respectivamente, o status do nó sensor (*online* ou *offline*), o último tempo de resposta (milissegundo), o tempo de resposta médio (milissegundo), o sinal atual do Wi-fi ou RSSI (dBm), a média percentual da perda de pacotes e a vazão da última iteração de comando (ligar/desligar).

O CSS, incorporado na seção `<style>` da página, é utilizado para a estilização da interface, garantindo clareza visual, responsividade e melhor usabilidade. Estilos como cores, espaçamento, tipografia e indicadores de estado (*online/offline*) são definidos para facilitar a interpretação das métricas pelo usuário.

Essa separação entre estrutura (HTML) e apresentação (CSS) contribui para a organização do código e permite que a interface seja facilmente adaptada para diferentes dispositivos, como *desktops* e *smartphones*.

### b) JavaScript – Lógica de Controle e Atualização Dinâmica

O JavaScript é responsável por toda a lógica dinâmica da interface *web*, permitindo a atualização contínua dos dados sem a necessidade de recarregar a página. No sistema proposto, o JavaScript desempenha as seguintes funções principais:

- Envio de comandos de controle aos nós sensores por meio do *gateway*;
- Consulta periódica do estado dos dispositivos;

- Processamento e exibição das métricas de desempenho;
- Atualização dinâmica dos gráficos e indicadores visuais.

A comunicação entre o navegador e o gateway é realizada utilizando a *Fetch API*, conforme ilustrado na função *updateStatus()* da Figura 33:

Figura 33-Bloco de código 13

```
fetch('/status')
  .then(response => response.json())
  .then(data => {
    updateDeviceUI(1, data.s1);
    updateDeviceUI(2, data.s2);
  });
```

Fonte: Autor, 2025.

Além disso, o JavaScript é utilizado para enviar comandos de controle, como ligar ou desligar um dispositivo visto na Figura 34:

Figura 34- Bloco de código 14

```
fetch('/toggle?servo=' + servoNum);
```

Fonte: Autor, 2025.

Essa abordagem assíncrona permite que o painel permaneça responsivo, mesmo sob atualizações frequentes, refletindo em tempo real o comportamento da rede IoT.

### c) **Chart.js (Biblioteca do JavaScript) – Visualização Gráfica das Métricas**

O *framework Chart.js* é utilizado para a visualização gráfica do histórico de métricas, em especial o tempo de resposta dos nós sensores. Trata-se de uma biblioteca JavaScript leve e amplamente utilizada para a criação de gráficos interativos em aplicações web.

A inicialização do gráfico ocorre por meio da função *initChart()* na Figura 35:

Figura 35- Bloco de código 15

```
latencyChart = new Chart(ctx, {
  type: 'line',
  data: { labels: [], datasets: [...] }
});
```

Fonte: Autor, 2025.

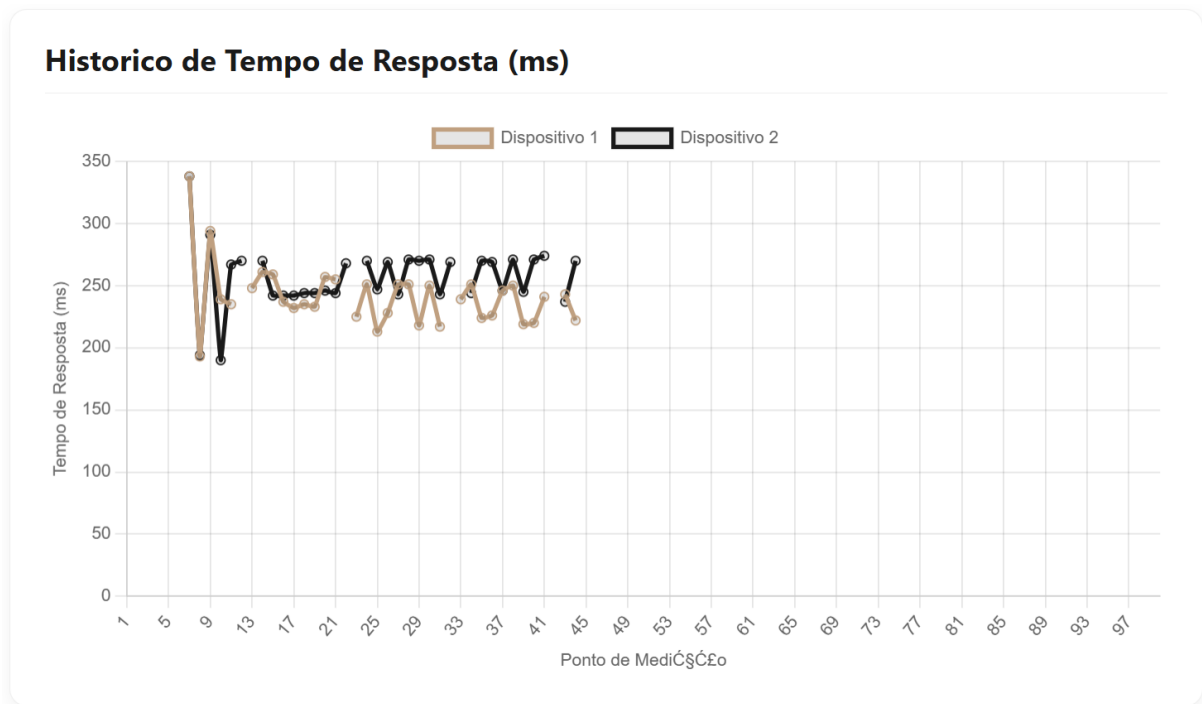
Os dados exibidos no gráfico são atualizados dinamicamente com base no histórico recebido do gateway na Figura 36:

Figura 36-Bloco de código 16

```
latencyChart.data.datasets[0].data = commandHistory1.map(p => p.latency);  
latencyChart.update();
```

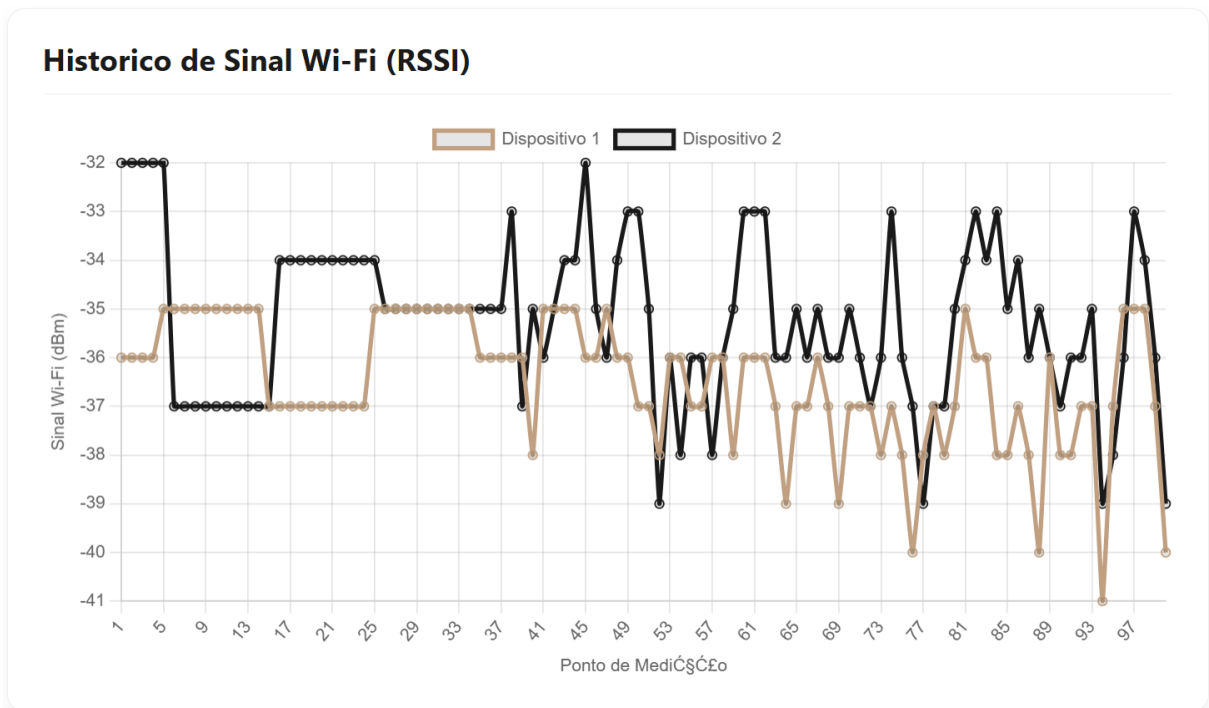
Fonte: Autor, 2025.

Figura 37 - Gráfico da interface do Histórico do Tempo de Resposta (ms)



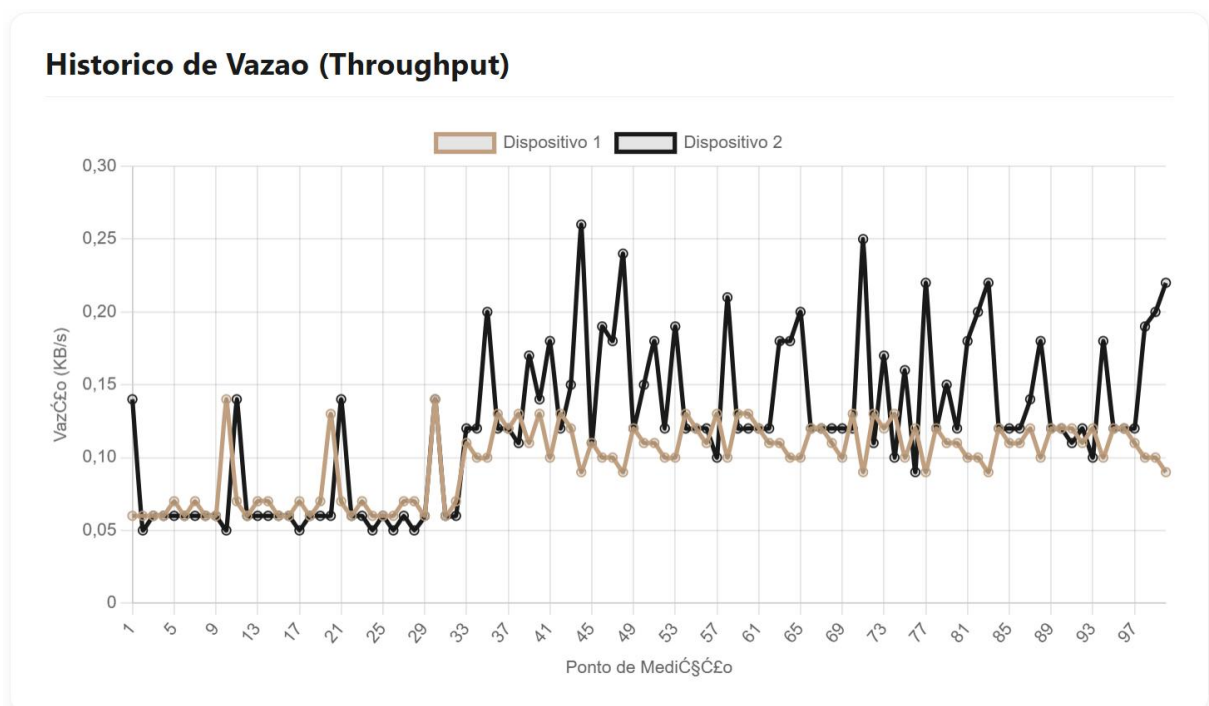
Fonte: Autor, 2025.

Figura 38 - Gráfico da interface do Histórico do RSSI (dBm)



Fonte: Autor, 2025.

Figura 39 - Gráfico da interface do Histórico de Vazão (KB/s)



Fonte: Autor, 2025.

Essa visualização está limitada na interface para 100 pontos de medição. No entanto, no arquivo CSV é possível estudar os valores médios de todos os dados coletados nos próprios pontos de medição. Além disso, os gráficos permitem observar tendências, variações de latência e instabilidades na comunicação, oferecendo uma ferramenta intuitiva para análise do impacto do congestionamento espectral e da arquitetura *cross-band*.

### 5.3 Cálculo e Interpretação das Métricas Avaliadas no Painel de Controle

O Painel de Controle do projeto foi projetado para fornecer métricas quantitativas que permitam avaliar o impacto do congestionamento espectral e a eficácia da separação entre as bandas de acesso e *backhaul*. As métricas apresentadas refletem diretamente o desempenho da comunicação entre o *gateway* e os nós sensores, sendo calculadas a partir de dados coletados em tempo real pelo *firmware*.

Além disso, a interface fornece também a opção de baixar todos os dados da análise em um pacote .CSV, Figura 40, que pode ser utilizado para fazer uma análise minuciosa dos dados coletados, e que inclusive serão utilizados na avaliação das métricas desse trabalho.

Figura 40 - Botão para Download de dados coletados



Baixar Dados CSV

Fonte: Interface (Próprio autor).

#### 5.3.1 Último Tempo de Resposta

O último tempo de resposta representa a latência mais recente observada na comunicação entre o gateway e um nó sensor. Essa métrica corresponde ao tempo decorrido entre o envio de uma requisição HTTP de controle pelo gateway e o recebimento da resposta do nó sensor.

Matematicamente, o último tempo de resposta é dado pela Equação 1:

$$T_{resp}^{últ} = t_{receb} - t_{envio} \quad (1)$$

Em que  $t_{receb}$  é o instante em que o gateway envia a requisição HTTP e  $t_{envio}$  é o instante em que a resposta do sensor é recebida.

No código, essa métrica é obtida utilizando a função *millis()* vista na Figura 41:

Figura 41- Bloco de código 17

```

unsigned long startTime = millis();
http.GET();
long latency = millis() - startTime;

```

Fonte: Autor, 2025.

Essa medida reflete diretamente o impacto da contenção do meio, retransmissões e atrasos introduzidos pela pilha de rede.

### 5.3.2 Tempo de Resposta Médio

O tempo de resposta médio fornece uma visão mais estável do desempenho da comunicação, reduzindo o impacto de variações instantâneas (*jitter*). Ele é calculado como a média aritmética dos tempos de resposta válidos armazenados no histórico do dispositivo.

Matematicamente, o tempo de resposta médio é definido pela Equação 2:

$$\bar{T}_{resp} = \sum_{i=1}^N T_{resp}(i) \quad (2)$$

Em que  $N$  é o número de amostras válidas no histórico e  $T_{resp}(i)$  é o tempo de resposta da  $i$ -ésima requisição.

No código JavaScript da interface, esse cálculo é realizado pela função da Figura 42:

Figura 42-Bloco de código 18

```

function calculateAverage(history) {
  const commandHistory = history.filter(p => p.latency >= 0);
  const sum = commandHistory.reduce((acc, p) => acc + p.latency, 0);
  return sum / commandHistory.length;
}

```

Fonte: Autor, 2025.

### 5.3.3 Sinal Wi-Fi (RSSI)

O RSSI (Received Signal Strength Indicator) representa a potência do sinal recebido pelo nó sensor, expressa em decibéis-miliwatt (dBm). Essa métrica é fornecida diretamente pela pilha Wi-Fi do microcontrolador e indica a qualidade do enlace físico.

O RSSI é obtido pela Equação 3:

$$RSSI = P_r(dBm) \quad (3)$$

Onde  $P_r$  é a potência do sinal recebido no receptor.

No *firmware* do sensor, o valor é coletado por meio da função da Figura 43:

Figura 43-Bloco de código 19

```
long rssi = WiFi.RSSI();
```

Fonte: Autor, 2025.

Valores mais próximos de 0 dBm indicam sinal mais forte, enquanto valores mais negativos indicam degradação do enlace, maior suscetibilidade a erros e possíveis retransmissões.

#### 5.3.4 Perda de Pacotes (*Packet Loss*)

A perda de pacotes representa a proporção de mensagens que não foram recebidas corretamente pelo *gateway* em relação ao total de mensagens enviadas pelos sensores. Essa métrica é inferida indiretamente por meio de um contador de sequência incremental mantido no nó sensor.

Cada resposta do *endpoint* /status inclui um número de sequência  $S_n$ . A perda de pacotes é estimada quando ocorre descontinuidade na sequência esperada.

Matematicamente, a taxa de perda de pacotes é definida pela Equação 4:

$$Packet\ Loss\ (\%) = \frac{N_{esperados} - N_{recebidos}}{N_{esperados}} * 100 \quad (4)$$

Onde  $N_{esperados}$  é o número total de pacotes que deveriam ter sido recebidos e  $N_{recebidos}$  é o número efetivamente recebido pelo *gateway*.

No *firmware* do sensor, o contador é implementado como visto na Figura 44.

Figura 44-Bloco de código 20

```
unsigned long sequence_number = 0;
sequence_number++;
```

Fonte: Autor, 2025.

Essa abordagem permite estimar a confiabilidade do enlace sem a necessidade de mecanismos adicionais de confirmação na camada de aplicação.

### 5.3.5 Vazão (Throughput)

A vazão indica a quantidade de dados úteis transmitidos com sucesso por unidade de tempo, refletindo a capacidade efetiva da comunicação entre o gateway e o nó sensor.

Matematicamente, a vazão é definida na Equação 5:

$$\textit{Throughput} = \frac{B_{recebidos}}{\Delta t} \quad (5)$$

Onde  $B_{recebidos}$  é o total de dados recebidos em *bytes*  $\Delta t$  é o intervalo de tempo considerado.

No contexto deste trabalho, a vazão é estimada a partir do tamanho médio das respostas HTTP e da frequência de atualização do painel. O valor é apresentado em *kilobytes* por segundo (KB/s), fornecendo uma indicação prática da capacidade de transporte da rede sob diferentes condições de carga.

## 5.4 Cenários de Teste

Com o objetivo de avaliar o impacto do congestionamento espectral na banda de 2.4 GHz e a eficácia da arquitetura *cross-band* proposta, foram definidos diferentes cenários de teste controlados, variando a topologia da rede e o papel do *gateway*. Esses cenários permitem isolar os efeitos da interferência, da contenção do meio e da separação entre tráfego de acesso e tráfego de *backhaul*.

Os cenários foram concebidos de forma incremental, partindo de uma configuração simplificada até a arquitetura final proposta neste trabalho.

### 5.4.1 Cenário Experimental 1 (*Baseline*)

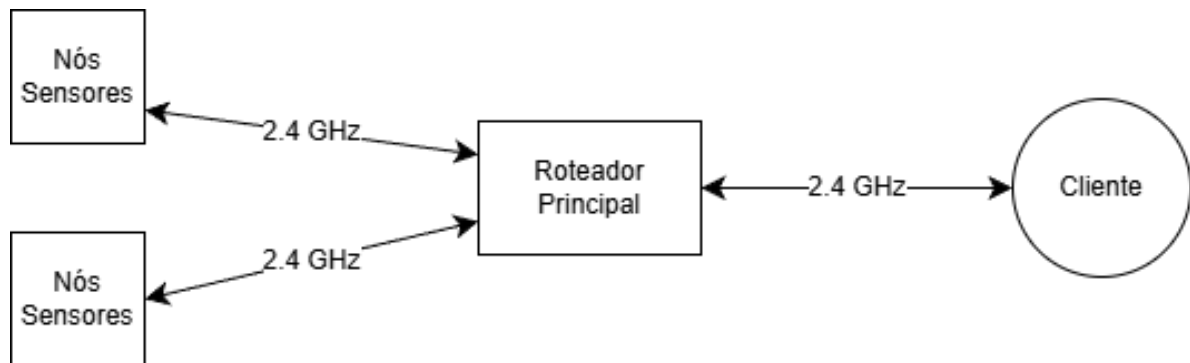
No primeiro cenário de teste, os nós sensores comunicaram-se diretamente com a infraestrutura de rede utilizando exclusivamente a banda de 2.4 GHz, sem a presença de um *gateway* dedicado. Nessa configuração, os dispositivos IoT podem se conectar diretamente ao ponto de acesso principal, compartilhando o mesmo canal de comunicação utilizado para o tráfego de saída da rede.

Esse cenário tem como objetivo simular um ambiente de rede congestionado, típico de aplicações reais, onde múltiplos dispositivos Wi-Fi, sensores IoT e outros equipamentos coexistem na banda ISM de 2.4 GHz. Nesse contexto, o tráfego de sensoriamento e o tráfego de agregação competem pelos mesmos recursos espectrais, aumentando a probabilidade de colisões, retransmissões e atrasos.

Do ponto de vista experimental, esse cenário é utilizado como linha de base (*baseline*), permitindo quantificar métricas como latência, perda de pacotes, vazão e estabilidade em uma situação desfavorável. Os resultados obtidos servem como referência para comparação com os cenários que utilizam mecanismos de separação espectral.

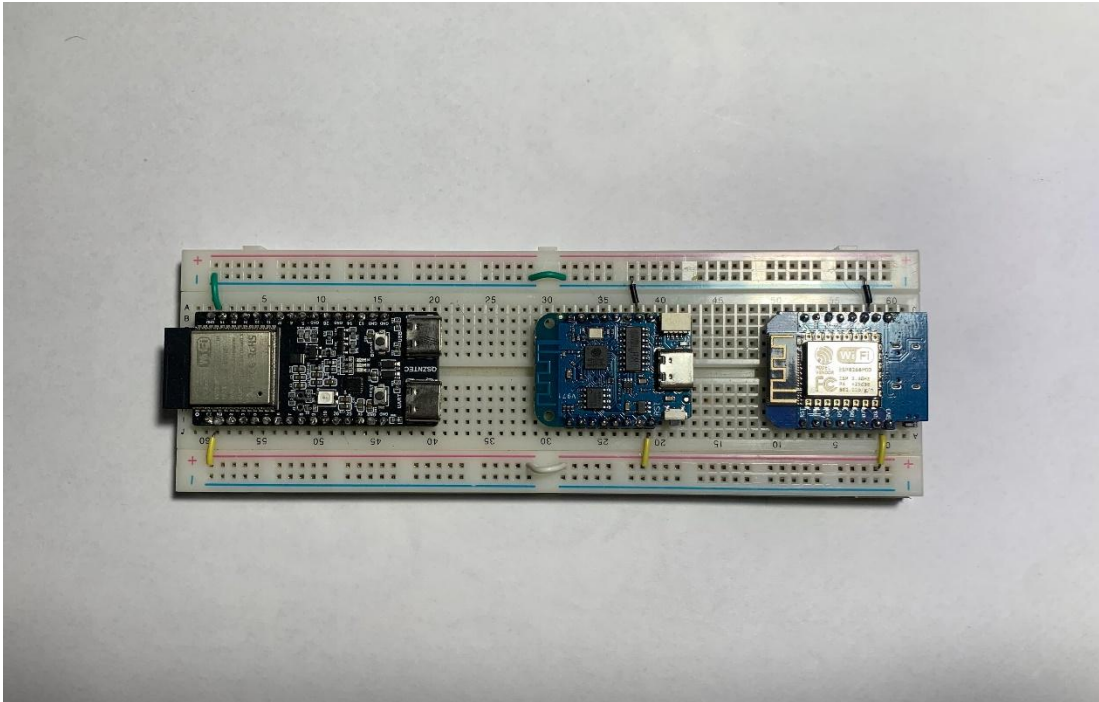
Sendo assim, a Figura 45 demonstra visualmente qual o fluxo que deve ser seguido, sabendo que todos os dispositivos estão conectados na rede de 2.4 GHz, passando apenas pelo roteador principal, recebendo os dados dos sensores/atuadores e repassando para o cliente via interface, assim como o inverso, enviando comandos dos clientes para os nós sensores/atuadores.

Figura 45 - Diagrama em blocos do Cenário 1



Fonte: Autor, 2025.

Figura 46 - Montagem do protótipo sem *Gateway* na *protoboard*



Fonte: Autor, 2025.

Dessa forma, coletou-se os seguintes dados:

Figura 47 - Dados coletados via interface do Cenário *Baseline*

Dispositivo 1		Dispositivo 2	
<b>DESLIGAR</b>		<b>DESLIGAR</b>	
Status:	<b>ONLINE</b>	Status:	<b>ONLINE</b>
Ultimo T. de Resposta:	<b>212 ms</b>	Ultimo T. de Resposta:	<b>212 ms</b>
Sinal Wi-Fi (RSSI):	<b>-56 dBm</b>	Sinal Wi-Fi (RSSI):	<b>-53 dBm</b>
Perda de Pacotes:	<b>6 %</b>	Perda de Pacotes:	<b>7 %</b>

Fonte: Autor, 2025.

Em média, obteve-se os seguintes dados das métricas em destaque para os Dispositivos 1 e 2 exportados do arquivo CSV pela própria plataforma:

Tabela 4-Dados do Cenário de Baseline

<b>Dados médios da <i>Baseline</i> para o Dispositivo 1</b>	
Latência (ms)	226,4
RSSI (dBm)	-56,3
<i>Packet Loss</i> (%)	6%
Vazão (KB/s)	0,03
<b>Dados médios da <i>Baseline</i> para o Dispositivo 2</b>	
Latência (ms)	232,8
RSSI (dBm)	-53
<i>Packet Loss</i> (%)	7%
Vazão (KB/s)	0,06

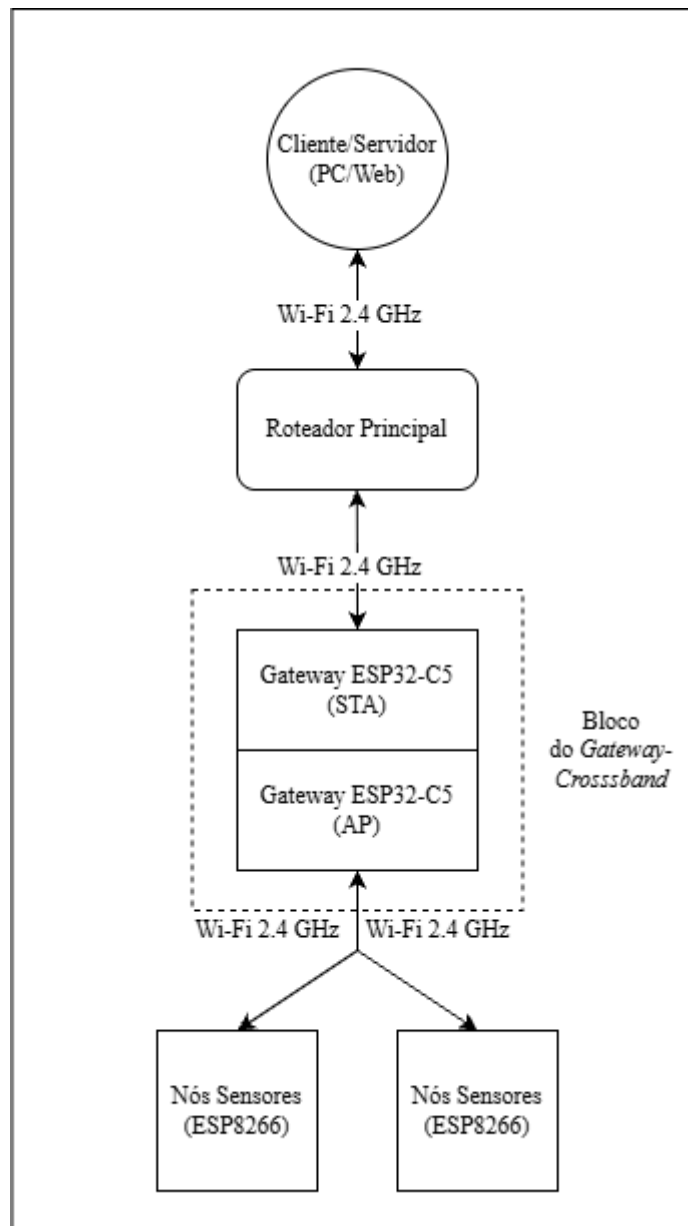
Fonte: Autor, 2025.

#### 5.4.2 Cenário Experimental 2: *gateway* único em 2.4 GHz

No segundo cenário de teste, buscou-se introduzir um *gateway* intermediário, implementado com o microcontrolador ESP32-C5, atuando como elemento de agregação dos dados dos sensores. A intenção inicial era que o mesmo dispositivo operasse simultaneamente como:

- **Ponto de Acesso (AP)** para os nós sensores em 2.4 GHz;
- **Estação (STA)** conectada à rede principal, também em 2.4 GHz.

Figura 48 - Diagrama de Blocos do *Gateway* em 2.4 GHz baseado no ESP32-C5



Fonte: Autor, 2025.

Essa configuração permitiria avaliar o impacto da introdução de um *gateway* lógico, mesmo sem a separação entre bandas, funcionando como um passo intermediário antes da arquitetura *cross-band* completa.

Entretanto, durante a implementação prática, verificou-se que essa abordagem não é funcional do ponto de vista de *hardware*. O ESP32-C5 possui apenas um rádio físico, o que impede a operação simultânea e eficiente como AP e STA independentes na mesma banda, especialmente sob carga de tráfego contínua.

A Figura 49, que ilustra O Bloco de código 21 demonstra a implementação no código fonte do Anexo 3. No *loop* a primeira configuração é a criação do ponto de acesso, e isso faz com que o rádio foque em ser AP. No entanto, a próxima configuração já é a conexão à rede principal, gerando instabilidade de conexão por conta da ausência de um rádio para cada configuração.

Figura 49-Bloco de código 21

```
// 1. Define o modo de operação para AP + STA
WiFi.mode(WIFI_AP_STA);

// 2. Configura e inicia o Ponto de Acesso (AP) em 2.4GHz para os sensores
Serial.print("Criando Ponto de Acesso: ");
Serial.println(AP_SSID);
WiFi.softAP(AP_SSID);
Serial.print("IP do AP (para os Slaves se conectarem): ");
Serial.println(WiFi.softAPIP());

// 3. Inicia a conexão à rede principal (STA) em 5GHz
Serial.print("Conectando a ");
Serial.println(STA_SSID);
WiFi.begin(STA_SSID, STA_PASS);
```

Fonte: Autor, 2025.

Essa limitação resulta em comportamento instável da rede, incluindo falhas de associação, interrupções na comunicação e degradação severa do desempenho. Dessa forma, esse cenário foi considerado inviável para operação contínua, sendo descartado como configuração experimental válida.

Do ponto de vista metodológico, a documentação desse cenário é relevante, pois evidencia uma restrição prática de *hardware* que justifica a necessidade de uma arquitetura mais elaborada, com separação clara entre as funções de acesso e *backhaul*.

### 5.4.3 Cenário Experimental 3: *gateway* utilizando uma ponte em 2.4 GHz

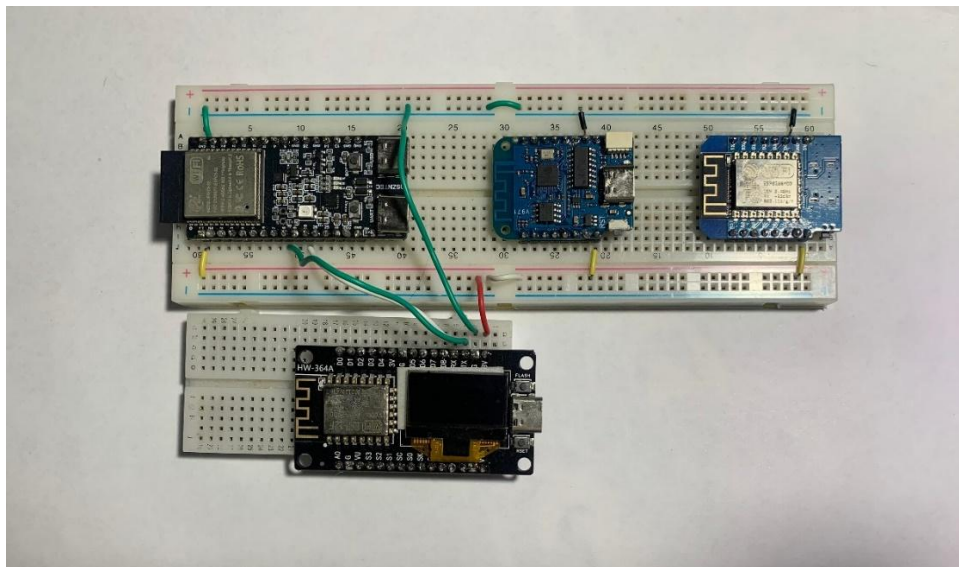
No terceiro cenário experimental, é introduzida uma adaptação arquitetural necessária para viabilizar o conceito de *gateway cross-band* utilizando os microcontroladores disponíveis. Embora o ESP32-C5 ofereça suporte ao padrão Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), ele possui apenas um único rádio, o que impõe a limitação de não poder operar simultaneamente como *Access Point (AP)* e *Station (STA)* em bandas distintas de forma contínua e estável.

Para contornar essa restrição, conforme a Figura 26, foi adotada uma arquitetura assistida, na qual um microcontrolador ESP8266 atua como elemento auxiliar do *gateway*. Nesse arranjo, o ESP8266 é responsável por operar exclusivamente como ponto de acesso (AP) na banda de 2,4 GHz, conectando-se diretamente aos nós sensores IoT. O ESP32-C5, por sua vez, opera apenas no modo STA, conectando-se ao roteador principal também na banda de 2,4 GHz, além de hospedar a interface de monitoramento e controle do sistema.

A comunicação entre o ESP8266 (AP) e o ESP32-C5 (*gateway* lógico) é realizada por meio de uma interface serial UART (TX/RX), permitindo que os dados coletados dos sensores sejam encaminhados internamente para o *gateway* sem a necessidade de competir novamente pelo meio sem fio. Dessa forma, separa-se logicamente o tráfego de sensoriamento local do tráfego de processamento e encaminhamento, reduzindo parcialmente a contenção no espectro sem fio.

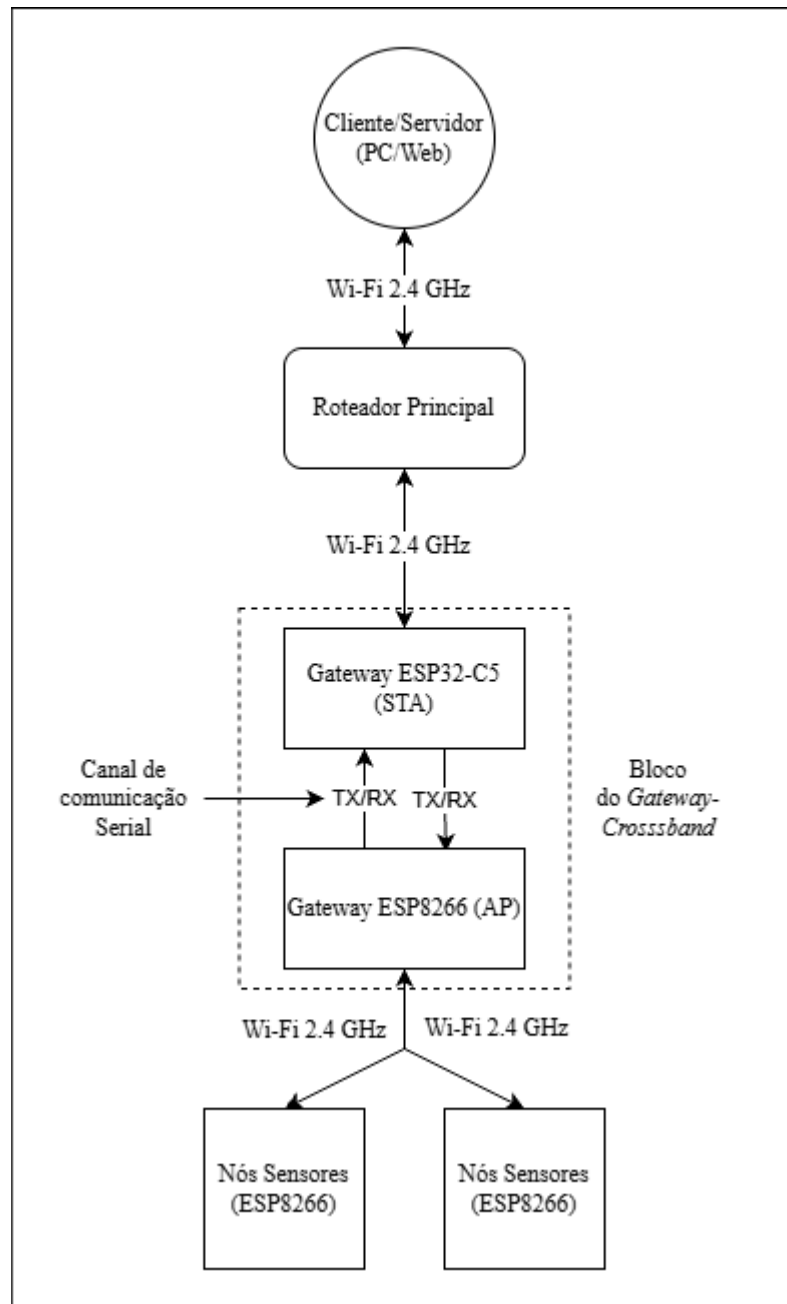
Este cenário representa uma forma intermediária de balanceamento de carga, onde o congestionamento no enlace Wi-Fi ainda ocorre na banda de 2,4 GHz, porém com menor impacto sobre o processamento do *gateway*, uma vez que a agregação e a lógica de decisão passam a ser centralizadas no ESP32-C5.

Figura 50 - Montagem do protótipo com microcontrolador auxiliar na protoboard



Fonte: Autor, 2025.

Figura 51 - Diagrama de Blocos do *Gateway Cross-band* baseado no ESP32-C5 associado ao ESP8266 via comunicação serial (2.4 - 2.4 GHz)



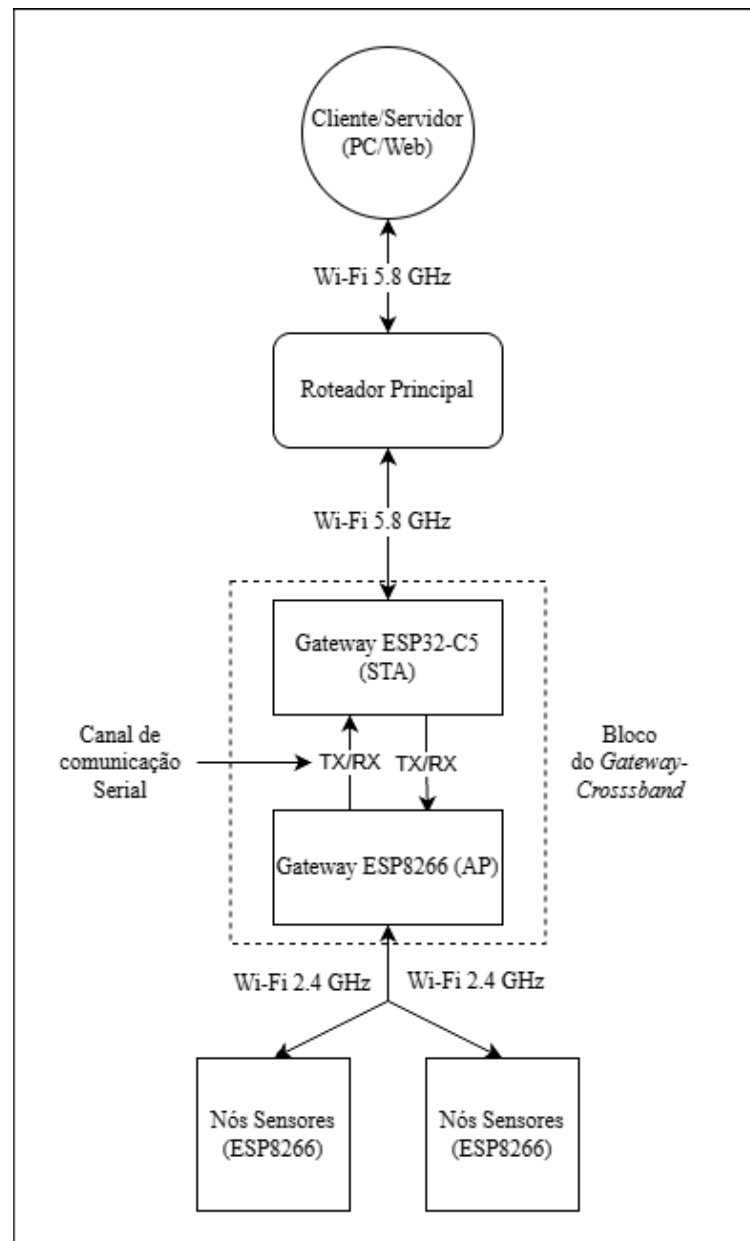
Fonte: Autor, 2025.

#### 5.4.4 Cenário Experimental 4: *gateway* utilizando uma ponte em 2.4 GHz – 5.8 GHz (Cenário proposto)

O quarto cenário experimental corresponde à configuração final proposta neste trabalho, na qual se explora plenamente o conceito de *cross-band communication* como técnica de balanceamento de carga estático e segregação espectral.

A arquitetura mantém o mesmo arranjo físico do Cenário 3, utilizando um ESP8266 como AP dedicado na banda de 2.4 GHz para os nós sensores IoT. Entretanto, a principal diferença está no enlace de saída (*backhaul*) do *gateway*. Neste cenário, o ESP32-C5 opera como STA conectado ao roteador principal na banda de 5.8 GHz, utilizando recursos do padrão Wi-Fi 6, visto na Figura 52.

Figura 52 - Diagrama de Blocos do *Gateway Cross-band* baseado no ESP32-C5 associado ao ESP8266 via comunicação serial (2.4 - 5.8 GHz)



Fonte: Autor, 2025.

Essa separação explícita das bandas permite que:

- O tráfego de sensoriamento, caracterizado por pacotes pequenos, frequentes e sensíveis à latência, permaneça na banda de 2.4 GHz, que oferece maior alcance e melhor penetração em obstáculos;
- O tráfego de agregação, visualização e controle, mais volumoso e menos sensível a perdas pontuais, seja encaminhado por um canal de maior capacidade, menor interferência e menor ocupação espectral.

Do ponto de vista conceitual, este cenário implementa uma forma clara de *offloading* de tráfego, onde a carga gerada pelos sensores é retirada do espectro congestionado e transferida para uma banda superior, reduzindo colisões, atrasos e perdas de pacotes. Essa abordagem está diretamente alinhada aos princípios de *Edge Computing* e *Load Balancing*, nos quais decisões locais são tomadas para otimizar o uso global dos recursos de rede.

#### 5.4.4.1 Hardware integrado ao Gateway: Esp-12E Esp8266.

O NodeMCU V3 com display OLED integrado, Figura 53, é uma placa de desenvolvimento de alto custo-benefício baseada no módulo ESP-12E, que combina a conectividade Wi-Fi do chip ESP8266 com a praticidade de uma interface visual nativa de 0,96 polegadas. Operando na frequência de 2.4 GHz sob os padrões 802.11 b/g/n, o dispositivo oferece suporte a criptografias WPA e WPA2, permitindo comunicações seguras tanto com roteadores quanto em modo ponto de acesso para interação direta com smartphones. Sua arquitetura de 32 bits com *clock* de 80 MHz é complementada por 4 MB de memória *flash*, 80 KB de RAM e 17 pinos de propósito geral (GPIOs), Figura 54, facilitando a prototipagem de projetos de Internet das Coisas (IoT) de forma rápida e eficiente. Por ser uma plataforma de código aberto que suporta linguagens como Lua e o ecossistema Arduino, este kit simplifica a criação de sistemas conectados que exigem monitoramento de dados em tempo real diretamente no *hardware*, mantendo um perfil compacto e alta eficiência energética (Nodemcu, 2024).



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos com a implementação do *gateway* IoT *cross-band* proposto, além de uma análise dos dados observados com base na literatura técnica discutida nos capítulos anteriores. A avaliação tem como foco a comparação entre o cenário de controle, que opera exclusivamente na banda de 2.4 GHz, e os cenários experimentais que utilizam a separação de bandas como estratégia para reduzir interferências e melhorar a distribuição da carga na rede.

### 6.1 Apresentação dos resultados.

Nesse sentido, antes de entender os dados coletados, é necessário entender o cenário em que as conexões serão feitas. Dessa forma, as simulações foram construídas em um espectro com 13 aparelhos distintos conectados à rede de 2.4 GHz, conforme tabela 5, fora os nós sensores e a ponte atuantes do projeto, listados a seguir:

Tabela 5- Aparelhos conectados à rede de 2.4 GHz

<b>Aparelhos Conectados à rede para análise dos cenários propostos</b>			
<b>N</b>	<b>Descrição</b>	<b>Modelo</b>	<b>Conexão</b>
1	Smartphone 1	Iphone XR	Wi-fi 2.4 GHz
2	Smartphone 2	Iphone XR	Wi-fi 2.4 GHz
3	Smartphone 3	Iphone 13 Pro	Wi-fi 2.4 GHz
4	Smartphone 4	Samgung Galaxy S20 FE	Wi-fi 2.4 GHz
5	Smartphone 5	Samgung Galaxy A54	Wi-fi 2.4 GHz
6	Tablet 1	Samgung Galaxy Tab S6 Lite	Wi-fi 2.4 GHz
7	Smart TV 1	Samsung Smart TV 43" - U8100F	Wi-fi 2.4 GHz
8	Smart TV 2	Hisense Smart Tv - 50q6qv	Wi-fi 2.4 GHz
9	Relé Wi-fi 1	Sonoff Wi-fi – Interruptor inteligente	Wi-fi 2.4 GHz
10	Relé Wi-fi 2	Sonoff Wi-fi – Interruptor inteligente	Wi-fi 2.4 GHz
11	Computador tipo Desktop	Kit Xeon E5 2680 V4	Wi-fi 2.4 GHz

12	Notebook 1	Dell G15	Wi-fi 2.4 GHz
13	Notebook 2	Samsung Book Intel Core	Wi-fi 2.4 GHz

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 5 apresenta o conjunto de equipamentos conectados simultaneamente à rede, evidenciando um cenário de alta densidade e competição pelo meio, típico de ambientes residenciais e industriais de baixo custo. Essa caracterização é fundamental para a correta interpretação das métricas de desempenho do projeto, uma vez que a interferência e a contenção no meio são diretamente influenciadas pelo número de dispositivos ativos.

### 6.1.1 Cenário 1 – Operação Exclusiva em 2.4 GHz

No cenário de controle, todos os elementos do sistema — nós sensores, *gateway* e enlace de saída — operam exclusivamente na banda de 2.4 GHz conectados ao Roteador Principal. Essa configuração simula um ambiente típico de IoT residencial ou industrial de baixo custo, caracterizado por alta densidade de dispositivos e forte competição pelo meio.

Reverendo os dados da Tabela 4:

Tabela 6- Dados do Cenário de Baseline

<b>Dados médios da <i>Baseline</i> para o Dispositivo 1</b>	
Latência (ms)	226,4
RSSI (dBm)	-56,3
<i>Packet Loss</i> (%)	6%
Vazão (KB/s)	0,03
<b>Dados médios da <i>Baseline</i> para o Dispositivo 2</b>	
Latência (ms)	232,8
RSSI (dBm)	-53
<i>Packet Loss</i> (%)	7%
Vazão (KB/s)	0,06

Fonte: CSV extraído da interface (Próprio autor).

Os resultados observados indicam:

- Observa-se que a latência média foi elevada para ambos os dispositivos, atingindo 226,4 ms no Dispositivo 1 e 232,8 ms no Dispositivo 2. Esses valores indicam um atraso significativo na entrega das mensagens, compatível com ambientes onde múltiplos dispositivos competem pelo acesso ao meio. A proximidade entre os valores de latência dos dois dispositivos sugere que o gargalo não está relacionado à qualidade individual do enlace, mas sim à saturação do canal compartilhado.
- Em relação à intensidade do sinal (RSSI), ambos os dispositivos apresentaram níveis adequados de recepção, com valores de  $-56,3$  dBm e  $-53$  dBm, respectivamente. Esses valores indicam boa qualidade de sinal físico, descartando a hipótese de atenuação excessiva ou problemas de cobertura como causa principal da degradação do desempenho. Assim, reforça-se que as limitações observadas decorrem predominantemente da interferência e da contenção no meio, e não de falhas no enlace rádio.
- A taxa de perda de pacotes apresentou valores de 6% para o Dispositivo 1 e 7% para o Dispositivo 2, confirmando um impacto significativo da interferência mútua na confiabilidade da comunicação. Em aplicações de sensoriamento contínuo, mesmo perdas nessa ordem podem comprometer a integridade dos dados, especialmente quando não há mecanismos robustos de retransmissão ou tolerância a falhas na camada de aplicação.
- Quanto à vazão, os valores obtidos foram relativamente baixos, com 0,03 KB/s e 0,06 KB/s para os Dispositivos 1 e 2, respectivamente. Embora o volume de dados gerado por sensores IoT seja reduzido, essa limitação evidencia que o canal se encontra subutilizado de forma ineficiente, uma vez que o tempo é majoritariamente consumido por contenção, *backoff* e retransmissões, e não pela transmissão efetiva de dados úteis.

Os resultados observados neste cenário corroboram diretamente as análises apresentadas por Natarajan, Zand e Nabi (2016), que demonstram que redes de sensores de baixa potência sofrem degradação severa quando coexistem com tráfego Wi-Fi em canais sobrepostos na banda de 2.4 GHz. Mesmo em condições de bom RSSI, a assimetria de potência e largura de banda entre os dispositivos resulta em perdas de pacotes e aumento da latência.

Dessa forma, o cenário de baseline confirma experimentalmente que a operação exclusiva em 2.4 GHz constitui um ponto crítico de congestionamento, justificando a necessidade de arquiteturas alternativas, como a proposta de separação de bandas (*cross-band*), avaliada nos cenários experimentais subsequentes.

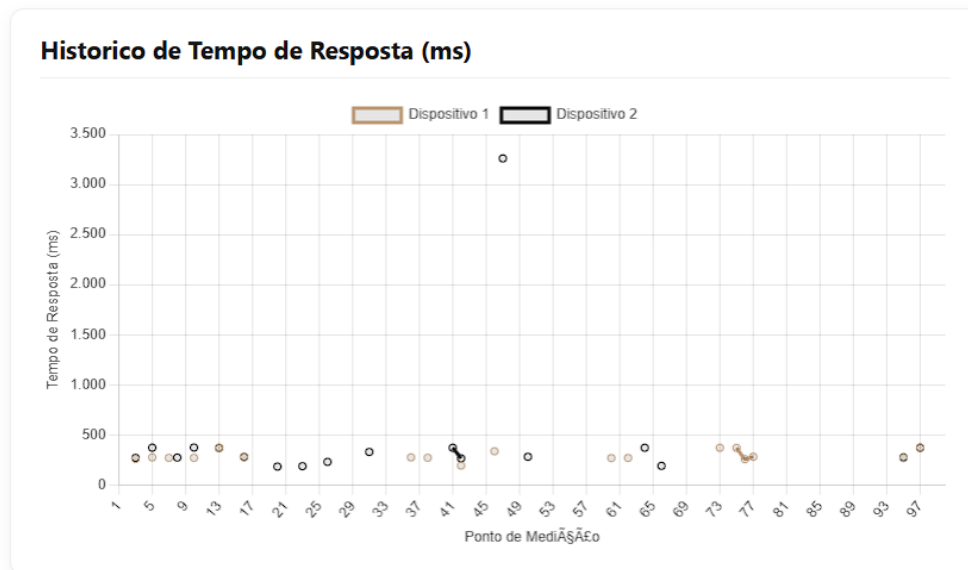
### 6.1.2 Cenário Experimental – Arquitetura *Cross-Band*

Para testar e comparar a arquitetura *Cross-band* do trabalho, aplicou-se os dois cenários possíveis vistos anteriormente para que os dados façam sentido. Sendo assim, apenas os cenários *Cross-band* de 2.4 - 2.4 e 2.4 - 5.8 tiveram dados comparados.

#### a) Gateway *Cross-band* 2.4 – 2.4 GHz

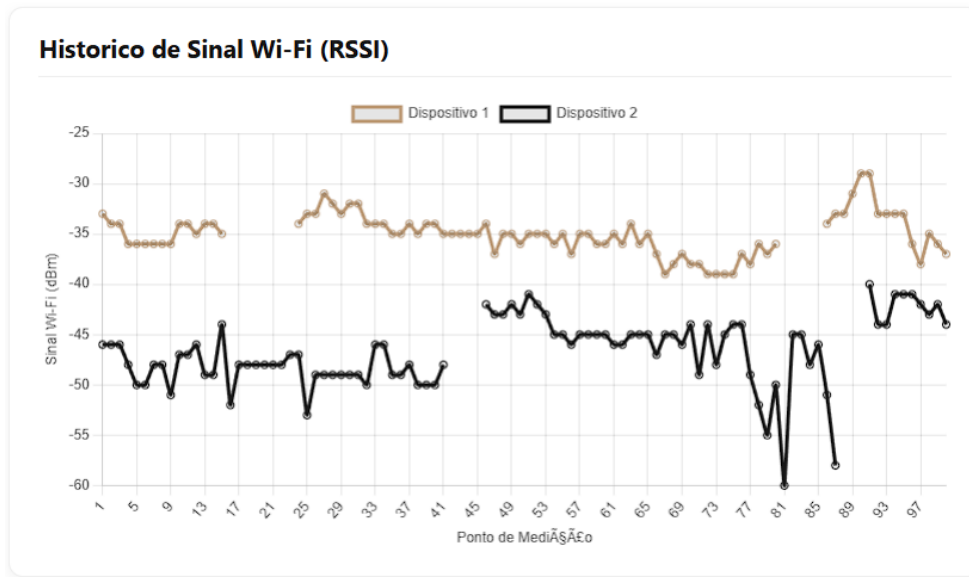
Sendo assim, seguindo a arquitetura da Figura 28 e considerando o cenário de contenção apresentado da Tabela 5, os dados retirados diretamente da interface projetada apresentam os valores médios obtidos no cenário experimental em que um *gateway* intermediário é introduzido na comunicação, porém mantendo tanto o enlace de acesso dos sensores quanto o enlace de *backhaul* operando na banda de 2.4 GHz. Os dados que encontraremos estão sendo vistos em tempo real por meio da interface nas Figuras 55, Figura 56, Figura 57 e Figura 58. Embora essa configuração represente uma separação lógica das funções de agregação e encaminhamento, ela não promove a separação espectral do tráfego.

Figura 55 - Histórico de Tempo de Resposta do Cenário de Arquitetura *Cross-band* 2.4 – 2.4 GHz



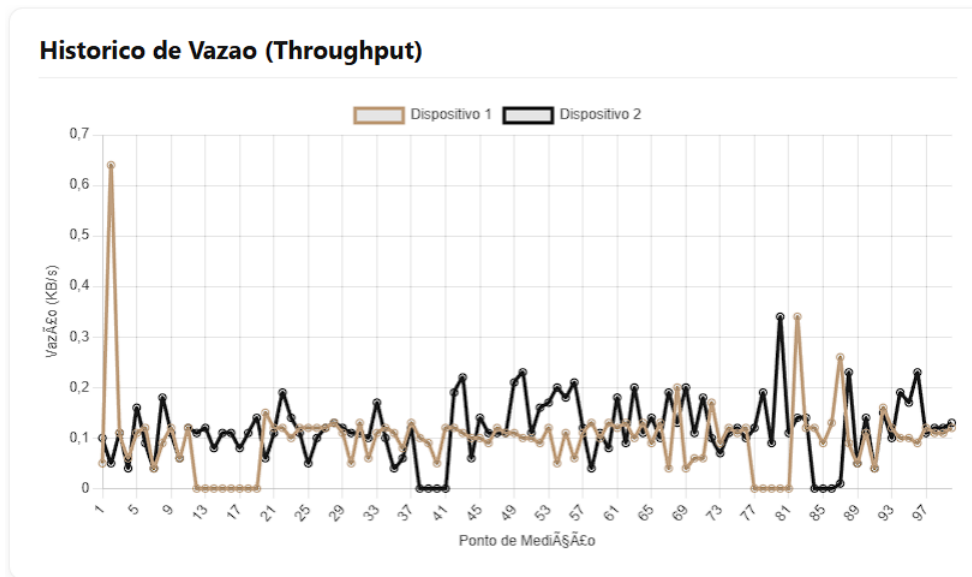
Fonte: Interface (Próprio Autor).

Figura 56 - Histórico de RSSI do Cenário de Arquitetura *Cross-band* 2.4 – 2.4 GHz



Fonte: Interface (Próprio Autor).

Figura 57 - Histórico de Vazão do Cenário de Arquitetura *Cross-band* 2.4 – 2.4 GHz



Fonte: Interface (Próprio Autor).

Figura 58 - Cartões dos dispositivos 1 e 2 para do Cenário de Arquitetura *Cross-band* 2.4 – 2.4 GHz



Fonte: Interface (Próprio Autor).

Tabela 7- Dados do Cenário de Arquitetura *Cross-band* 2.4 – 2.4 GHz

Dados médios para o Dispositivo 1	
Latência (ms)	299,231
RSSI (dBm)	-35,705
<i>Packet Loss</i> (%)	6,00
Vazão (KB/s)	0,1057
Dados médios para o Dispositivo 2	
Latência (ms)	313,8
RSSI (dBm)	-45,53
<i>Packet Loss</i> (%)	9,00
Vazão (KB/s)	0,1294

Fonte: CSV extraído da interface (Próprio autor).

Os resultados observados indicam:

- Os resultados mostram que a latência média aumentou para 299,2 ms no Dispositivo 1 e atingiu 313,8 ms no Dispositivo 2, valores significativamente superiores aos observados no cenário sem *gateway*. Esse comportamento pode ser atribuído a três fatores principais:
  - (ii) a contenção no meio físico da banda de 2.4 GHz;
  - (iii) o acúmulo de filas no *gateway* intermediário;
  - (iv) o atraso introduzido pela comunicação serial síncrona entre os microcontroladores.
- A elevada latência observada no Dispositivo 2 evidencia ainda a sensibilidade do sistema a variações na carga e na ordem de processamento dos pacotes, uma característica comum em arquiteturas que utilizam comunicação UART sem mecanismos avançados de paralelismo ou priorização de tráfego.
- Em relação à intensidade do sinal (RSSI), os valores registrados foram  $-35,7$  dBm e  $-45,5$  dBm para os Dispositivos 1 e 2, respectivamente, indicando excelente qualidade do enlace rádio entre os sensores e o ponto de acesso. Esse resultado descarta limitações de cobertura ou atenuação como causa da degradação observada, reforçando que os problemas estão concentrados na camada de acesso ao meio e no processamento intermediário.
- A taxa de perda de pacotes manteve-se elevada, com 6% no Dispositivo 1 e 9% no Dispositivo 2, valores comparáveis aos do cenário de baseline. Esse resultado indica que, apesar da introdução do *gateway*, não houve redução significativa das colisões no meio, uma vez que o tráfego de acesso e o tráfego de *backhaul* continuam compartilhando a mesma banda de frequência.
- Quanto à vazão, observou-se um aumento moderado, alcançando 0,1057 KB/s e 0,1294 KB/s. Esse ganho está associado à capacidade do *gateway* de agregar pacotes antes do encaminhamento. No entanto, tal melhoria ocorre à custa de um aumento expressivo da latência, caracterizando um *trade-off* desfavorável para aplicações que demandam previsibilidade temporal.

Os resultados deste cenário evidenciam um ponto fundamental: o *gateway*, quando não associado a uma separação efetiva de recursos espectrais, pode agravar o problema de congestionamento. Ao concentrar o tráfego de múltiplos sensores e retransmiti-lo na mesma

banda de 2.4 GHz, o *gateway* introduz filas adicionais, atrasos de processamento e novas oportunidades de colisão.

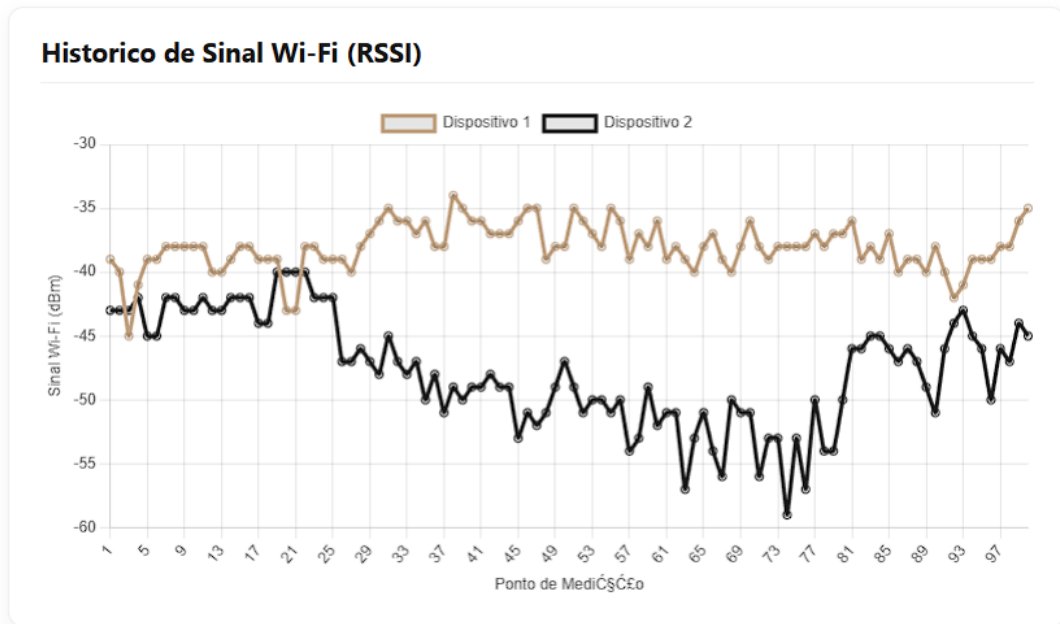
Esse comportamento está alinhado com a análise de Natarajan, Zand e Nabi (2016), que destacam que a coexistência de múltiplas transmissões heterogêneas em um espectro limitado resulta em degradação cumulativa do desempenho. Além disso, o aumento expressivo da latência nos dispositivos sugere que pequenas variações na carga ou na ordem de acesso ao meio podem causar efeitos desproporcionais em redes saturadas.

Do ponto de vista arquitetural, este cenário demonstra que a abordagem *cross-band* não deve ser interpretada apenas como a introdução de um *gateway*, mas sim como uma estratégia de balanceamento de carga baseado em separação de bandas. Quando essa separação não ocorre, os benefícios esperados não se materializam.

#### **b) Gateway Cross-band 2.4 – 5.8 GHz**

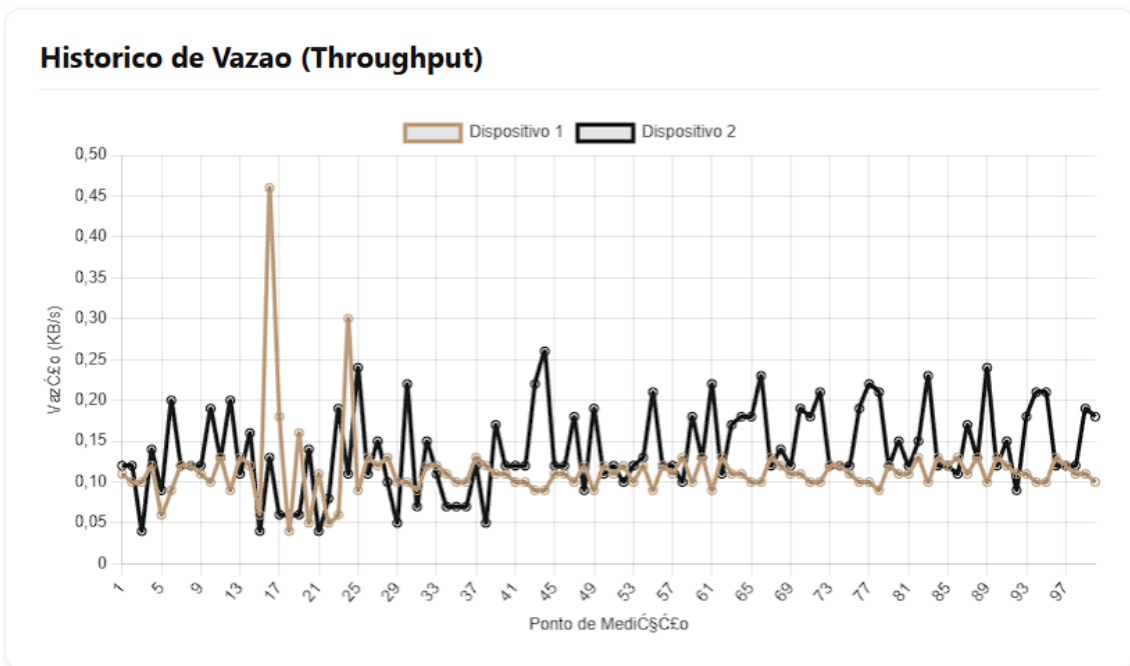
Assim como no cenário anterior, seguindo a arquitetura da Figura 29 e considerando o cenário de contenção apresentado da Tabela 5, os dados retirados diretamente da interface projetada apresentam os valores médios obtidos no cenário experimental em que um *gateway* intermediário é introduzido na comunicação, porém mantendo tanto o enlace de acesso dos sensores quanto o enlace de *backhaul* operando agora na banda de 5.8 GHz. Os dados que encontraremos estão sendo vistos em tempo real por meio da interface nas Figuras 59, Figura 60 e Figura 61. Portanto, essa configuração representa uma separação lógica das funções de agregação e encaminhamento, promovendo a separação espectral do tráfego.

Figura 59 - Histórico de RSSI do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 5.8 GHz



Fonte: Interface (Próprio Autor).

Figura 60 - Histórico de Vazão do Cenário de Arquitetura Cross-band 2.4 – 5.8 GHz



Fonte: Interface (Próprio Autor).

Figura 61 - Cartões dos dispositivos 1 e 2 para do Cenário de Arquitetura *Cross-band* 2.4 – 5.8 GHz



Fonte: Interface (Próprio Autor).

Tabela 8- Dados do Cenário de Arquitetura *Cross-band* 2.4 – 5.8 GHz

Dados médios para o Dispositivo 1	
Latência (ms)	234,4
RSSI (dBm)	-38,58
<i>Packet Loss</i> (%)	0,00
Vazão (KB/s)	0,1047
Dados médios para o Dispositivo 2	
Latência (ms)	260,5
RSSI (dBm)	-43,38
<i>Packet Loss</i> (%)	0,00
Vazão (KB/s)	0,1199

Fonte: CSV extraído da interface (Próprio autor).

Os resultados observados indicam:

- A latência média apresentou valores de 234,4 ms para o Dispositivo 1 e 260,5 ms para o Dispositivo 2, representando uma redução significativa em relação ao cenário *cross-band* 2.4–2.4 GHz e valores próximos aos observados no cenário de baseline. No

entanto, diferentemente do cenário de controle, essa latência apresenta menor variabilidade, indicando maior estabilidade temporal da comunicação.

- Em relação à intensidade do sinal (RSSI), os valores registrados foram  $-38,6$  dBm e  $-43,4$  dBm, respectivamente, caracterizando enlaces rádio de boa qualidade entre os sensores e o ponto de acesso. Assim como nos cenários anteriores, o RSSI adequado confirma que a melhoria observada não está associada a fatores físicos de cobertura, mas sim à organização do tráfego no espectro.
- O resultado mais expressivo deste cenário é a eliminação total da perda de pacotes, com *Packet Loss* igual a 0% para ambos os dispositivos. Esse dado evidencia que a separação de bandas reduz drasticamente as colisões no meio, permitindo que os pacotes de sensoriamento sejam transmitidos e encaminhados sem interferência significativa do tráfego de maior volume.
- Quanto à vazão, os valores observados foram 0,1047 KB/s para o Dispositivo 1 e 0,1199 KB/s para o Dispositivo 2, mantendo-se em patamares semelhantes aos do cenário *cross-band* 2.4–2.4 GHz. Isso indica que, para aplicações de baixo volume de dados, o principal ganho da arquitetura proposta não reside no aumento da taxa de transmissão, mas sim na confiabilidade da entrega dos dados.

Os resultados obtidos neste cenário confirmam a hipótese central deste trabalho: a separação espectral do tráfego é um mecanismo eficaz para mitigar a interferência e aumentar a confiabilidade em redes IoT densas. Ao deslocar o tráfego de backhaul para a banda de 5.8 GHz, o *gateway* deixa de competir com os sensores pelo acesso ao meio, reduzindo significativamente as colisões e a necessidade de retransmissões.

Esse comportamento está em consonância com as análises de Natarajan, Zand e Nabi (2016), que apontam a sobreposição de canais na banda de 2.4 GHz como uma das principais causas de degradação em redes de sensores. Além disso, os resultados validam o modelo de balanceamento de carga em *gateways* de borda proposto por Amrullah (2024), demonstrando que a separação de fluxos reduz a pressão sobre os recursos compartilhados.

Embora os ganhos em latência e vazão não sejam expressivos, a eliminação da perda de pacotes representa um avanço significativo para aplicações de sensoriamento IoT, nas quais a integridade e a continuidade dos dados são mais críticas do que a latência absoluta. Dessa forma, a arquitetura *cross-band* 2.4–5.8 GHz mostra-se mais adequada para cenários reais de IoT de baixo custo e alta densidade.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a viabilidade de uma arquitetura de *gateway* IoT *cross-band*, baseada em *hardware* de baixo custo, como estratégia para mitigar os efeitos do congestionamento espectral na banda ISM de 2.4 GHz, especialmente em ambientes *indoor*, onde a alta densidade de dispositivos, a presença de obstáculos físicos e a coexistência de múltiplas redes sem fio intensificam a interferência e a contenção do meio. Para isso, foi projetado, implementado e avaliado experimentalmente um protótipo capaz de coletar dados de nós sensores em 2.4 GHz e encaminhá-los por enlaces distintos, explorando diferentes configurações de banda para o tráfego de *backhaul*.

Os resultados obtidos demonstram que o objetivo proposto foi atingido, ainda que sob limitações inerentes ao ambiente experimental e às restrições do *hardware* utilizado. No cenário de controle, operando exclusivamente em 2.4 GHz, foram observadas latências elevadas e taxas de perda de pacotes significativas, mesmo em condições adequadas de intensidade de sinal. Em ambientes *indoor*, esse comportamento é particularmente crítico, uma vez que redes Wi-Fi domésticas, dispositivos Bluetooth, fornos micro-ondas e outros sistemas operam simultaneamente na mesma faixa de frequência, agravando o congestionamento e reduzindo a previsibilidade da comunicação.

A introdução de um *gateway* intermediário operando também na banda de 2.4 GHz, com comunicação serial TX/RX entre microcontroladores, mostrou que a simples agregação de tráfego não é suficiente para melhorar o desempenho da rede. Esse cenário apresentou aumento expressivo de latência e *jitter*, decorrentes do processamento adicional, da formação de filas e das limitações da comunicação serial, reforçando que, em ambientes internos, a ausência de separação espectral mantém o problema de interferência e contenção, mesmo quando se introduz uma camada adicional de processamento.

Por outro lado, no cenário em que o tráfego de *backhaul* foi deslocado para a banda de 5.8 GHz, observou-se uma melhora significativa na confiabilidade da comunicação, evidenciada pela eliminação total da perda de pacotes. Esse resultado é particularmente relevante para ambientes *indoor*, nos quais a banda de 5.8 GHz tende a ser menos congestionada e mais adequada para enlaces de transporte de dados agregados, enquanto a banda de 2.4 GHz permanece responsável pela conectividade dos sensores, beneficiando-se de seu maior alcance e melhor penetração em obstáculos.

Embora os ganhos em latência e vazão tenham sido moderados, a estabilidade da comunicação e a integridade dos dados foram substancialmente aprimoradas, características

fundamentais para aplicações de sensoriamento contínuo em ambientes internos, como monitoramento ambiental, automação predial e sistemas de supervisão industrial. Esses resultados indicam que, para esse tipo de aplicação, a confiabilidade e a previsibilidade da comunicação são mais críticas do que a maximização da taxa de transmissão.

Dessa forma, conclui-se que a arquitetura *cross-band*, quando associada à separação efetiva de bandas de frequência, constitui uma solução viável e eficiente para reduzir os impactos do congestionamento espectral em ambientes *indoor* de alta densidade, utilizando plataformas de baixo custo e fácil implementação. O protótipo desenvolvido comprova que é possível melhorar significativamente a robustez da comunicação IoT sem a necessidade de infraestrutura complexa ou onerosa.

Como trabalhos futuros, sugere-se a implementação de mecanismos de segurança mais robustos, como WPA3, a avaliação do sistema com um número maior de nós sensores em ambientes internos reais, a análise do comportamento da rede em cenários multiandares e a exploração de estratégias dinâmicas de balanceamento de carga e *offloading*. Essas extensões podem ampliar a aplicabilidade da arquitetura proposta e aprofundar a validação em cenários *indoor* cada vez mais comuns nas aplicações modernas de IoT.

## REFERÊNCIAS

- MOLISCH, Andreas F. *Wireless communications*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- STATISTA. Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2030. 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>.
- AKYILDIZ, Ian F.; SU, Weilian; SANKARASUBRAMANIAM, Yogesh; CAYIRCI, Erdal. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, Amsterdam, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002.
- AL-FUQAHA, A. et al. "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 2347-2376, 2015.
- AMRULLAH, Ata. Adaptive load balancing model on edge gateways to support IoT scalability in 5G networks. *Intellithings: Journal of AI and the IoT*, v. 1, n. 1, 2024.
- ANATEL. Regulamento sobre equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita. Brasília, DF: Agência Nacional de Telecomunicações, 2022.
- ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32-C5 Series Datasheet. 2024. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c5\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c5_datasheet_en.pdf).
- GAST, Matthew S. *802.11 wireless networks: the definitive guide*. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2013.
- HELD, Gilbert. *Data over Wireless Networks: Bluetooth, WAP, and Wireless LANs*. New York: McGraw-Hill, 2001.
- BISDIKIAN, Chatschik. An overview of the Bluetooth wireless technology. *IEEE Communications Magazine*, [S. l.], v. 39, n. 12, p. 86-94, dez. 2001.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 802.15.4-2012: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). New York: IEEE, 2012.
- RAPPAPORT, Theodore S. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2002.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 802.11ax-2021: IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High Efficiency WLAN. New York: IEEE, 2021.
- GOLDSMITH, Andrea. *Wireless communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions." *Future Generation Computer Systems*, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, 2013.

HUAWEI. HUAWEI WiFi AX2S: especificações técnicas. Shenzhen: Huawei Technologies, 2024. Disponível em: <https://consumer.huawei.com/br/routers/wifi-ax2s/specs/>. Acesso em: 21 dez. 2025.

IEEE. IEEE standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems—local and metropolitan area networks—specific requirements—part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. New York: IEEE, 2020.

ITU. Radio regulations. Geneva: International Telecommunication Union, 2016.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top Down. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2021.

CISCO. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. San Jose, CA: Cisco Systems, 2020. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.

BELLALTA, Boris. IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANs. IEEE Wireless Communications, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 38-46, fev. 2016.

RAPPAPORT, Theodore S. Wireless Communications: principles and practice. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

MEMOONA; KIM, Sung Won. Performance and simulation analysis of 802.11ax OFDMA in contention-driven scenarios. PeerJ Computer Science, v. 11, e2687, 2025. DOI: 10.7717/peerj-cs.2687.

NATARAJAN, R.; ZAND, P.; NABI, M. Analysis of Coexistence between IEEE 802.15.4, BLE and IEEE 802.11 in the 2.4 GHz ISM Band. In: IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy: IEEE, 2016. p. 1-6. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793446.

NODEMCU. NodeMCU Documentation: ESP8266 NodeMCU V3 with OLED display. [S. l.]: NodeMCU Team, 2024. Disponível em: <https://nodemcu.readthedocs.io>. Acesso em: 21 dez. 2025.

SANTOS, B. P. et al. "Internet das Coisas: da Teoria à Prática". In: Minicursos do XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Salvador: UFBA, 2016.

STALLINGS, William. Wireless communications and networks. 2. ed. Boston: Pearson Education, 2021.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. Redes de Computadores. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

WEMOS. D1 mini-Pro: overview. Xangai: Wemos, 2024. Disponível em: [https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1\\_mini\\_pro.html](https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini_pro.html). Acesso em: 21 dez. 2025.