

Trabalho de Conclusão de Curso

Análise Comparativa entre Protocolos Wi-Fi e Zigbee em Ambientes de Automação Residencial com Home Assistant

Manoel Rocha dos Santos Neto

orientado por
Prof. Dr., IC-UFAL Glauber Rodrigues Leite

Universidade Federal de Alagoas
Instituto de Computação
Maceió, Alagoas
06 de Julho de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROTOCOLOS WI-FI E ZIGBEE EM AMBIENTES DE AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL COM HOME ASSISTANT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Manoel Rocha dos Santos Neto

Orientador: Prof. Dr., IC-UFAL Glauber Rodrigues Leite

Banca Examinadora:

Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo	Prof. Dr., IC-UFAL
João Raphael Souza Martins	Prof. Dr., IC-UFAL

Maceió, Alagoas
06 de Julho de 2025

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Jorge Raimundo da Silva – CRB-4 – 1528

S237a Santos Neto, Manoel Rocha dos.
Análise Comparativa entre Protocolos Wi-Fi e Zigbee em Ambientes de Automação Residencial com Home Assistant / Manoel Rocha dos Santos Neto. – 2025.
32 f.

Orientador: Glauber Rodrigues Leite.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Ciência da Engenharia da Computação: Bacharelado) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de computação. Maceió, 2025.

Bibliografia: f. 28-30.
Apêndice: f. 31-32.

1. Automação Residencial. 2. Wi-Fi. 3. Zigbee. 4. Home Assistant. 5. Internet das Coisas. 6. Protocolos Sem Fio. 7. Domótica. I. Título.

CDU: 004.738.5

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROTOCOLOS WI-FI E ZIGBEE EM AMBIENTES DE AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL COM HOME ASSISTANT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovado em 06 Julho, 2025:

gov.br
Documento assinado digitalmente
GLAUBER RODRIGUES LEITE
Data: 17/06/2025 20:21:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Glauber Rodrigues Leite,
Prof. Dr., IC-UFAL, Orientador

gov.br
Documento assinado digitalmente
ICARO BEZERRA QUEIROZ DE ARAUJO
Data: 17/06/2025 20:26:40-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo,
Prof. Dr., IC-UFAL

gov.br
Documento assinado digitalmente
JOAO RAPHAEL SOUZA MARTINS
Data: 20/06/2025 11:00:35-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

João Raphael Souza Martins,
Prof. Dr., IC-UFAL

Dedicatória

A Deus, por me conceder força, sabedoria e serenidade ao longo de toda esta caminhada.
À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e incentivo nos momentos mais desafiadores.
E a todos que fizeram parte deste processo, oferecendo sua ajuda, compreensão e motivação.
Esta conquista também é de vocês.

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise comparativa prática entre os protocolos de comunicação sem fio Zigbee e Wi-Fi, aplicados em um ambiente de automação residencial controlado pela plataforma de código aberto *Home Assistant*. Utilizando um estande experimental com sensores, atuadores e controladores reais, foram avaliados critérios como tempo de resposta, estabilidade da conexão, consumo energético e facilidade de integração. Os resultados mostraram que o Zigbee destacou-se pela alta eficiência energética e maior estabilidade, sendo ideal para dispositivos alimentados por bateria e redes com muitos nós. Já o Wi-Fi demonstrou vantagens na largura de banda e na simplicidade de configuração inicial, sendo mais adequado para dispositivos que demandam conexão direta com a internet. A pesquisa fornece subsídios técnicos relevantes para a escolha do protocolo mais apropriado conforme o perfil da aplicação.

***Palavras-chave*: Automação Residencial, Wi-Fi, Zigbee, Home Assistant, Internet das Coisas, Protocolos Sem Fio, Domótica.**

Abstract

This work presents a practical comparative analysis between the Zigbee and Wi-Fi wireless communication protocols, applied in a home automation environment controlled by the open-source platform Home Assistant. Using an experimental setup with real sensors, actuators, and controllers, criteria such as response time, connection stability, energy consumption, and integration ease were evaluated. The results showed that Zigbee stood out for its high energy efficiency and greater stability, making it ideal for battery-powered devices and networks with many nodes. On the other hand, Wi-Fi demonstrated advantages in bandwidth and ease of initial configuration, making it more suitable for devices that require direct internet connectivity. The research provides relevant technical insights for selecting the most appropriate protocol according to the application's profile.

***Keywords*: *Smart Home*, *Wi-Fi*, *Zigbee*, *Home Assistant*, *Internet of Things*, *Wireless Communication Protocols*, *Home Automation*.**

Lista de Figuras

2.1 Componentes de um sistema de Automação Residencial 5
2.2 Topologia de Rede Wi-Fi (Estrela e mesh) 8
2.3 Tipos de dispositivos Zigbee. Fonte: ZBMICRO - SONOFF Official (2025) 12

3.1 Fotos do Estande desenvolvido para aplicação: (a)Vista Frontal - Disposição de tomadas, tomadas inteligentes e interruptores; (b) Vista Superior - Disposição das lâmpadas, sensores, atuadores e controladores. 17
3.2 Diagrama do esquema elétrico desenvolvido 18
3.3 Fluxograma do procedimento de integração e configuração 20

4.1 Gráfico de Desempenho dos grupos estudados 23

Lista de Abreviações

IoT *Internet of Things (Internet das Coisas)*

MQTT *Message Queuing Telemetry Transport*

Wi-Fi *Wireless Fidelity*

Zigbee *Protocolo de Comunicação sem Fio de Baixo Consumo*

WPA2 *Wi-Fi Protected Access II*

WPA3 *Wi-Fi Protected Access III*

OSI *Open Systems Interconnection*

CSA *Connectivity Standards Alliance*

API *Application Programming Interface*

LAN *Local Area Network*

WAN *Wide Area Network*

IP *Internet Protocol*

HTTP *Hypertext Transfer Protocol*

UDP *User Datagram Protocol*

TCP *Transmission Control Protocol*

JSON *JavaScript Object Notation*

AES *Advanced Encryption Standard*

Sumário

1 Introdução **1**

1.1 Objetivos . . . 2

1.1.1 Objetivo Geral . . . 2

1.1.2 Objetivos Específicos . . . 2

1.2 Organização do trabalho . . . 2

2 Fundamentação Teórica **3**

2.1 Automação Residencial . . . 3

2.1.1 Histórico e Evolução . . . 3

2.1.2 Componentes de um sistema de Automação Residencial . . . 4

2.1.3 Vantagens da Automação Residencial . . . 5

2.1.4 IoT e Automação Residencial . . . 6

2.2 Protocolos de Comunicação em Automação Residencial . . . 6

2.2.1 Conceitos Gerais de Protocolos de Comunicação . . . 7

2.2.2 Wi-Fi na Automação Residencial . . . 7

2.2.3 Zigbee na Automação Residencial . . . 11

2.3 Home Assistant . . . 14

2.3.1 Visão Geral da Plataforma . . . 15

2.3.2 Importância no Contexto da Comparação entre Zigbee e Wi-Fi . . . 15

2.3.3 Suporte à interoperabilidade . . . 15

2.3.4 Papel na Prototipagem e Validação . . . 16

3 Metodologia **17**

3.1 Equipamentos Utilizados . . . 18

3.2 Procedimentos . . . 19

3.3 Execução de testes funcionais . . . 20

3.3.1 Desempenho . . . 20

3.3.2 Estabilidade . . . 21

3.3.3 Consumo . . . 21

4 Resultados e Discussões **22**

4.1 Resultados da Integração dos Dispositivos 22

4.2 Comparação do Tempo de Resposta 22

4.3 Estabilidade dos Protocolos 24

4.4 Consumo de Bateria dos Dispositivos 24

4.5 Discussão Geral dos Resultados 25

5 Conclusão **26**

Bibliografia **28**

A Script de Coleta de Dados MQTT em Python **31**

Capítulo 1

Introdução

O progresso das tecnologias digitais e a expansão da Internet das Coisas (IoT), a automação residencial tem-se estabelecido como uma tendência relevante no contexto atual. Essa progressão permite que aparelhos eletrônicos domésticos funcionem de maneira integrada e inteligente, otimizando o consumo de energia e oferecendo maior conforto, segurança e praticidade aos usuários (VEIGA and PEREIRA, 2023). A crescente necessidade de soluções que sejam tanto acessíveis quanto personalizáveis tem fomentado o progresso de plataformas e protocolos direcionados à interconexão entre diversos dispositivos.

Nesse contexto, os protocolos de comunicação sem fio exercem uma função essencial na viabilização da automação residencial. Tecnologias como Wi-Fi e Zigbee sobressaem-se ao possibilitar a comunicação eficaz entre sensores, atuadores, hubs e assistentes virtuais, o que permite a elaboração de cenários automatizados. O Wi-Fi, devido à sua ampla disseminação, possibilita uma integração simples com redes residenciais preexistentes, enquanto o Zigbee se destaca pela baixa latência, reduzido consumo de energia e elevada escalabilidade (MAIA, 2022).

Além dos protocolos, sistemas de gerenciamento centralizado desempenham função fundamental na integração dos dispositivos e na coordenação das ações automatizadas. O *Home Assistant*, uma plataforma de código aberto utilizada na área de automação residencial. A estrutura modular, fundamentada em componentes e automações, permite uma personalização sofisticada do contexto de domótica residencial (Home Assistant, 2025).

Diante do exposto, é relevante examinar a implementação efetiva desses protocolos no âmbito da automação residencial, através da plataforma *Home Assistant*. A seleção do protocolo apropriado pode influenciar de maneira significativa a eficácia, a confiabilidade e a escalabilidade do sistema automatizado, configurando-se assim como uma decisão estratégica para projetos de ambientes inteligentes.

O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise detalhada entre dispositivos de automação residencial que empregam as tecnologias sem fio Wi-Fi e Zigbee, utilizando a plataforma de código aberto *Home Assistant* como sistema de controle e integração.

Ao examinar as particularidades, benefícios e limitações de cada protocolo no âmbito da automação residencial e sua implementação prática no *Home Assistant*, almeja-se oferecer uma base robusta para a compreensão e utilização dessas tecnologias em lares inteligentes.

1.1 Objetivos

Esta parte visa detalhar os objetivos que guiaram a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso. A partir da problemática exposta e da importância dos protocolos de comunicação sem fio na automação residencial.

Em primeiro lugar, apresenta-se o objetivo geral, que delineia a finalidade essencial da investigação. A seguir, são expostos os objetivos específicos necessários para a realização da análise comparativa entre os protocolos Wi-Fi e Zigbee.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar comparativamente os protocolos sem fio Wi-Fi e Zigbee no contexto da automação residencial, com foco em sua integração, desempenho e aplicabilidade prática por meio da plataforma *Home Assistant*, visando fornecer subsídios técnicos e estratégicos para a escolha adequada de tecnologias em projetos de casas inteligentes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Configurar uma rede de automação utilizando dispositivos Wi-Fi e Zigbee.
- Realizar a integração de uma rede de automação ao Home Assistant.
- Avaliar o desempenho, estabilidade, facilidade de integração e consumo dos dispositivos em ambos os protocolos no contexto da automação residencial.
- Apresentar uma análise comparativa com base no estudo realizado, destacando cenários mais adequados para a utilização de cada protocolo.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho é estruturado em capítulos que tratam do conteúdo de forma progressiva e lógica, começando pela fundamentação teórica na seção 2, a qual apresenta os conceitos de automação residencial, protocolos de comunicação e *Home Assistant*. A seguir, é apresentada a elucidação da metodologia utilizada na seção 3. Finalmente, na seção 4, são apresentados os resultados obtidos na elaboração deste trabalho, seguidos de uma conclusão sucinta e clara na seção 5, a qual abordará as perspectivas para pesquisas futuras.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Nesta seção, são expostos os conceitos fundamentais que fundamentam a elaboração do trabalho, discutindo a automação residencial, os protocolos de comunicação Zigbee e Wi-Fi, bem como a plataforma Home Assistant. Objetiva-se oferecer a fundamentação necessária para o entendimento das tecnologias associadas e sua utilização prática no âmbito da domótica.

2.1 Automação Residencial

A automação residencial, denominada também de domótica, diz respeito à integração de dispositivos e sistemas tecnológicos em residências, com o objetivo de automatizar e administrar funções que têm como finalidade o conforto, a segurança e a eficiência energética. A expressão domótica teve sua origem na junção do termo latino "domus", que se traduz como casa, e da palavra "robótica". A domótica pode ser entendida como uma tecnologia capaz de gerenciar e automatizar tarefas em um lar, onde a inteligência se baseia no aprendizado sobre cada demanda e na realização dos controles necessários para a execução da atividade (FERREIRA and LOPES, 2009).

2.1.1 Histórico e Evolução

A história da automação residencial está diretamente ligada à evolução das tecnologias de controle, comunicação e informática. Embora o conceito de controle automático remonte ao uso de mecanismos simples como relógios programáveis no início do século XX, foi apenas na segunda metade do século que surgiram as primeiras soluções voltadas a ambientes residenciais. Um dos primeiros protocolos desenvolvidos foi o X10 que utilizava a rede elétrica para transmitir comandos básicos, este apresenta limitação de comunicação unidirecional e baixa confiabilidade (DIAS and PIZZOLATO, 2004).

Nas décadas seguintes, compreendendo os anos de 1990 e 2000, o progresso tecnológico possibilitou a democratização e o aprimoramento dos sistemas de automação. Protocolos,

como o Zigbee, foram desenvolvidos nesse período, incorporando a comunicação bidirecional, além de assegurar confiabilidade e segurança nas transmissões. Dessa forma, a evolução possibilitou a criação de interfaces dinâmicas e o controle remoto por meio da internet.

A partir da década de 2010, com o advento da Internet das Coisas (IoT), a automação residencial passou a incorporar dispositivos inteligentes conectados à internet, com capacidade de operação em tempo real. Tal contexto impulsionou plataformas e sistemas como, por exemplo, o *Home Assistant*, que possibilita a integração entre dispositivos e protocolos. Tais soluções ampliaram a personalização e segurança das automações residenciais (GALEGALE et al., 2016).

2.1.2 Componentes de um sistema de Automação Residencial

Na automação residencial, há uma variedade de componentes interligados que funcionam em conjunto para assegurar a eficiência do sistema instalado. Os elementos incluem controladores, sensores, atuadores, protocolos de comunicação e interfaces, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Controladores são aparelhos projetados para a centralização e administração de equipamentos automatizados. Configura-se como um mecanismo estratégico em sistemas de automação que possibilita a interconexão de diversos meios (BOLZANI, 2010).

Sensores constituem equipamentos aptos a coletar informações do ambiente, como a temperatura, e efetuam a conversão desses dados em valores numéricos. A responsabilidade pela padronização desses dispositivos recai sobre a IEEE (IEEE Standards Association, 2007).

Atuadores são dispositivos destinados a realizar ações eletromecânicas que alteram seu estado ou propriedades. Esses dispositivos são essenciais na automação, uma vez que possibilitam que a tomada de decisão tenha impacto no mundo real, como ocorre no controle da iluminação em um ambiente inteligente (BOLZANI, 2004).

As redes de comunicação desempenham um papel crucial na conexão e na transmissão de informações, o que viabiliza a interoperabilidade do sistema, possibilitando assim o intercâmbio de dados entre este e outros sistemas (DIAS and PIZZOLATO, 2004).

As interfaces têm a função de estabelecer conexões e facilitar a interação com o sistema, permitindo ao usuário visualizar estados e interagir com o sistema de automação. Englobam aplicativos, assistentes de voz, dispositivos com telas e outros elementos (ACCARDI and DODONOV, 2012).



Figura 2.1: Componentes de um sistema de Automação Residencial

2.1.3 Vantagens da Automação Residencial

O crescente domínio da domótica resulta de sua proposta na melhoria da qualidade de vida dos usuários que transcendem o mero conforto, englobando fatores como segurança, economia energética, acessibilidade, eficácia na gestão de recursos e valorização do patrimônio imobiliário (VECCHI and OGATA, 2009).

A implementação de sistemas automatizados baseia-se na motivação de proporcionar conforto e comodidade ao usuário, permitindo o controle da iluminação, climatização, eletrodomésticos e sistemas de entretenimento por meio de diversas interfaces. Ademais, automações programadas ajustam o ambiente de maneira proativa às preferências do usuário, como, por exemplo, a ativação das luzes ao anoitecer (ACCARDI and DODONOV, 2012).

A automação também contribui para a economia de energia, um benefício de particular relevância no contexto das preocupações ambientais e da diminuição de custos. Os sistemas de automação residencial inteligentes possuem a habilidade de desativar equipamentos e otimizar o consumo de energia, o que pode resultar em uma diminuição de até 60% no consumo energético, quando implementados de forma adequada (SOUSA et al., 2019).

É notável a importância da domótica como instrumento de segurança. A integração de sensores de presença, câmeras, fechaduras eletrônicas e sistemas de alarmes são utilizados na proteção de residências. Outrossim, a domótica permite o monitoramento remoto em tempo real sobre eventos suspeitos ou emergenciais (ALVES and MOTA, 2003).

Para pessoas com mobilidade reduzida, idosos ou pessoas com deficiência, a automação residencial apresenta melhorias na qualidade de vida. Através de interfaces acessíveis, como comandos de voz, é possível realizar tarefas de nível díficil ou impossível devido a limitações, promovendo maior independência (SOUSA et al., 2019).

A inclusão de um sistema de automação confere valor comercial ao imóvel. De acordo com a Associação Brasileira de Automação Residencial e Predial (AURESIDE), a implementação de sistemas automatizados tem a capacidade de aumentar o valor da residência em até 10%, uma vez que são vistas como modernas, sustentáveis e seguras. Esses atributos influenciam diretamente as estratégias de valorização das propriedades.

2.1.4 IoT e Automação Residencial

A Internet das Coisas (IoT) diz respeito à conexão de dispositivos e objetos tangíveis à rede, permitindo que eles coletem, processem e compartilhem informações de maneira autônoma e em tempo real. Em uma rede de Internet das Coisas (IoT), possibilita-se a integração e a interoperabilidade por meio da utilização de diversas tecnologias e protocolos distintos, estabelecendo uma base para os sistemas de automação residencial (GUBBI et al., 2013).

Na prática, a Internet das Coisas possibilita a comunicação entre dispositivos inteligentes, como sensores e atuadores, e plataformas de controle, como o *Home Assistant*, de forma remota e automatizada. Dessa forma, a AURESIDE ressalta que a conexão de equipamentos por intermédio da internet forma um ecossistema residencial ágil e eficaz (AURESIDE, 2024).

Além disso, a conexão entre a Internet das Coisas (IoT) e a automação residencial se amplia pela possibilidade de escalabilidade e adaptação dos sistemas automatizados. Isso se deve à uniformização de protocolos, como Wi-Fi e Zigbee, e à crescente interoperabilidade entre os fabricantes, que proporciona aos usuários a possibilidade de expandir seus sistemas de maneira tranquila e simples (ASHIKQ and R, 2023).

2.2 Protocolos de Comunicação em Automação Residencial

Neste segmento, são expostos os principais protocolos de comunicação empregados em sistemas de automação residencial, enfatizando os protocolos sem fio Wi-Fi e Zigbee. Os conceitos, as características técnicas, as vantagens e as limitações são analisados, visando fundamentar a comparação sugerida neste estudo.

2.2.1 Conceitos Gerais de Protocolos de Comunicação

Um sistema voltado para a automação residencial necessita de uma grande robustez no que diz respeito ao processo de comunicação, algo que é garantido por meio da utilização de protocolos que são, de fato, muito eficientes e que se especializam em assegurar um tráfego eficaz dos dados que são gerados. Esse enfoque na competência dos protocolos é fundamental para o desenvolvimento adequado desse tipo de sistema.

Na prática, os protocolos de comunicação são divididos em duas categorias: com fio, como KNX, ETHERNET ou Modbus, e sem fio, que são mais comumente utilizados em residências devido à sua facilidade de instalação e flexibilidade. Dentre os protocolos sem fio, destacam-se o Wi-Fi, o Zigbee e outros.

Cada protocolo é elaborado visando atender a uma variedade de requisitos técnicos, sendo estes: alcance, consumo de energia, largura de banda, segurança e topologia da rede. Como exemplo, o protocolo Zigbee é projetado para dispositivos com baixo consumo de energia e opera em uma rede Mesh, ao passo que o Wi-Fi disponibiliza uma taxa de transferência de dados superior, demanda um maior consumo energético e requer uma infraestrutura mais robusta (GUBBI et al., 2013).

As seções 2.2.2 e 2.2.3 apresentarão uma análise aprofundada dos dois protocolos sem fio mais significativos na automação residencial contemporânea: Wi-Fi e Zigbee. Serão comparadas suas propriedades técnicas, assim como suas vantagens e limitações no âmbito das residências inteligentes.

2.2.2 Wi-Fi na Automação Residencial

O Wi-Fi (Wireless Fidelity) é atualmente uma das tecnologias de comunicação sem fio com maior adesão em ambientes residenciais. Baseado no conjunto de padrões IEEE 802.11, o Wi-Fi permite a transmissão de dados em alta velocidade por meio de ondas de rádio, sendo amplamente utilizado em dispositivos de automação residencial conectados à internet, como câmeras IP, relés e interruptores inteligentes.

História e evolução

Na década de 1990, um consórcio de especialistas em engenharia, por intermédio do IEEE, empenhou-se em desenvolver padrões da indústria relacionados à tecnologia sem fio e suas interações. Dessa forma, ocorreu o advento da Wi-Fi Alliance, que elaborou as normas e testes utilizados para certificação de produtos, assegurando a conformidade com os padrões de interoperabilidade e segurança GAST (2012).

A difusão do Wi-Fi ocorreu em paralelo ao progresso da banda larga e da mobilidade residencial, firmando-se como a principal infraestrutura de conectividade em lares inteligentes.

Topologia de Rede

A topologia é definida pela forma como os dispositivos estão ligados à rede e como se interconectam uns aos outros. As configurações topológicas mais relevantes para a automação residencial são a estrela e a malha ou mesh, como pode ser observado na Figura 2.2.

Na configuração topológica em estrela, os dispositivos terminais estabelecem conexão com um ponto central, responsável pela gestão dos dados e pela comunicação com o ambiente externo. Essa configuração baseia-se no padrão IEEE 802.11, o qual opera nas camadas Física e de Enlace de Dados do modelo OSI, definindo os mecanismos de acesso ao meio físico de transmissão (IEEE, 2020).

A principal facilidade reside na simplicidade da gestão e da instalação. Entretanto, apresenta-se uma limitação em termos de escalabilidade e resiliência em decorrência da dependência do nó central, que, se apresentar falhas, comprometerá toda a rede.

A topologia em malha é caracterizada pela possibilidade de cada dispositivo estabelecer conexões diretas com outros nós, resultando em uma redundância na transmissão de dados. Essa configuração é orientada pelo padrão IEEE 802.15.4, que estabelece diretrizes para baixo consumo de energia e viabiliza a comunicação em redes sem fio (IEEE, 2011).

A vantagem reside na oferta de resiliência, escalabilidade e abrangência. Entretanto, as redes mesh demandam uma implementação sofisticada, o que eleva os custos e a complexidade.

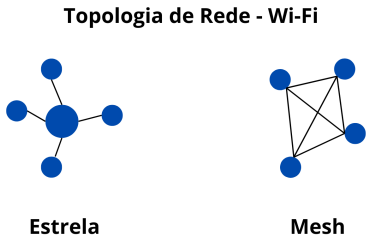


Figura 2.2: Topologia de Rede Wi-Fi (Estrela e mesh)

Frequência de Operação

Os dispositivos Wi-Fi funcionam nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz, sendo que a primeira proporciona um alcance superior e uma melhor penetração em obstáculos. A segunda, por sua vez, oferece uma largura de banda superior e uma interferência reduzida. Com a chegada do Wi-Fi 6E e do Wi-Fi 7, a faixa de 6 GHz também começou a ser utilizada (IEEE, 2021).

Segurança

A segurança do protocolo Wi-Fi representa um elemento crucial na automação residencial, considerando o elevado volume de dados sensíveis. Protocolos como o WPA2 (Wi-Fi Protected Access II) e o WPA3 proporcionam a utilização de criptografia AES e mecanismos de autenticação para proteger contra invasões e interceptações, empregando chaves dinâmicas e robustas WI-FI ALLIANCE (2020).

Vários dispositivos de automação residencial que operam através de Wi-Fi utilizam o WPA2, com o objetivo de assegurar a compatibilidade com roteadores de versões anteriores. Além disso, uma prática implementada em residências que utilizam tecnologia inteligente envolve a criação de VLANs ou redes Wi-Fi distintas, destinadas unicamente aos dispositivos inteligentes. Essa estratégia bloqueia o ingresso direto à rede principal do espaço domiciliar por meio da implementação de firewalls.

Camadas OSI

O modelo OSI (Open Systems Interconnection) é uma estrutura de referência sugerida pela ISO (International Organization for Standardization) em 1984, visando à padronização da comunicação entre sistemas computacionais. Portanto, organiza-se em sete camadas hierárquicas, sendo que cada uma possui uma função específica, o que permite a interoperabilidade entre diversos dispositivos e tecnologias STALLINGS (2021).

As sete camadas do modelo OSI são:

- Física: trata da transmissão bruta de bits pelo meio físico.
- Enlace de Dados: garante a entrega confiável entre dois nós diretamente conectados.
- Rede: define o roteamento dos pacotes entre diferentes redes.
- Transporte: garante a entrega fim a fim com controle de erro e fluxo.
- Sessão: gerenciamento das sessões de comunicação entre aplicações.
- Apresentação: lida com a tradução de dados, criptografia e compressão.
- Aplicação: fornece serviços diretamente ao usuário final ou aplicação.

A implementação do modelo OSI no Wi-Fi ocorre, predominantemente, nas camadas Física e de Enlace de Dados, conforme o padrão IEEE 802.11. Na camada física, realizam-se a modulação, a codificação e a definição da frequência. A camada de enlace (MAC) trata do gerenciamento do controle de acesso ao meio (CSMA/CA), bem como da autenticação e do encapsulamento de dados (IEEE, 2020).

Ademais, o Wi-Fi estabelece uma interação com a pilha de protocolos TCP/IP, especialmente nas camadas de Rede (IP), Transporte (TCP ou UDP) e Aplicação (HTTP,

MQTT). A versatilidade do Wi-Fi para aplicações residenciais, como câmeras IP e interfaces conectadas a nuvens de acesso remoto por meio da internet, é gerada por diversas características que o tornam adequado para essas funcionalidades.

Aplicações Comuns em Automação Residencial

A tecnologia Wi-Fi é frequentemente utilizada em lares, em virtude de sua elevada taxa de transmissão de dados, da facilidade de conexão à internet e da compatibilidade com uma variedade de dispositivos.

As câmeras IP Wi-Fi configuram-se como elementos fundamentais na elaboração de sistemas de automação domiciliar, uma vez que oferecem transmissão contínua de vídeo em alta definição, monitoramento remoto e armazenamento em nuvem. Protocolos como o ONVIF e plataformas como o Home Assistant possibilitam a incorporação de câmeras a sistemas de automação.

Os assistentes de voz funcionam unicamente via Wi-Fi e atuam como interfaces de automação por meio da execução de comandos orais. Além disso, são integrados a outros softwares e aplicativos, como calendários, despertadores e afins.

Eletrodomésticos inteligentes oferecem conectividade com Wi-Fi embutido, possibilitando controle remoto, agendamento e autodiagnóstico. Além disso, a ligação com as interfaces possibilita a obtenção de informações sobre o consumo de energia e recomendações para um uso eficiente.

Vantagens e desvantagens

O protocolo de comunicação Wi-Fi apresenta vantagens e limitações que são importantes para conhecimento no objetivo de protejar ou expandir um sistema de automação residencial.

As principais vantagens são elas:

- Acessibilidade e Simplicidade na Integração: Em razão do suporte proporcionado pelos roteadores residenciais, não é imprescindível a adoção de outras centrais. Dessa forma, diminui-se o custo e a complexidade inicial para a implementação da domótica.

- Elevada Largura de Banda: O Wi-Fi oferece taxas de transmissão significativamente superiores às de outros protocolos, sendo particularmente apropriado para aplicações que requerem a transmissão de vídeo, áudio ou conexão direta à internet.

- Padrão amplamente reconhecido: O Wi-Fi configura-se como um padrão internacional extensivamente respaldado por fabricantes, assegurando tanto a interoperabilidade quanto a compatibilidade com atualizações, além da ampla disponibilidade de dispositivos.

As desvantagens são elas:

- Elevado consumo de energia: Os dispositivos Wi-Fi costumam apresentar um consumo de energia superior em comparação a outros protocolos. O que restringe sua utilização a sistemas que operam com energia de bateria.
- Dependência da Qualidade do Sinal: Ambientes que apresentam numerosas obstruções físicas ou interferências eletromagnéticas podem impactar o funcionamento do Wi-Fi, resultando em latência, perda de pacotes e outros problemas.
- Escalabilidade restrita: As redes Wi-Fi podem enfrentar desafios relacionados à escalabilidade em virtude da elevada densidade de dispositivos conectados e do intenso fluxo de dados, o que pode ocasionar congestionamentos e comprometimento do desempenho.

2.2.3 Zigbee na Automação Residencial

O Zigbee é uma tecnologia de comunicação sem fio baseada no padrão IEEE, projetada para aplicações de baixo consumo energético e baixa taxa de dados. Utilizado em sensores, lâmpadas e fechaduras inteligentes, destaca-se pela capacidade de operar em topologia de rede mesh e alta eficiência energética, mesmo em redes com muitos dispositivos.

História e evolução

O protocolo Zigbee surgiu com o objetivo de oferecer uma solução de comunicação sem fio de baixo consumo energético. Desenvolvido pelo Zigbee Alliance, atualmente denominado Connectivity Standards Alliance (CSA), o padrão é baseado na camada física e na subcamada de controle de acesso ao meio do IEEE 802.15.4 (IEEE Standards Association, 2015).

O principal objetivo do consórcio é o desenvolvimento de padrões que garantem a interoperabilidade entre dispositivos considerados na IoT. Durante o seu desenvolvimento, o Zigbee passou por várias atualizações e, atualmente, está na versão Zigbee 3.0 (2016), a qual visa à unificação de perfis de aplicação e interoperabilidade entre fabricantes (CONNECTIVITY STANDARDS ALLIANCE, 2021).

Tipos de Dispositivos

Os sistemas de automação residencial baseados na tecnologia Zigbee são compostos por três dispositivos principais, conforme apresentado na Figura 2.3.

- Dispositivo Central (Hub) é responsável por determinar o canal de comunicação com outros dispositivos, armazenar informações, gerenciar os nós do sistema e da

rede, controlando a entrada de dispositivos e estabelecendo conexão com a internet (IEEE Standards Association, 2015).

- Dispositivo Roteador é empregado para ampliar o sinal, realizar o encaminhamento de mensagens entre os nós e, em geral, possui uma fonte de energia ilimitada, conectada à rede elétrica (CONNECTIVITY STANDARDS ALLIANCE, 2021).
- Dispositivo Final (End Device) é encarregado de obter dados, apresenta restrições quanto à fonte de energia e estabelece comunicação exclusivamente com os demais dispositivos previamente citados (IEEE Standards Association, 2015).

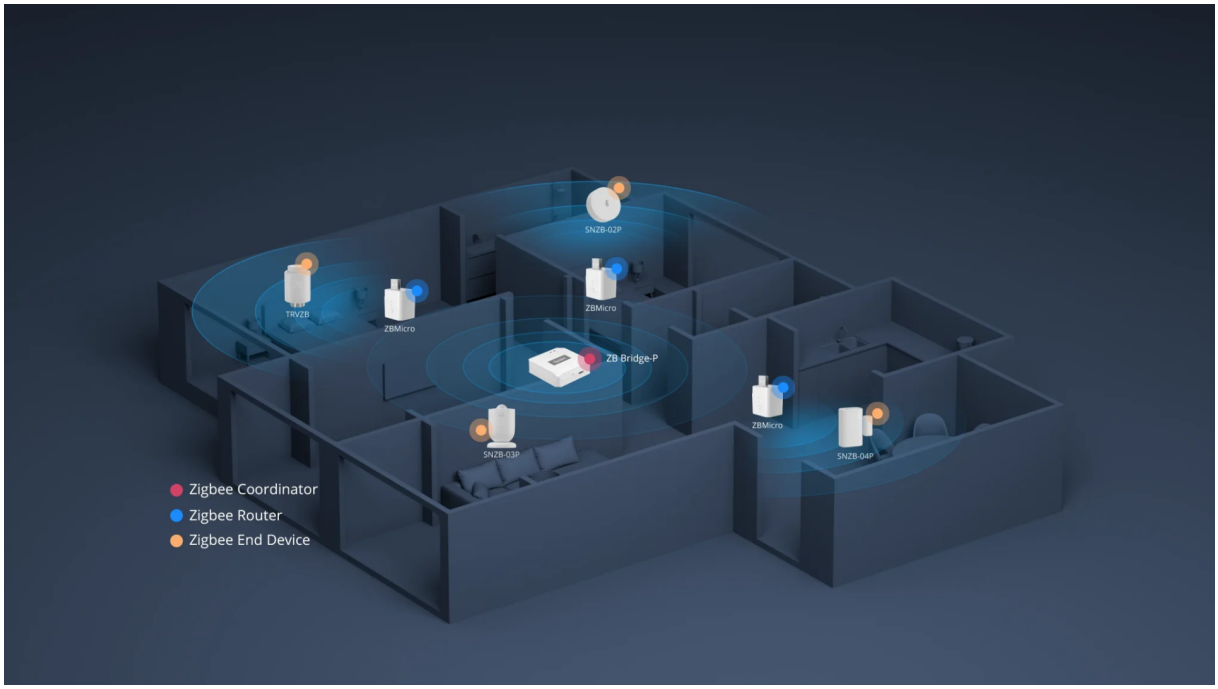


Figura 2.3: Tipos de dispositivos Zigbee. Fonte: ZBMICRO - SONOFF Official (2025)

Topologia de Rede

O protocolo Zigbee foi desenvolvido para funcionar em uma topologia em malha, apesar de também oferecer suporte a arranjos em estrela e em árvore. A sua estrutura possibilita a versatilidade para que os equipamentos operem como Centrais, Roteadores e Dispositivos Finais, o que favorece a configuração de redes amplamente distribuídas e autoconfiguráveis.

A estrutura de topologia em malha empregada pelo Zigbee é regulamentada pelo padrão IEEE 802.15.4, o qual estabelece os métodos de comunicação de baixo consumo energético entre dispositivos em redes pessoais sem fio (WPANs). Nesta topologia, os roteadores Zigbee expandem o alcance da rede ao retransmitir pacotes, enquanto os Dispositivos Finais comunicam-se apenas com seu nó pai (IEEE Standards Association, 2015).

As principais vantagens consistem na resiliência e na escalabilidade. Se um roteador falhar, o tráfego é desviado para rotas alternativas, o que eleva a confiabilidade do sistema; além disso, a inclusão de um novo dispositivo robustece a malha.

Frequência de Operação

O Zigbee tem sua operação de forma majoritária na banda de 2,4 GHz, com alcance global. A norma regida pelo IEEE 802.15.4 disponibiliza até 16 canais, com uma taxa de transmissão que pode alcançar até 250 kbps. Ademais, é possível operar nas faixas de 868 MHz (Europa) e 915 MHz (América do Norte), oferecendo um alcance ampliado e uma taxa de transmissão entre 20 e 40 kbps, de acordo com a regulamentação local (IEEE Standards Association, 2015).

Segurança

O mecanismo de defesa mais proeminente da segurança estabelecida no protocolo Zigbee é a aplicação da criptografia AES (Advanced Encryption Standard), que emprega uma chave de 128 bits. Ademais, o Zigbee 3.0 aprimorou os mecanismos de segurança ao consolidar a administração das chaves e a autenticação durante o processo de pareamento (CONNECTIVITY STANDARDS ALLIANCE, 2021).

Além disso, a adoção do Hub revela-se fundamental para estabelecer a ligação de novos dispositivos de forma segura, pois possibilita a verificação de chaves de segurança que foram previamente configuradas. Assim, essa ação preventiva revela-se eficaz para obstruir que equipamentos maliciosos possam conectar-se de forma simples e desprotegida.

Aplicações Comuns em Automação Residencial

O protocolo Zigbee tem se consolidado como uma das principais tecnologias em automação residencial, principalmente pela sua eficiência energética, capacidade de operação em rede mesh e ecossistema consolidado.

Sensores inteligentes Zigbee são amplamentes utilizados pela sua rápida atuação na transmissão de dados com um baixo consumo, esse que são configurados e otimizados para o prolongamento de autonomia e performance.

Fechaduras eletrônicas são responsáveis pelo controle de acesso, que necessitam de segurança e autonomia energética para integração com demais dispositivos inteligentes. Para isso, a segurança apresentada pela criptografia do Zigbee possibilita segurança adicional ao sistema de acesso ao ambiente.

Vantagens e desvantagens

O protocolo de comunicação Zigbee apresenta características específicas que oferecem tanto benéficios quanto limitações na implementação de soluções em domótica. É essen-

cial compreender suas propriedades ao projetar ou expandir um sistema de automação residencial.

As principais vantagens são elas:

- Consumo reduzido de energia: Um dos contextos mais relevantes do Zigbee é seu consumo reduzido, resultante de um protocolo otimizado para transmissões esporádicas e breves.
- Elevada escalabilidade: O Zigbee possibilita a conexão de até 65.535 dispositivos em uma única rede, o que se torna fundamental em residências com uma grande quantidade de aparelhos conectados. Essa habilidade é viabilizada pela estruturação da rede.
- Interoperabilidade: A versão Zigbee 3.0 estabeleceu a padronização de perfis de aplicação, o que aprimorou a compatibilidade entre dispositivos e favoreceu a adoção de protocolos em ecossistemas abertos.

As desvantagens são elas:

- Dependência de Hub: Os dispositivos Zigbee necessitam de um gateway para estabelecer conexão com a internet. O que eleva o custo de implementação e torna a instalação inicial mais complexa.
- Taxa de transmissão de dados reduzida: O Zigbee proporciona uma velocidade de até 250 kbps, o que é adequado para sensores e comandos simples; no entanto, é insuficiente para aplicações que necessitam de uma largura de banda maior, como a transmissão de vídeo.
- Alcance direto limitado: Embora o Zigbee possua a capacidade de estabelecer redes mesh, seu alcance ponto-a-ponto é restrito, o que pode tornar necessários dispositivos repetidores em áreas extensas.

2.3 Home Assistant

Esta parte trata do Home Assistant, uma plataforma de automação residencial de código aberto que possibilita a integração de diversos dispositivos e protocolos. Serão examinadas suas principais características, benefícios no âmbito da domótica e sua função na análise prática comparativa entre Wi-Fi e Zigbee realizada neste estudo.

2.3.1 Visão Geral da Plataforma

O Home Assistant constitui uma plataforma de automação residencial de código aberto, concebida com ênfase na privacidade, no controle local e na personalização. Permite a conexão de uma infinidade de dispositivos, por meio de protocolos como Wi-Fi, Zigbee, entre outros.

O desenvolvimento ocorre em Python e adota uma arquitetura modular, que permite a execução do sistema em dispositivos como Raspberry Pi, servidores domésticos ou máquinas virtuais localmente, eliminando a dependência de serviços em nuvem Home Assistant (2025).

2.3.2 Importância no Contexto da Comparação entre Zigbee e Wi-Fi

No desenvolvimento deste trabalho, o Home Assistant se mostra fundamental por ser uma plataforma de suporte a ambos os protocolos de maneira estruturada e comparável. Ao oferecer interfaces padronizadas, automações locais,dashboards personalizáveis e suporte a múltiplos backends, ele permite analisar:

- Desempenho real dos dispositivos Zigbee e Wifi sob uma mesma base de testes;
- Facilidade de integração, configuração e manutenção;
- Respostas a eventos locais;
- Estabilidade da rede, analisando quedas, latência e falhas de comunicação;
- Consumo de recursos da máquina hospedeira.

2.3.3 Suporte à interoperabilidade

O Home Assistant adota uma abordagem baseada em padrões abertos e comunicação local, o que o torna uma das plataformas mais compatíveis com dispositivos de variados fabricantes e tecnologias.

A CSA, encarregada da padronização do Zigbee e do desenvolvimento do padrão Matter, reconhece a importância de plataformas como o Home Assistant na promoção de soluções interoperáveis para residências inteligentes.

Ao possibilitar que aparelhos que utilizam diferentes protocolos coexistam e operem de maneira integrada por meio de uma camada de abstração comum, o Home Assistant desempenha um papel significativo na ampliação da acessibilidade tecnológica e no fortalecimento da padronização no setor de Internet das Coisas (CONNECTIVITY STANDARDS ALLIANCE, 2023).

2.3.4 Papel na Prototipagem e Validação

Ao possibilitar a elaboração ágil de cenários, rotinas automatizadas e painéis de controle, o Home Assistant se configura como um recurso fundamental para prototipagem e comprovação prática. Este trabalho atual foi empregado para a realização de testes destinados a mensurar:

- Compatibilidade e tempo de resposta de dispositivos Wi-Fi e Zigbee;
- Facilidade de emparelhamento e configuração;
- Monitoramento de rede e diagnóstico de erros;
- Criação de automações com lógica condicional, temporizadores e sensores de estado.

Capítulo 3

Metodologia

Este presente trabalho é de natureza experimental e comparativa, com o objetivo de analisar o desempenho, a confiabilidade e a viabilidade de dispositivos Zigbee e Wi-Fi aplicados em um cenário de automação residencial.

Os ensaios foram conduzidos em um ambiente controlado, empregando uma bancada de automação residencial concebida para reproduzir aplicações reais. O estande consiste em uma Raspberry Pi 5, a qual opera com o sistema Home Assistant, servindo como central de automação e integração.

Ademais, a Figura 3.1 ilustra a visão do estande, que é formado por elementos de automação residencial apresentados na seção 3.1.



(a) (b)

Figura 3.1: Fotos do Estande desenvolvido para aplicação: (a)Vista Frontal - Disposição de tomadas, tomadas inteligentes e interruptores; (b) Vista Superior - Disposição das lâmpadas, sensores, atuadores e controladores.

A Figura 3.2 exibe o diagrama elétrico do estande elaborado para o sistema de automação residencial criado, no qual se pode notar a integração de componentes como

relés, tomadas, interruptores e lâmpadas. Este diagrama demonstra a forma como os dispositivos estão conectados eletricamente, possibilitando o controle automatizado dos equipamentos, evidenciando a função dos relés.

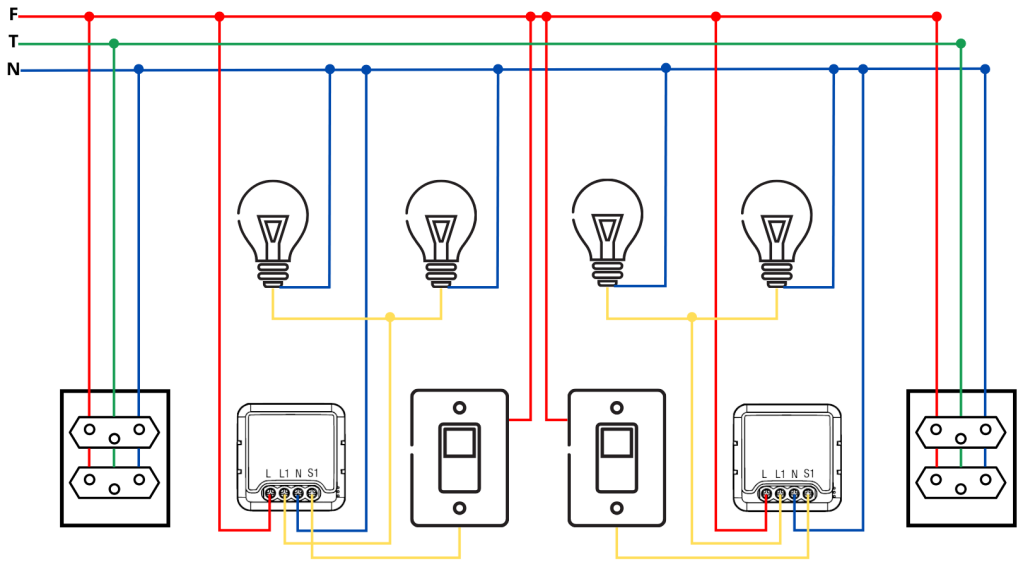


Figura 3.2: Diagrama do esquema elétrico desenvolvido

3.1 Equipamentos Utilizados

A Tabela 3.1 fornece uma perspectiva sobre os controladores, sensores, atuadores e mecanismos de interface empregados, além das funções correspondentes, do protocolo utilizado e da marca adotada.

Dispositivo	Protocolo	Marca	Função
Roteador Wi-Fi	Wi-Fi	Tp-Link	Roteamento da rede e conexão com a internet
Hub Zigbee	Zigbee	Nova Digital	Coordenador da rede Zigbee
Sensor de Porta	Wi-Fi	WEG	Detecção de abertura/fechamento
Sensor de Movimento	Wi-Fi	WEG	Detecção de movimento
Sensor de Porta	Zigbee	Ekasa	Detecção de abertura/fechamento
Sensor de Movimento	Zigbee	Nova Digital	Detecção de movimento
Relé inteligente	Wi-Fi	WEG	Controle de carga via Wi-Fi
Tomada inteligente	Wi-Fi	WEG	Acionamento remoto de equipamentos
Relé inteligente	Zigbee	WEG	Controle de carga via Zigbee
Tomada inteligente	Zigbee	WEG	Acionamento remoto de equipamentos
Central de Automação	-	Raspberry Pi 5	Execução do Home Assistant

Tabela 3.1: Lista de dispositivos do estande

3.2 Procedimentos

As etapas executadas neste estudo foram elaboradas com a finalidade de comparar o desempenho, a estabilidade e a usabilidade de dispositivos Wi-Fi e Zigbee, em um ambiente controlado de automação residencial. Com esse objetivo, foram estabelecidos cenários equivalentes para as duas tecnologias, possibilitando uma avaliação equitativa e equilibrada dos protocolos.

As etapas de configuração e integração estão sumarizadas na Figura 3.3, sendo detalhadas mais adiante. Essa etapa consistiu na integração dos dispositivos Zigbee e Wi-Fi à plataforma Home Assistant. Essa integração é essencial para viabilizar o controle centralizado dos dispositivos e permitir a automação das funções testadas.

- Inicialmente, todos os dispositivos foram emparelhados ao aplicativo Smart Life, disponível para dispositivos Android e iOS, seguindo os respectivos manuais de configuração. Esse aplicativo permite o controle remoto dos dispositivos, bem comos as configurações iniciais de rede e funcionalidade.

- Após a confirmação de funcionamento de cada dispositivo no aplicativo, foi ativada a integração Tuya no Home Assistant. Essa integração permite a comunicação direta entre o Home Assistant e os servidores da Tuya, sincronizando os dispositivos vinculados à conta Smart Life.
- A autenticação foi realizada com base nas credenciais da conta Tuya (e-mail, senha e código de acesso do projeto Tuya IoT Platform, se necessário).
- Após essa configuração, todos os dispositivos foram automaticamente identificados e adicionados ao painel do Home Assistant, mantendo seus nomes e categorias.



Figura 3.3: Fluxograma do procedimento de integração e configuração

3.3 Execução de testes funcionais

Após a configuração e integração do ambiente, serão realizados testes de desempenho, estabilidade e consumo. Nos testes de desempenho, será feita uma análise quantitativa para comparação dos protocolos. Nos testes de estabilidade, serão avaliados os logs de eventos em busca de cenários de falhas. Nos testes de consumo, serão monitorados e comparados o consumo de energia.

3.3.1 Desempenho

Visando a análise quantitativa do desempenho dos protocolos Zigbee e Wi-Fi, foi elaborado um script em Python que tem a função de escutar tópicos MQTT, além de registrar as mensagens publicadas por sensores e atuadores no instante em que são ativados. A

finalidade consistiu em medir com exatidão o intervalo de tempo entre a identificação de um evento e a realização da ação correlata.

Os dispositivos empregaram o Home Assistant, desenvolvendo automações para enviar mensagens JSON com marcações temporais (timestamp) ao broker MQTT imediatamente após a alteração de seus estados. O código em Python, por meio da biblioteca paho-mqtt, estabelecia uma conexão com o broker e armazenava as mensagens recebidas em uma estrutura de dados, registrando os dados em diretórios e arquivos CSV, visando à análise posterior.

Essa estratégia possibilitou uma coleta constante e exata dos dados de desempenho, diminuindo a necessidade de intervenção manual e elevando a confiabilidade das medições. Ao total, foram elaboradas 3200 amostras com intervalo de dados semelhantes.

3.3.2 Estabilidade

A estabilidade do sistema de automação elaborado foi avaliada por meio da observação do desempenho contínuo dos dispositivos durante um intervalo de teste estipulado. Consideraram-se eventos de instabilidade toda a transição de estado para unavailable, a perda de comunicação com o broker MQTT ou falhas na execução de automações predefinidas.

Todas as ocorrências registradas foram anotadas no logfile do Home Assistant, possibilitando a análise da frequência e da duração das falhas. Essa análise teve como objetivo avaliar a confiabilidade da comunicação em situações residenciais autênticas, utilizando os protocolos Wi-Fi e Zigbee.

3.3.3 Consumo

Durante os experimentos, monitorou-se o consumo de energia dos dispositivos que utilizam pilhas e baterias, tais como sensores de porta e sensores de movimento. O propósito consiste em analisar a eficiência energética dos protocolos Wi-Fi e Zigbee em contextos de uso similar. Os dados referentes ao nível da bateria foram coletados diretamente na interface do Home Assistant, que apresenta as informações transmitidas pelos dispositivos por meio de telemetria.

As leituras foram registradas durante o período de testes, em intervalos regulares, e organizadas em planilhas. Embora o intervalo não tenha sido adequado para esgotar totalmente as baterias, foi viável perceber tendências na alteração do nível de carga, sobretudo em dispositivos Wi-Fi, que mostraram uma diminuição mais significativa.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo, são expostos os resultados obtidos a partir de testes realizados com dispositivos Wi-Fi e Zigbee integrados ao Home Assistant. Os dados obtidos foram examinados segundo critérios como o intervalo de resposta, a estabilidade e o consumo de energia, possibilitando uma comparação prática entre os protocolos. A discussão tem como objetivo interpretar os resultados e evidenciar os contextos mais apropriados para cada tecnologia.

4.1 Resultados da Integração dos Dispositivos

A totalidade dos dispositivos Wi-Fi e Zigbee foi integrada com êxito à plataforma Home Assistant. A integração por meio da Tuya mostrou-se eficaz para os dois protocolos, com reconhecimento automático dos dispositivos. Constatou-se que os dispositivos foram identificados como sensores do tipo binary_sensor ou switch.

A metodologia de integração, que utiliza a abordagem e a dependência da nuvem proporcionadas pela Tuya, possibilitou a configuração ágil de diversos dispositivos, incluindo o reconhecimento automático de sensores, atuadores e tomadas. A integração demonstrou-se eficaz e estável durante os testes, o que se revelou útil para prevenir configurações locais mais complexas.

4.2 Comparação do Tempo de Resposta

Com o objetivo de analisar o desempenho dos sistemas de automação fundamentados nos protocolos Wi-Fi e Zigbee, foi utilizado e exibido na Figura 4.1 um *box plot*, ferramenta visual que sintetiza a distribuição de um conjunto de dados, evidenciando a mediana, valores mínimos e máximos, além de eventuais outliers. Durante a realização dos experimentos realizados, foram constituídos os seguintes grupos, categorizados entre sensores e atuadores: Zigbee - Wi-Fi, Zigbee - Zigbee, Wi-Fi - Zigbee, Wi-Fi - Wi-Fi.

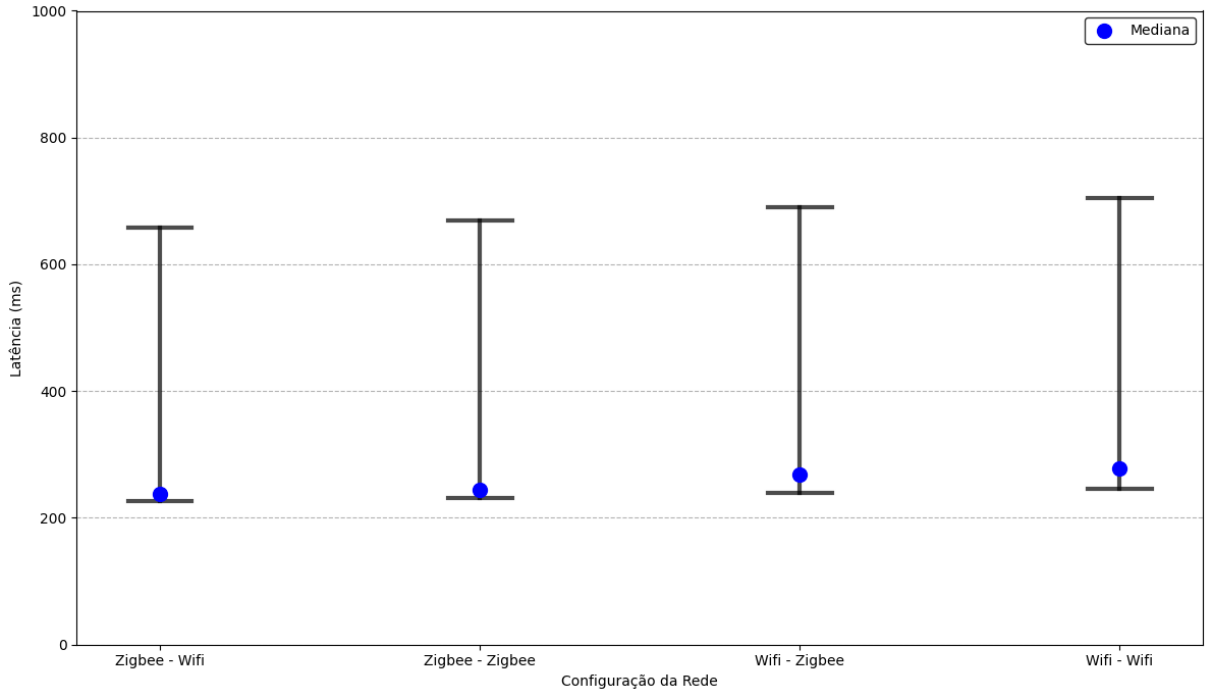


Figura 4.1: Gráfico de Desempenho dos grupos estudados

Os dados estatísticos a serem obtidos podem ser encontrados na Tabela 4.1. Ao analisar as médias e medianas das latências, verifica-se uma tendência de crescimento nos valores à medida que a tecnologia Wi-Fi se torna mais predominante na comunicação.

Ao examinarmos a dispersão e a consistência, representadas pelo Desvio Padrão e pelo Coeficiente de Variação, que corroboram a estabilidade da latência, notamos que os desvios apresentados são reduzidos e apresentam proximidade entre si. De maneira análoga, o coeficiente de variação apresenta-se de forma semelhante, evidenciando que as médias refletem adequadamente os conjuntos de dados e que sua variabilidade relativa não é exagerada.

A avaliação dos valores mínimos e máximos revela uma progressão em que a latência média se eleva, o que pode sugerir a possibilidade de eventos isolados de latência mais prolongada. Os valores máximos se revelam consideravelmente superiores às medianas, indicando a presença de outliers que se afastam da maioria das medições.

Finalmente, apesar das disparidades nas medianas e nos desvios padrão serem relativamente insignificantes entre as configurações, as interações realizadas por meio do Wi-Fi apresentam uma leve desvantagem em comparação ao Zigbee. Além disso, há uma maior previsibilidade para situações críticas.

Métrica	**Zigbee - Wifi**	**Zigbee - Zigbee**	**Wifi - Zigbee**	**Wifi - Wifi**
Média (ms)	247	255	275	285
Desvio Padrão (ms)	39	40	43	45
Mediana (ms)	238	245	268	278
Máximo (ms)	658	670	690	705
Mínimo (ms)	227	231	240	246
Coef. de Variação (%)	15.89	15.83	15.64	15.78

Tabela 4.1: Estatísticas de Latência para Diferentes Configurações de Rede

4.3 Estabilidade dos Protocolos

Ao longo do período de coleta dos dados de desempenho também foi observado a estabilidade dos dispositivos a partir do logfile do Home Assistant. A análise da Tabela 4.2 revela que os dispositivos Zigbee mantiveram conexão contínua, sem registro de falhas ou estados de indisponibilidade. O mesmo não ocorreu com os dispositivos Wi-Fi, em especial o Sensor de Porta, este apresentou instabilidade esporádica, principalmente a variação de sinal do roteador.

Protocolo	Dispositivo	Falhas registradas
Wi-Fi	Sensor de Porta	3
Wi-Fi	Sensor de Movimento	2
Wi-Fi	Relé inteligente	0
Wi-Fi	Tomada inteligente	1
Zigbee	Sensor de Porta	0
Zigbee	Sensor de Movimento	0
Zigbee	Relé inteligente	0
Zigbee	Tomada inteligente	0

Tabela 4.2: Ocorrências de instabilidade dos dispositivos Zigbee e Wi-Fi

4.4 Consumo de Bateria dos Dispositivos

A alteração no nível de carga dos dispositivos durante o período de coleta dos dados de desempenho evidenciou uma distinção significativa entre os protocolos. Os sensores Zigbee demonstraram um consumo médio de 13,5%, enquanto os sensores Wi-Fi evidenciaram reduções superiores a 50%, mesmo em situações de uso análogas.

Esses dados são detalhados na Tabela 4.3, que apresenta a comparação dos níveis de consumo entre os dispositivos avaliados, reforçando a eficiência energética do protocolo Zigbee em relação ao Wi-Fi.

Protocolo	Dispositivo	Nível Inicial	Nível Final	Diferença (%)
Wi-Fi	Sensor de Porta	100%	63%	-37%
Wi-Fi	Sensor de Movimento	100%	35%	-65%
Zigbee	Sensor de Porta	100%	91%	-9%
Zigbee	Sensor de Movimento	100%	82%	-18%

Tabela 4.3: Comparativo de consumo de bateria em sensores Zigbee e Wi-Fi

4.5 Discussão Geral dos Resultados

A comparação abordada neste trabalho possibilitou a identificação de vantagens e restrições significativas, que impactam diretamente na seleção do protocolo de acordo com o contexto e os objetivos do projeto. Os resultados obtidos evidenciam que, apesar de ambos os protocolos serem adequados para aplicações em domótica, o desempenho observado em fatores como tempo de resposta, estabilidade e consumo energético apresentou diferenças significativas.

Em relação ao tempo de resposta, os testes demonstraram uma ligeira superioridade do Zigbee, particulamente em interações entre sensores e atuadores pertencentes ao mesmo protocolo. No que se refere à estabilidade, os dispositivos Zigbee não mostraram ocorrências de falhas ou indisponibilidade durante os testes, ao passo que os dispositivos Wi-Fi evidenciaram instabilidades.

No que tange ao consumo de energia, os resultados indicaram uma discrepância significativa entre os protocolos. Os dispositivos Zigbee demonstraram um consumo significativamente menor em comparação aos dispositivos Wi-Fi. Outro aspecto importante foi a simplicidade de integraçao. A utilização através da Tuya possibilitou uma abordagem padronizada para os dois protocolos, facilitando a associação dos dispositivos ao Home Assistant.

Em última análise, os testes evidenciaram que a seleção do protocolo mais adequado depende consideravelmente do tipo de aplicação: o Wi-Fi é mais apropriado em contextos que requerem alta largura de banda e integração direta com serviços de nuvem (por exemplo, câmeras IP e assistentes de voz), enquanto o Zigbee se mostra mais indicado para sensores e atuadores que necessitam de baixo consumo de energia e alta confiabilidade na rede.

Capítulo 5

Conclusão

A comparação entre os protocolos Zigbee e Wi-Fi, em um contexto de automação residencial, evidenciou, de maneira prática, as características distintivas e o desempenho de cada uma das tecnologias. Por meio da integração dos dispositivos à plataforma Home Assistant e da realização de testes controlados, observou-se que ambos os protocolos demonstram viabilidade para aplicações em ambientes residenciais, entretanto, possuem características distintas que influenciam diretamente a seleção do protocolo mais apropriado.

O Zigbee sobressaiu-se devido à sua eficiência em termos de consumo de energia, à estabilidade nas comunicações e à escalabilidade, apresentando-se como uma opção especialmente apropriada para dispositivos que utilizam bateria e para ambientes com diversos nós na rede. Em contrapartida, o Wi-Fi demonstrou como principais benefícios uma maior largura de banda e a facilidade de integração inicial, favorecendo aplicações que requerem conectividade direta com a internet e elevada taxa de transmissão de dados, como câmeras IP.

Os resultados alcançados evidenciam a relevância de levar em conta o tipo de aplicação, o consumo energético e o nível de complexidade almejado ao se elaborar sistemas de automação residencial. A seleção do protocolo mais apropriado deve fundamentar-se em critérios técnicos, na relação custo-benefício e na vivência do usuário final, promovendo a edificação de residências inteligentes que sejam mais eficientes e confiáveis.

Embora os objetivos principais deste trabalho tenham sido alcançados, diversas frentes de pesquisa podem ser exploradas e expandidas para estudos futuros:

- Implementação local: Substituir a integração baseada na nuvem (Tuya) por soluções 100% locais,como Zigbee2MQTT e ESPHome, eliminando a dependência de servidores externos e aumentando a privacidade e a velocidade de resposta.

- Avaliação em longo prazo: Realizar testes prolongados para mensurar com maior precisão o impacto no consumo de bateria e a estabilidade dos dispositivos em cenários reais de uso contínuo.

- Inclusão de outros protocolos: Comparar Wi-fi e Zigbee com outras tecnologias emergentes, como Thread e Z-Wave, ampliando a análise de interoperabilidade e eficiência em diferentes contextos residenciais.
- Automação baseada em IA: Integrar algoritmos de aprendizado de máquina para criação de automações preditivas e adaptativas, aumentando a inteligência e autonomia dos sistemas domésticos.

Referências Bibliográficas

ACCARDI, A. and DODONOV, E. (2012). Automação residencial: Elementos básicos, arquiteturas, setores, aplicações e protocolos. *Tecnologias, Infraestrutura e Software*, 1(2):156–166.

ALVES, J. and MOTA, J. (2003). *Casas Inteligentes*. Centro Atlântico, Lisboa.

ASHIKQ, M. and R, S. V. (2023). Smart home automation: A review of technologies and applications. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4(4):4191–4193.

AURESIDE (2024). Mercado de automação residencial no brasil: tendências e desafios. Disponível em: <https://www.aureside.org.br>. Acesso em: 30 abr. 2025.

BOLZANI, C. A. M. (2004). *Residências inteligentes - domótica, redes domésticas, automação residencial*. Livraria da Física, São Paulo.

BOLZANI, C. A. M. (2010). *Análise de arquiteturas e desenvolvimento de uma plataforma para residências inteligentes*. Tese (doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CONNECTIVITY STANDARDS ALLIANCE (2021). Zigbee 3.0 specification. Disponível em: <https://csa-iot.org/>.

CONNECTIVITY STANDARDS ALLIANCE (2023). The future of smart home is open. Disponível em: <https://csa-iot.org/newsroom/the-future-of-smart-home-is-open/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

DIAS, C. L. d. A. and PIZZOLATO, N. D. (2004). Domótica: aplicabilidade e sistemas de automação residencial. *Revista Vértices*, 6:9–32. Disponível em: <http://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/viewFile/1809-667.20040015/86>. Acesso em: 3 mar. 2025.

FERREIRA, M. and LOPES, E. (2009). Sistemas domóticos. *A obra nasce: revista de Arquitectura da Universidade Fernando Pessoa*, pages 77–86.

GALEGALE, G. P., SIQUEIRA, E., SILVA, C. B. H. e., and SOUZA, C. A. d. (2016). Internet das coisas aplicada a negócios - um estudo bibliométrico. *JISTEM - Journal of Information Systems and Technology Management*, 13(3):423–438.

GAST, M. S. (2012). *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*. O'Reilly Media, 2 edition.

GUBBI, J., BUYYA, R., MARUSIC, S., and PALANISWAMI, M. (2013). Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7):1645–1660.

Home Assistant (2025). Home assistant documentation. Acesso em: 11 maio 2025.

IEEE (2011). Ieee standard for low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). Disponível em: <https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2011.html>.

IEEE (2020). Ieee standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks—specific requirements – part 11: Wireless lan mac and phy specifications. Disponível em: <https://standards.ieee.org/standard/802_11-2020.html>.

IEEE (2021). Ieee std 802.11ax-2021: Enhancements for high efficiency wlan. Disponível em: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11ax/8797/>.

IEEE Standards Association (2007). IEEE Std 1451.0-2007 - standard for a smart transducer interface for sensors and actuators - common functions, communication protocols, and transducer electronic data sheet (teds) formats.

IEEE Standards Association (2015). Ieee standard 802.15.4™-2015: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans).

MAIA, G. d. F. (2022). Análise comparativa entre a aplicação das tecnologias wi-fi e zigbee em estudo de caso: casa inteligente. Monografia (graduação em engenharia civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. Orientadora: Micheline Damião Dias Moreira.

SOUSA, A. R. M. d., SANTOS, P. R. d., FONSECA, W. d. S., MANITO, A. R. A., ARAÚJO, R. C. F., and LOBATO, E. P. d. S. (2019). Automação residencial e eficiência energética: um estudo de caso. *Brazilian Journal of Development*, 5(8):13086–13101.

STALLINGS, W. (2021). *Data and Computer Communications*. Pearson, 11 edition.

VECCHI, H. F. and OGATA, R. J. (2009). *Edifícios Inteligentes: uma visão das tecnologias aplicadas: uma visão das tecnologias aplicadas*. Blucher.

VEIGA, E. F. and PEREIRA, J. B. J. (2023). *Sistema de automação residencial inteligente de baixo custo e código aberto*, chapter 8, pages 134–146. s.n. Disponível em: [Inserir link]. Acesso em: [Inserir data de acesso].

WI-FI ALLIANCE (2020). Wi-fi certified wpa3™ security. Disponível em: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/security>.

ZBMICRO - SONOFF Official (2025). Zigbee usb smart adaptor | zbmicro - sonoff official. Disponível em: <https://sonoff.tech/product/diy-smart-switches/zbmicro/>. Acesso em: 02 maio 2025.

Apêndice A

Script de Coleta de Dados MQTT em Python

```
import paho.mqtt.client as mqtt
import csv, os, sys

CENARIOS_ATIVOS = [
    ["MZ", "RZ", "ON", "OFF"],
    ["MZ", "RZ", "OFF", "ON"],
]
BUFFER, COUNT = [], 0

def save(index, t1, t2):
    d1, d2, s1, s2 = SCENARIOS[index]
    path = os.path.join("BASE_DIR", f"{d1}_{d2}", f"{s1}_{s2}.csv")
    with open(path, "a", newline="") as f:
        csv.writer(f).writerow([t1,t2])

def handle_messages(BUFFER):
    timers = [BUFFER.split()[1] for l in BUFFER]
    save(0,timers[0], timers[1])
    save(1,timers[2],timers[3])

def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    client.subscribe("TOPIC_DEFINE")

def on_message(client, userdata, msg):
    global BUFFER, COUNT
    BUFFER.append(msg.payload.decode())
    if len(BUFFER) == 4:
```

```
            handle_messages(BUFFER)
            BUFFER, COUNT = [],COUNT + 1
            if COUNT == 20:
                print("Coleta completa.")
                client.loop_stop()
                sys.exit(0)

def main():
    global client
    client = mqtt.Client()
    client.username_pw_set("MQTT_USERNAME", "MQTT_PASSWORD")
    client.on_connect = on_connect
    client.on_message = on_message
    client.connect("MQTT_BROKER", "MQTT_PORT", 60)
    print("MQTT Ativo...")
    client.loop_forever()

if __name__ == "__main__":
    main()
```