

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC  
ENGENHARIA DE INFORMAÇÃO**

**MATHEUS SILVERIO OLIVEIRA**

**ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS ZIGBEE E WIFI NO  
DESENVOLVIMENTO DE CASAS INTELIGENTES**

**SANTO ANDRÉ - SP**

**2024**

**MATHEUS SILVERIO OLIVEIRA**

**ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS ZIGBEE E WIFI NO  
DESENVOLVIMENTO DE CASAS INTELIGENTES**

Trabalho de Graduação apresentado ao curso de Engenharia de Informação da Universidade Federal do ABC, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Roberto Santana Casella.

**SANTO ANDRÉ - SP**

**2024**

## Lista de figuras

Figura 1 - Modelo De lot Da Itu. Fonte: Itu Y.2060 (06/2012).....	9
Figura 2 – Exemplos De Sensores: (A)Temperatura E Umidade, (B) Gás, (C) Presença E Movimento. Fonte: Autor.....	16
Figura 3 - Exemplos De Atuadores Elétricos: (A) Interruptor, (B) Tomada. Fonte: Autor.....	17
Figura 4 - Exemplos De Outros Atuadores: (A) Motor Tubular, (B) Ventilador Inteligente, (C) Fechadura Inteligente. Fonte: Autor.....	17
Figura 5 - Deslocamento De Chip Na Modulação O-Qpsk. Fonte: Ieee 802.15.4. ....	22
Figura 6 - Sequência De Chips Com Pulso Half-Sine Em Modulação O-Qpsk. Fonte: Ieee 802.15.4. ....	23
Figura 7 – Fluxograma Da Técnica Cdma-SSA Empregada No Zigbee. Fonte: Autor.....	24
Figura 8 - Topologias Estrela E Ponto A Ponto. Fonte: Ieee 802.15.4. ....	24
Figura 9 - Diagrama De Blocos De Uma Transmissão Ofdm. Fonte: National Instruments.....	29
Figura 10 - Subportadoras Ofdm No Domínio Da Frequência. Fonte: National Instruments.....	30
Figura 11 - Reflexão, Difração E Dispersão. Fonte: Material De Aula Esti015-17 (En2620) - Prof Ivan Casella .....	37
Figura 12 - Dados Reais Medidos. Fonte: Rappaport, 2002. ....	50
Figura 13 - Raspberry Pi 4 - Model B. Fonte: Raspberry Pi Website. ....	55
Figura 14 - Esp-8266. Fonte: Espressif Systems. ....	56
Figura 15 - Sonoff Zigbee 3.0 Usb Dongle Plus. Fonte: Sonoff.....	57
Figura 16 - Parte Interna Hub Zb Usb. Fonte: Autor.....	57
Figura 17 – Exemplo De Dashboard Do Home Assistant. Fonte: Home Assistant Website. ....	59
Figura 18 - Diagrama De Funcionamento Da Persiana Inteligente. Fonte: Autor. ....	61
Figura 19 - Hub Zigbee Conectado Ao Raspberry Pi. Fonte: Autor.....	61
Figura 20 - Persiana Com Motor Tubular. Fonte: Autor. ....	62
Figura 21 - Roteador Wifi. Fonte: Autor.....	62

Figura 22 - Interruptor Inteligente. Fonte: Autor. ....	63
Figura 23 - Diagrama De Funcionamento Do Sistema De Interruptor Inteligente. Fonte: Autor.....	64
Figura 24 - Lâmpada Utilizada No Interruptor Inteligente. Fonte: Autor. ....	64
Figura 25 - Interruptor Inteligente Construído A Partir Do Esp8266. Fonte: Autor. ....	65
Figura 26 - Representação Do Ambiente De Testes. Fonte: Autor. ....	66
Figura 27 - (A) Dispositivo Zigbee Xbee S2c E (B) Placa Adaptadora Usb. Fonte: Autor.....	67
Figura 28 - Montagem Do Transmissor (Tx) Para Plataforma Zigbee. Fonte: Autor.....	68
Figura 29 - Montagem Do Receptor (Rx) Para Plataforma Zigbee. Fonte: Autor. ....	69
Figura 30 - Exemplo De Resultado Obtido No Radio Range Test. Fonte: Autor. ....	70
Figura 31 - Análise De Espectro Realizada No Ambiente Residencial. Fonte: Autor.....	71
Figura 32 - Análise De Espectro Realizada Na Câmara Anecoica. Fonte: Autor. ....	72
Figura 33 - Gráfico De Comparação Entre Valores De Snr Calculados Para Plataforma Zigbee. Fonte: Autor. ....	75
Figura 34 - Exemplo De Resultado Obtido No Radio Range Test. Fonte: Autor. ....	76
Figura 35 - Potência Recebida Zigbee Em Função Da Distância. Fonte: Autor. ....	80
Figura 36 - Roteador Tp-Link Deco M4. Fonte: Autor. ....	81
Figura 37 - Computador Com Software InSSIDer. Fonte: Autor.....	81
Figura 38 - Exemplo De Medida Utilizando O Software InSSIDer. Fonte: Autor.	82
Figura 39 - Representação Da Montagem Dos Computadores. Fonte: Autor..	85
Figura 40 - Número De Pacotes E Bytes Analisados Pelo Wireshark. Fonte: Autor.....	85
Figura 41 - Potência Recebida Wifi Em Função Da Distância. Fonte: Autor....	87

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Conversão de símbolo para chip na modulação BPSK. ....	21
Tabela 2 - Padrões IEEE 802.11.....	28
Tabela 3 - Limites de Sensibilidade Mínima para Receptor DSSS.....	35
Tabela 4 – Sensibilidade mínima para receptores WLAN utilizando OFDM. ...	36
Tabela 5 - Valores de Gamma para cada ambiente.....	45
Tabela 6 - Potência média recebida no coordenador e end-device. ....	70
Tabela 7 - Calculo da SNR para as medições realizadas no ambiente residencial e no laboratório. ....	74
Tabela 8 - SNR calculada a partir da potência de ruído teórica. ....	75
Tabela 9 - Pacotes recebidos, perdidos e com erro para plataforma Zigbee. ..	76
Tabela 10 – Parâmetros de taxa de erro determinados para plataforma Zigbee. ....	78
Tabela 11 - PER e BER médias. ....	78
Tabela 12 - Medidas de potência WiFi. ....	83
Tabela 13 – SNR Calculada WiFi.....	84
Tabela 14 - Pacotes recebidos, perdidos e com erro para plataforma WiFi. ....	85
Tabela 15 – Parâmetros de taxa de erro determinados para plataforma WiFi.	85

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>8</b>
1.1 Trabalhos correlatos.....	11
1.2 Motivação e relevância do tema.....	12
1.3 Objetivos .....	13
1.4 Estrutura e organização .....	13
<b>2. Casas inteligentes .....</b>	<b>14</b>
2.1 Conceitos fundamentais.....	14
2.2 Sensores .....	15
2.3 Atuadores.....	16
2.4 Plataformas de gerenciamento e integração.....	18
<b>3. Redes de comunicação Zigbee e WiFi .....</b>	<b>19</b>
3.1 Zigbee .....	19
3.2 WiFi.....	25
3.3 Modelos de canal de propagação .....	36
3.3.1 Modelos de larga escala .....	40
I. Modelo de espaço-livre. ....	40
II. Modelo de espaço-livre modificado.....	43
III. Modelo Okumura-Hata.....	45
3.3.2 Modelos de média escala .....	48
I. Modelo Shadowing (Log-normal) .....	48
3.3.3 Modelos de pequena escala .....	51
I. Modelo de Rayleigh.....	51
II. Efeito doppler.....	52
<b>4. Implementação de um ambiente de casa inteligente.....</b>	<b>54</b>
4.1 Hardware.....	54
4.2 Software .....	58
4.3 Cenários práticos de monitoramento e controle sem fio .....	60
<b>5. Análise das plataformas desenvolvidas empregando as tecnologias Zigbee e WiFi .....</b>	<b>66</b>
5.1 Descrição do ambiente de testes .....	66
5.2 Análise da plataforma desenvolvida empregando a tecnologia Zigbee	67
5.2.1 Parâmetros de desempenho obtidos para plataforma Zigbee .....	69
I. Determinação da potência recebida para plataforma Zigbee.....	69

II.	Determinação da SNR para plataforma Zigbee .....	71
III.	Determinação da PER e BER medidas para plataforma Zigbee.....	76
5.2.2	Medidas de propagação obtidas para plataforma Zigbee .....	79
5.3	Análise da plataforma desenvolvida empregando a tecnologia WiFi ..	80
5.3.1	Parâmetros de desempenho obtidos para plataforma WiFi .....	82
I.	Determinação da potência recebida para plataforma WiFi.....	82
II.	Determinação da SNR para plataforma WiFi .....	83
III.	Determinação da BER e PER Medidas para plataforma WiFi .....	84
5.3.2	Medidas de propagação obtidas para plataforma WiFi .....	86
5.4	Comparação dos resultados obtidos .....	87
<b>6.</b>	<b>Conclusões e pesquisas futuras .....</b>	<b>89</b>
6.1	Principais conclusões.....	89
6.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	89
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>90</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>93</b>

## 1. Introdução

O termo IoT (*Internet of Things*) foi mencionado pela primeira vez em 1999 por Kevin Ashton, pesquisador britânico do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), como forma de descrever um sistema onde a *Internet* está conectada ao mundo físico através de sensores e atuadores, que substituiriam a necessidade da mão humana para digitar, pressionar ou capturar informações do mundo real e transmitir a computadores que já realizavam, desde aquela época, um processamento avançado destes dados e que reduziriam ainda mais desperdícios, perdas e custos, se capazes de coletarem informações sem nenhum tipo de interferência.

Desde então, o progresso tecnológico na área de comunicações, principalmente às comunicações sem fio, tem viabilizado a conexão e troca de dados entre os mais diversos dispositivos de maneira simultânea e em tempo real. Estas são excelentes condições para o desenvolvimento e popularização destes dispositivos capazes de analisar e capturar condições físicas, transformá-las em bits e enviar a outros dispositivos que processam os dados. Por sua vez, surge também uma nova classe de dispositivos, os atuadores, que executam ações desde as mais simples como ligar ou desligar outro dispositivo, até as mais complexas como conduzir um veículo, baseando-se no conjunto de condições capturadas.

Em 2012, a IoT foi definida na Recomendação da *International Telecommunication Union* (ITU) Y.2060 (06/2012) como “*Uma infraestrutura global para a sociedade da informação, possibilitando serviços avançados ao interligar (fisicamente e virtualmente) coisas com base em tecnologias de informação e comunicação interoperáveis existentes e em evolução.*”

Ainda nesta recomendação, a ITU menciona a expectativa de que a IoT integre amplamente tecnologias relacionadas à comunicação avançada de máquina para máquina, redes autônomas, mineração de dados e tomada de decisões, além de segurança proteção de privacidade e computação em nuvem, com tecnologias para sensoriamento e atuação avançados.

Na Figura 1, é possível verificar o modelo de referência de IoT conforme o entendimento da ITU.

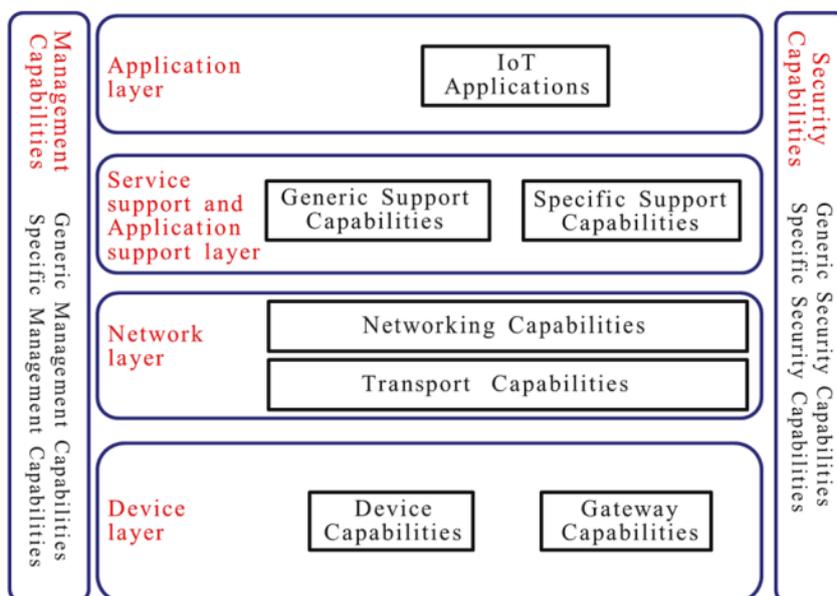


Figura 1 - Modelo de IoT da ITU. Fonte: ITU Y.2060 (06/2012).

A camada de aplicação, possui as aplicações de IoT, enquanto a camada de suporte consiste em capacidades genéricas compartilhadas por várias aplicações, como processamento e armazenamento de dados, além de capacidades específicas adaptadas às necessidades individuais de cada aplicação. Essas capacidades oferecem suporte essencial para o funcionamento eficiente e personalizado dos sistemas IoT.

A camada de rede é dividida em duas categorias de capacidades: uma destinada ao controle da conectividade de rede, incluindo funções de acesso e transporte, e a outra responsável por facilitar a comunicação de dados entre dispositivos e sistemas IoT, incluindo informações de serviço, controle e gerenciamento.

Na camada de dispositivo, as capacidades podem ser divididas em dois tipos principais: as capacidades do dispositivo, que abrangem a interação direta e indireta com a rede de comunicação, a formação de redes *Ad-hoc* e o gerenciamento de repouso para economia de energia. Essas capacidades permitem que os dispositivos coletem, enviem e recebam informações de forma eficiente. Por outro lado, as capacidades do *gateway* na camada de dispositivo suportam a comunicação entre dispositivos e a rede utilizando diferentes

tecnologias de comunicação, como WiFi (*Wireless Fidelity*), Bluetooth ou Zigbee, além de converter protocolos de comunicação, garantindo a interoperabilidade entre dispositivos e redes.

A camada de gerenciamento abrange funções essenciais de falhas, configuração, contabilidade, desempenho e segurança, semelhantes às redes tradicionais. Elas são divididas em capacidades genéricas, como gerenciamento de dispositivos e de tráfego, e capacidades específicas, que atendem requisitos particulares de aplicativos, como monitoramento de linhas de energia em uma grade inteligente. Essas capacidades são fundamentais para garantir o funcionamento eficiente e seguro dos sistemas IoT.

A camada de segurança também está dividida em recursos genéricos e específicos. As capacidades genéricas abrangem autorização, autenticação e proteção de dados em diferentes camadas - aplicação, rede e dispositivo. Já as capacidades específicas estão vinculadas aos requisitos particulares de aplicativos, como segurança de pagamentos móveis. Essas medidas são essenciais para garantir a proteção dos sistemas IoT contra ameaças e vulnerabilidades.

Tanto a camada de gerenciamento quanto a camada de segurança, executam funções ou ações em todas as outras.

Na prática, é possível aplicar o conceito de IoT nos mais diversos setores e em sua grande maioria sua capacidade de conectar dispositivos e permitir a troca de dados em tempo real oferece uma série de vantagens práticas em termos de eficiência, automação e tomada de decisões informadas.

Em residências inteligentes, que serão o foco deste trabalho, a IoT pode ser utilizada para controlar dispositivos domésticos remotamente, como termostatos, sistemas de segurança, iluminação e eletrodomésticos, proporcionando maior conforto e conveniência aos moradores. Além disso, a IoT pode ajudar na conservação de energia, ajustando automaticamente o consumo de eletricidade com base na ocupação e nas condições climáticas. Todos os aspectos relacionados a este contexto serão abordados de maneira detalhada a seguir.

## 1.1 Trabalhos correlatos

Vários estudos e publicações de distintos pesquisadores abordam temas relacionados à IoT e suas aplicações específicas direcionadas às casas inteligentes como, por exemplo, os trabalhos detalhados a seguir:

*An iot-based smart home automation system* (Stolojescu-Crisan, C.; Crisan, C.; et al, 2021) onde uma solução de automação residencial baseada em IoT é implementada utilizando uma variedade de componentes de *hardware* e *software* para possibilitar o controle remoto e a automação de dispositivos domésticos, além do controle de potência e consumo de todo o sistema. A implementação utiliza o *software* qToggle que fornece uma interface de programação de aplicativos HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) que permite o controle remoto de dispositivos e portas de *hardware*, como GPIOs (*General Purpose Input/Output*) e ADCs (*Analog to Digital Converter*). Em termos de *hardware*, são utilizadas placas *Raspberry Pi* 3 ou 4, que servem como o cérebro central do sistema, oferecendo poder computacional e conectividade. Além disso, também são utilizados módulos WiFi ESP 8266 para comunicação sem fio entre os dispositivos e a *Raspberry Pi*, bem como dispositivos inteligentes como sensores e atuadores. As informações de potência e consumo são enviadas diretamente para o aplicativo qToggle que possibilita visualização e monitoramento utilizando uma interface gráfica.

Em *Enabling iot services using WiFi - zigbee gateway for a home automation system* (Vivek G.V, Sunil M.P) é apresentada uma solução de automação residencial inteligente que utiliza comunicação distribuída através de nós zigbee. Esses nós se comunicam sem fio com um coordenador, que está conectado a uma placa Linux ou a um painel de controle, responsável por enviar comandos aos dispositivos Zigbee presentes no ambiente. Além disso, o sistema integra uma placa Cubietruck com um módulo WiFi, permitindo a transmissão de dados do sensor em tempo real para a *Internet* via protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). Esse componente atua como um *gateway*, facilitando o acesso remoto e local aos sensores e atuadores, garantindo a conectividade entre dispositivos Zigbee e WiFi. Com isso, é possível monitorar e controlar diversos aspectos do ambiente residencial, como temperatura, luminosidade e segurança. A implementação inclui a conexão dos

sensores e atuadores a diferentes eletrodomésticos, proporcionando conforto e aumentando a qualidade de vida dos usuários. O sistema é capaz de monitorar o consumo de energia em tempo real pela *Internet*, oferecendo acesso remoto aos dispositivos residenciais.

Na publicação *Smart android based home automation system using Internet of things* (Khan, M.A.; Ahmad, I.; Nordin, A.N.; Ahmed, A.E.-S.; Mewada, H.; Daradkeh, Y.I.; Rasheed, S.; Eldin, E.T.; Shafiq, M) é apresentada uma solução para automação residencial inteligente utilizando placas *Raspberry Pi* e ESP8266, conhecidos por sua acessibilidade e facilidade de uso. O sistema implementa uma API (*Application Programming Interface*) central que permite uma arquitetura de rede flexível e adaptável. O objetivo é criar um protótipo funcional de casa inteligente, oferecendo recursos como controle, automação, segurança e monitoramento com foco na privacidade do usuário, garantindo que as informações permaneçam dentro da rede local doméstica. Uma das principais contribuições deste trabalho é a capacidade de adaptação do sistema, que permite a integração de diferentes dispositivos e tecnologias. Além disso, a pesquisa enfatiza o controle individualizado do *firmware* de cada dispositivo para garantir personalização, segurança e unificação da API.

## **1.2 Motivação e relevância do tema**

Considerando o exposto, a IoT desempenha um papel fundamental na transformação das residências tradicionais em espaços inteligentes, que através dos dispositivos conectados permitem um melhor entendimento dos padrões de uso possibilitando uma tomada de decisão mais inteligente, principalmente com relação a eficiência no uso de recursos como energia, água e o próprio tempo dos usuários.

Sendo assim, se fazem necessários estudos de casos reais da implementação destas diversas tecnologias, capturando diversas condições do ambiente, coexistindo e atuando em condições reais, e verificando através de métricas e indicadores a sustentabilidade e escalabilidade destes sistemas.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo desta pesquisa é investigar a performance e escalabilidade de dispositivos inteligentes Zigbee e WiFi em um caso real de implementação de casa inteligente. Para isso, serão analisadas as características de desempenho dessas tecnologias em um ambiente residencial inteligente real, considerando fatores como transmissão, alcance e estabilidade. Além disso, será avaliada a capacidade de escalabilidade dos sistemas Zigbee e WiFi, baseando-se em modelos de canal de propagação.

### **1.4 Estrutura e organização**

Além deste capítulo introdutório, que apresenta uma visão geral do cenário atual da utilização de IoT, este trabalho de graduação segue a seguinte estrutura:

Capítulo 2: Explora os conceitos fundamentais de casas inteligentes, com foco nos sensores, atuadores e plataformas de gerenciamento e integração, componentes fundamentais para o funcionamento automatizado de um ambiente inteligente.

Capítulo 3: Discute as principais tecnologias de comunicação utilizadas em casas inteligentes, como Zigbee e WiFi, além de descrever os modelos de canal de propagação.

Capítulo 4: Detalha o processo de desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle sem fio para casas inteligentes, com foco nos componentes de *hardware*, *software* e analisando 2 casos de implementação.

Capítulo 5: Apresenta a configuração dos testes realizados para medir o desempenho das redes Zigbee e WiFi. As métricas analisadas incluem potência RSSI, SNR, PER e BER, além de medidas de propagação. Neste capítulo também será apresentada uma análise dos resultados obtidos para as plataformas Zigbee e WiFi.

Capítulo 6: Resume os principais resultados obtidos no decorrer do trabalho, avaliando o alcance dos objetivos propostos e sugerindo direções para futuros estudos.

## 2. Casas inteligentes

Este capítulo é dedicado a base conceitual do tema casas inteligentes, explicando os princípios fundamentais que sustentam seu funcionamento. Além disso, explorando os papéis essenciais dos sensores, atuadores e plataformas de gerenciamento e integração que possibilitam a automação e o controle eficiente do ambiente residencial.

### 2.1 Conceitos fundamentais

Como mencionado anteriormente, o conceito de IoT descreve um sistema onde o mundo físico é conectado à *Internet* sem que haja intervenção humana na transformação de dados reais para bits, e que os sensores e atuadores possibilitariam a captura e transformação destes dados.

Uma casa inteligente é uma residência que utiliza tecnologia de automação para controlar e gerenciar diversos dispositivos, visando aumentar o conforto, a segurança, o uso eficiente de recursos e a conveniência para os moradores. Esses sistemas e dispositivos podem incluir iluminação, temperatura ambiente, sistemas de segurança, eletrodomésticos, entre outros. A integração desses elementos permite que os usuários controlem e monitorem sua casa remotamente, geralmente por meio de *smartphones*, *tablets* ou qualquer outro dispositivo com acesso à *Internet*. O objetivo é criar um ambiente residencial que responda de forma inteligente às necessidades e preferências dos moradores, oferecendo uma experiência de vida mais conectada e personalizada.

O funcionamento de uma casa inteligente está intrinsecamente ligado à captura de diversas condições físicas através de sensores, tais como temperatura, umidade, luminosidade e horário do dia, entre outras variáveis. Esses dados são então transmitidos através de redes de comunicação para um dispositivo central ou para a nuvem, onde são processados. Com base em condições predefinidas pelo usuário, são enviados comandos para atuadores, os quais executam ações que efetivamente modificam o ambiente físico da residência ou fornecem uma resposta ao usuário, como será apresentado mais à frente através de exemplos práticos.

## 2.2 Sensores

Os sensores são dispositivos que detectam grandezas físicas e atuam em conjunto com transdutores que realizam a conversão dessa grandeza em um sinal tipicamente elétrico mensurável, permitindo assim a detecção e a medição de diferentes variáveis do ambiente e também a transmissão destes dados em formato de bits utilizando uma rede de comunicação.

Esses dispositivos desempenham um papel fundamental em casas inteligentes. Entre os principais exemplos estão: Sensores de temperatura e umidade, de presença e movimento, além de sensores de gás e fumaça. A seguir, são apresentados detalhes sobre cada um deles.

**Sensor de temperatura e umidade:** Este dispositivo é apresentado na Figura 2.A e verifica a temperatura e a umidade do ar sendo útil para controlar estas condições em um ambiente seja acionando ar condicionados, sistemas de ventilação ou umidificação, entre outros.

**Sensor de gás e fumaça:** Detecta a presença de gases específicos e/ou fumaça no ambiente e é utilizado principalmente em sistemas de segurança, na Figura 2.B é apresentado um exemplo destes dispositivos.

**Sensor de presença e movimento:** Estes dispositivos são muito similares sendo destinados a verificar a presença e os movimentos em um ambiente geralmente através das mudanças na radiação infravermelha emitida por objetos em seu campo de visão. Este tipo de dispositivo é utilizado principalmente para automatizar sistemas de iluminação e na Figura 2.C é apresentado um exemplo com sensores de presença e movimento integrados que serão detalhados a seguir.



Figura 2 – Exemplos de sensores: (A) Temperatura e umidade, (B) Gás, (C) Presença e movimento.  
Fonte: Autor.

### 2.3 Atuadores

Os atuadores são dispositivos que convertem sinais elétricos, eletrônicos ou digitais em ações físicas, como movimento, emissão de luz, som, entre outros. Eles permitem que as informações coletadas pelos sensores sejam transformadas em respostas físicas, seja de forma direta ou com o auxílio de dispositivos intermediários ou de processamento em nuvem. Exemplos comuns incluem atuadores de movimento, elétricos, de climatização e de segurança. A seguir, são apresentados detalhes sobre cada um deles.

Atuadores elétricos: Estes atuadores são responsáveis por controlar dispositivos elétricos, como interruptores e tomadas principalmente. Eles são ativados por meio de sinais elétricos e permitem controlar o acionamento e fornecimento de energia para um outro dispositivo ligado a ele. Esta classe de atuador também é muito utilizada para transformar dispositivos normais em dispositivos inteligentes, como por exemplo: Uma lâmpada comum que pode ser acionada via comando de voz para um interruptor inteligente; ou uma cafeteira comum que pode ser acionada em um horário específico por estar ligada a uma tomada inteligente. Na Figura 3.A e Figura 3.B é possível verificar um exemplo real de interruptor e tomada inteligente respectivamente.



Figura 3 - Exemplos de atuadores elétricos: (A) Interruptor, (B) Tomada. Fonte: Autor.

Atuadores de movimento: Estes atuadores são responsáveis por gerar movimento físico em resposta a um sinal de controle. Eles são comumente motores pequenos e médios usados em portas automáticas, janelas motorizadas, cortinas automáticas, entre outros. Na Figura 4.A é apresentado um motor tubular para persianas.

Atuadores de climatização: Estes atuadores são responsáveis por controlar sistemas de aquecimento, ventilação e temperatura do ambiente e podemos resumi-los a aquecedores, ar-condicionado e ventiladores, que podem ser acionados automaticamente. Na Figura 4.B é apresentado um ventilador inteligente.

Atuadores de Segurança: Estes atuadores são dispositivos de segurança, como travas de portas, fechaduras eletrônicas, alarmes, entre outros. Eles garantem a segurança da casa e dos moradores e geralmente são ativados por meio de sensores de movimento, de portas ou janelas, entre outros. Na Figura 4.C é apresentado uma fechadura inteligente.



Figura 4 - Exemplos de outros atuadores: (A) Motor tubular, (B) Ventilador inteligente, (C) Fechadura inteligente. Fonte: Autor.

## **2.4 Plataformas de gerenciamento e integração**

Plataformas de gerenciamento e integração de uma casa inteligente correspondem a parte lógica do sistema de automação, que seriam os *softwares* que realizam a interface com o usuário e que possibilitam a configuração dos parâmetros e comportamentos desejados, além do armazenamento de dados como consumo de energia, histórico de acionamentos e transmissão de dados, índices de eficiência, entre outros.

Geralmente são utilizadas plataformas agregadoras de dispositivos fornecidas pelos fabricantes ou por terceiros que ficam hospedadas na *Internet* ou em servidores locais. Estas plataformas além de agregar os dispositivos, recebem informações dos sensores e enviam aos atuadores, realizando o processamento de acordo com os parâmetros configurados pelo usuário, estes comportamentos configurados são denominados automações ou cenas e se baseiam em um modelo de gatilhos, condições e ações.

### **3. Redes de comunicação Zigbee e WiFi**

As redes de comunicação são cruciais em uma casa inteligente, elas fornecem a infraestrutura necessária para conectar e controlar os componentes presentes na casa, possibilitando a transmissão das informações. A transmissão de dados em uma casa inteligente pode ocorrer com intermédio da *Internet*, onde os dispositivos enviam e recebem informações a servidores na rede, ou por meio de uma rede local onde todos os dados permanecem em uma infraestrutura dentro da própria casa em pequenos servidores virtuais ou físicos. Além da possibilidade de conexão ou não com a *Internet*, a conexão pode ocorrer por método sem fio ou cabeado.

Considerando que o foco deste trabalho envolve a investigação dos protocolos sem fio Zigbee e WiFi, além de suas aplicações em casas inteligentes, a seguir serão apresentados mais detalhes a respeito de ambos.

#### **3.1 Zigbee**

O Zigbee foi criado para atender à demanda de uma tecnologia de comunicação sem fio de baixa potência e baixo custo, ideal para redes de sensores e automação, especialmente em aplicações de IoT. Em 2002, a Zigbee Alliance foi formada como uma organização que reúne empresas do setor de tecnologia para desenvolver e promover o padrão Zigbee. A tecnologia foi projetada sobre o padrão IEEE 802.15.4, estabelecido em 2003, que define as especificações da camada física (PHY) e controle de acesso de meio (MAC) (IEEE, 2016).

A Zigbee Alliance desenvolveu camadas de aplicação e rede que aumentam as funcionalidades do IEEE 802.15.4, incluindo segurança, topologias flexíveis (estrela e malha), e facilidade de uso em redes de dispositivos com baixo consumo de energia. O objetivo central era oferecer uma alternativa leve e eficiente para redes de curto alcance, como Bluetooth e WiFi, mas com foco em conectividade para dispositivos que precisavam funcionar por longos períodos com baterias de baixa capacidade (ZIGBEE ALLIANCE, 2015).

O Zigbee opera em três faixas de frequência principais, definidas pela norma IEEE 802.15.4 e promovidas pela Zigbee Alliance, para maximizar a compatibilidade em diferentes regiões:

1. **868 MHz:** Essa faixa oferece um único canal de comunicação. Ela é ideal para aplicações com baixa densidade de dispositivos e onde não há necessidade de uma alta taxa de transferência de dados.
2. **915 MHz:** Essa faixa oferece até 10 canais. Ela é usada em aplicações de curto alcance e baixa taxa de dados, proporcionando um equilíbrio entre eficiência energética e capacidade de conexão em redes com um número moderado de dispositivos.
3. **2,4 GHz:** Esta faixa oferece 16 canais e é a mais utilizada devido à sua ampla disponibilidade e compatibilidade. Ela permite a comunicação em redes de alta densidade e é ideal para aplicações de IoT que exigem maior robustez e interoperabilidade entre dispositivos.

Os dispositivos Zigbee escolhem canais automaticamente durante a formação de redes para evitar interferências e garantir a estabilidade, especialmente na faixa de 2,4 GHz, que é compartilhada com outras tecnologias, como WiFi e Bluetooth. Embora alguns dispositivos possibilitem a escolha manual do canal de operação.

A especificação Zigbee, baseada no padrão IEEE 802.15.4, define a camada PHY para comunicação sem fio, incluindo as opções O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*) em 2,4 GHz e BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) nas bandas de 868 MHz e 915 MHz. Cada banda possui um conjunto específico de canais, organizados em ordem numérica: 0 para 868 MHz, de 1 a 10 para 915 MHz e de 11 a 26 para 2450 MHz. Dispositivos Zigbee compatíveis devem suportar todos os canais listados e, no caso das PHYs de 868 ou 915 MHz, devem ser compatíveis com ambas as bandas (ZIGBEE ALLIANCE, 2015).

As modulações PSK (*Phase Shift Keying*) são técnicas de modulação digital que transmitem dados por meio da variação da fase de uma onda portadora. Em uma modulação PSK, a informação é codificada nos diferentes estados de fase de um sinal, permitindo que múltiplos bits sejam transmitidos por símbolo.

O BPSK, utilizado nas bandas de 868 MHz e 915 MHz é uma técnica de modulação de fase binária que utiliza duas fases distintas, 0° e 180°, para

representar os bits 0 e 1. Na modulação BPSK, o sinal de dados modifica a fase da portadora para uma dessas duas fases, o que resulta em mudanças abruptas de fase nas transições entre símbolos, especialmente se o fluxo de dados alternar entre 0 e 1. Essas transições bruscas são características da BPSK, que é representada graficamente por vetores opostos em um diagrama polar. Este tipo de modulação é conhecido por ser simples e robusto contra ruído, sendo adequada para comunicações de baixa taxa de dados como o caso do Zigbee (IEEE, 2016).

Para as bandas de 868 MHz e 915 MHz, cada bit de informação é mapeado em uma sequência de chips. Essas sequências são empregadas para espalhar o sinal no espectro utilizando o espalhamento espectral por sequência direta (DSSS), aumentando sua largura de banda e melhorando sua robustez contra interferências e ruídos. Um chip é a menor unidade de duração na sequência de código pseudoaleatório, onde cada bit de entrada deve ser mapeado a uma sequência de 15 chips como especificado na Tabela 1 (IEEE, 2016).

**Tabela 1 – Conversão de símbolo para chip na modulação BPSK.**

Input bits	Chip values (c <sub>0</sub> c <sub>1</sub> ... c <sub>14</sub> )
0	1 1 1 1 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 0 0
1	0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 0 1 1 1 1

Fonte: IEEE 802.15.4.

As sequências de chips são moduladas na portadora usando modelagem de pulso de cosseno levantado (*Raised Cossine*) empregando um fator de *roll-off* = 1, onde um valor de chip igual a um corresponde a um pulso positivo e um valor de chip igual a zero corresponde a um pulso negativo. A taxa de chips é de 300 kcps para a banda de 868 MHz e de 600 kcps na banda de 915 MHz (IEEE, 2016).

A forma de pulso de cosseno levantado (fator de *roll-off* = 1) usada para representar cada chip é descrita da seguinte forma:

$$p(t) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi t/T_c)}{\pi t/T_c} \times \frac{\cos(r\pi t/T_c)}{1-4r^2 t^2/T_c^2}, & t \neq 0 \\ 1, & t = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

A taxa de símbolos de um PHY do padrão BPSK deve ser de 20 ksps ao operar na banda de 868 MHz e de 40 ksps ao operar na banda de 915 MHz com uma precisão de  $\pm 40 \times 10^{-6}$ .

Sob as condições especificadas, para operar nas bandas de 868 MHz e 915 MHz o dispositivo deve ser capaz de atingir uma sensibilidade do receptor de -92 dBm ou melhor, sendo que a taxa de erro de pacote (PER) deve ser inferior e 1% (IEEE, 2016).

A banda de 2.4 GHz utiliza uma modulação derivada do QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) o O-QPSK, onde são utilizadas quatro fases ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ , e  $270^\circ$ ), permitindo a transmissão de dois bits por símbolo. Com isso, temos o dobro da taxa de dados em comparação com a BPSK. Adicionalmente, no O-QPSK o sinal em quadratura (Q) é deslocado no tempo em relação ao sinal em fase (I). Esse deslocamento reduz as transições bruscas de fase, diminuindo a geração de espúrios no processo de comunicação e tornando-a ideal para aplicações de baixa potência, como no Zigbee.

As sequências de chips em 2.4 GHz, são formatadas por pulsos de *half-sine* (meio-seno). Os chips de índice par são modulados na portadora em fase (I), e os chips de índice ímpar são modulados na portadora em quadratura (Q). Para formar o deslocamento entre a modulação dos chips em fase (I) e em quadratura (Q), os chips da fase Q são atrasados por  $T_c$  em relação aos chips da fase I, conforme ilustrado na Figura 5, onde  $T_c$  é a duração de chip (IEEE, 2016).

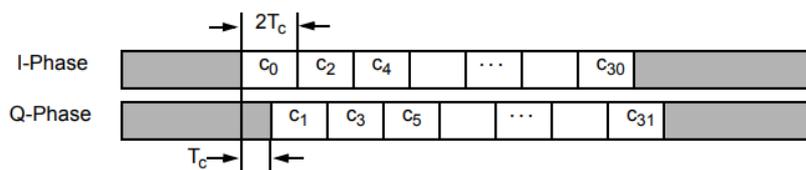


Figura 5 - Deslocamento de chip na modulação O-QPSK. Fonte: IEEE 802.15.4.

Em 2.4 GHz, a forma de pulso *half-sine* usada para representar cada chip é definida da seguinte forma:

$$p(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi t}{2T_c}\right), & 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0, & \text{Caso contrário} \end{cases} \quad (3.2)$$

A Figura 6 representa uma sequência de chips com pulso *half-sine* e as modulações em fase (I) e em quadratura (Q).

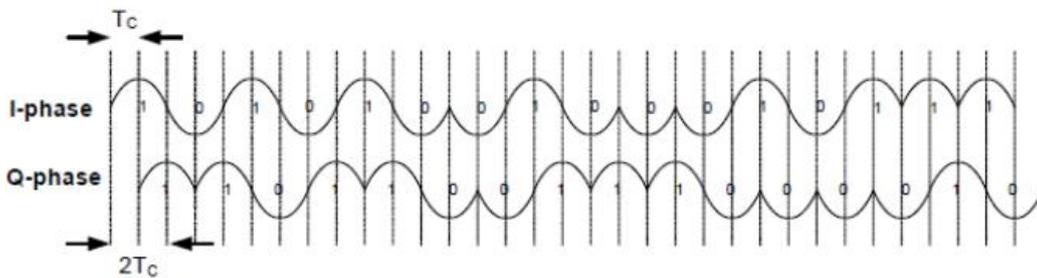


Figura 6 - Sequência de chips com pulso *half-sine* em modulação O-QPSK. Fonte: IEEE 802.15.4.

A taxa de símbolo PHY O-QPSK deve ser de 62,5 kbps ao operar na banda 2.4 GHz com uma precisão de  $\pm 40 \times 10^{-6}$ .

Sob as condições especificadas, para operar em 2.4 GHz um dispositivo compatível deve ser capaz de alcançar uma sensibilidade de receptor de -85 dBm ou melhor, sendo que a PER deve ser inferior a 1% (IEEE, 2016).

A camada MAC é responsável pelo controle de acesso ao meio de comunicação em redes de dados. Sua função é coordenar o uso do canal de comunicação entre diferentes dispositivos para evitar colisões e garantir uma comunicação eficiente e ordenada.

O CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) é o algoritmo utilizado pelo Zigbee para controlar o acesso ao canal de comunicação e evitar colisões entre dispositivos. Antes de transmitir dados, o dispositivo verifica se o canal está livre. Caso esteja ocupado, ele espera um período de "*backoff*" antes de tentar novamente.

Para cada tentativa de transmissão, o dispositivo mantém três variáveis:

- **NB**: Número de tentativas de *backoff* já realizadas.
- **CW**: Tamanho da janela de contenção, definindo quantos períodos de *backoff* o canal deve permanecer livre.
- **BE**: Expoente de *backoff*, que determina o tempo de espera antes de verificar o canal novamente.

Se o canal permanecer livre pelo tempo necessário, o dispositivo transmite. Caso contrário, ele recomeça o processo. Esse mecanismo é

essencial para minimizar colisões e garantir um uso eficiente do canal em redes Zigbee. Na Figura 7, é apresentada uma representação simplificada do funcionamento do CSMA-CA no Zigbee (IEEE, 2016).

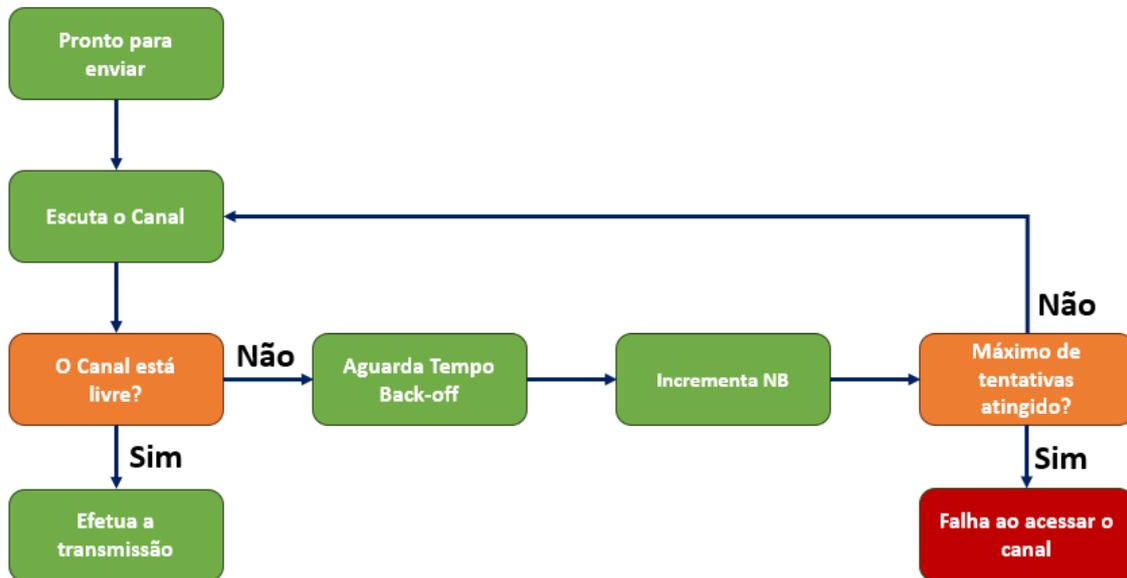


Figura 7 – Fluxograma da técnica CSMA-CA empregada no Zigbee. Fonte: Autor.

Dependendo dos requisitos da aplicação, uma rede Zigbee pode operar utilizando uma topologia em estrela ou de ponto a ponto. Ambas são apresentadas na Figura 8 (IEEE, 2016).

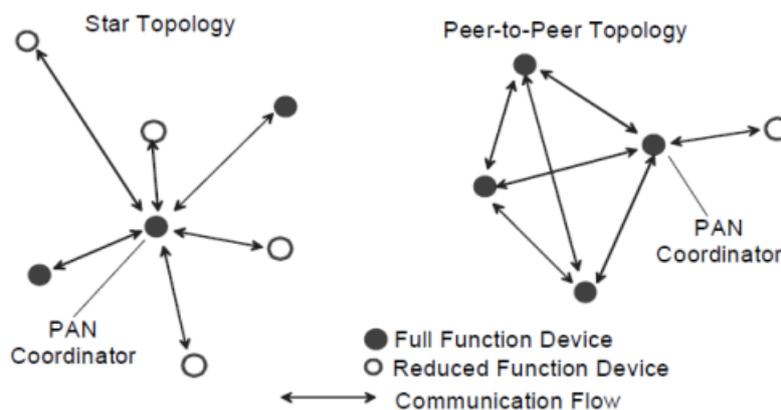


Figura 8 - Topologias estrela e ponto a ponto. Fonte: IEEE 802.15.4.

Na topologia em estrela, a comunicação é estabelecida entre dispositivos e um único controlador central, chamado coordenador. Um dispositivo normalmente tem alguma aplicação associada e é o ponto de início ou o ponto final para comunicações de rede. O coordenador é o controlador principal da rede. Todos os dispositivos operando em uma rede de qualquer uma das

topologias têm endereços exclusivos, chamados de endereços estendidos. Além disso, um dispositivo pode receber um endereço curto durante o processo de associação. Um dispositivo qualquer usará o endereço estendido ou o endereço curto para a comunicação dentro da rede. O coordenador geralmente será alimentado pela rede elétrica, enquanto os dispositivos provavelmente serão alimentados por bateria.

A topologia ponto a ponto também tem um coordenador; no entanto, ela difere da topologia em estrela, pois qualquer dispositivo pode se comunicar com qualquer outro dispositivo desde que estejam dentro do alcance um do outro. A topologia ponto a ponto permite que formações de rede mais complexas sejam implementadas, como topologias de rede em malha. Aplicações como controle e monitoramento industrial, redes de sensores sem fio, rastreamento de ativos e gerenciamento de inventário, além de segurança, se beneficiariam de tal topologia de rede.

O Zigbee implementa um conjunto robusto de serviços de segurança que inclui o estabelecimento e transporte de chaves, proteção de quadros e gerenciamento de dispositivos. Esses serviços são a base para políticas de segurança dentro de uma rede Zigbee e são projetados para proteger as interfaces entre diferentes dispositivos e entre camadas de pilha.

A segurança no Zigbee depende da proteção das chaves simétricas, dos mecanismos de proteção aplicados e da implementação correta das políticas de segurança e criptografia. A arquitetura de segurança do Zigbee assume que os dispositivos não irão transmitir materiais de chave fora do ambiente protegido e que geradores de números aleatórios funcionam conforme esperado. Para reduzir custos, assume-se um modelo de confiança aberto, em que diferentes aplicações usando o mesmo dispositivo compartilham os recursos de segurança, o que exige uma separação lógica das camadas (ZIGBEE ALLIANCE, 2015).

### **3.2 WiFi**

O WiFi é uma tecnologia que permite a conexão de diversos dispositivos eletrônicos à *Internet* ou a troca de dados entre eles sem a necessidade de cabos, utilizando ondas de rádio. A WiFi Alliance define como dispositivos WiFi todos dispositivos de Rede Local Sem Fio (WLAN) que seguem os padrões IEEE

802.11, estabelecidos pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (TEKTRONIX, 2013).

Uma das principais vantagens dos dispositivos IEEE 802.11 é a possibilidade de criação de Redes Locais (LANs) de forma mais econômica. Em locais onde não é viável instalar cabos para cada dispositivo, como áreas ao ar livre e aeroportos, esses dispositivos suportam a implantação de redes LAN sem fio. Produtos de diferentes fabricantes conseguem interoperar em um nível básico de serviço devido à certificação "WiFi *Certified*" emitida pela WiFi Alliance (TEKTRONIX, 2013).

Desde sua criação em 1980, o comitê IEEE 802 tem liderado o desenvolvimento de padrões para redes LAN. O trabalho do comitê em redes WLANs começou em 1987, dentro do grupo de trabalho 802.4. Inicialmente, o objetivo era desenvolver uma WLAN na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), utilizando um protocolo MAC com passagem de token. No entanto, após algumas análises, o comitê concluiu que esse modelo resultaria em uma utilização ineficiente do espectro de rádio. Em 1990, foi formado um novo grupo de trabalho, o IEEE 802.11, especificamente dedicado às WLANs, com a missão de desenvolver os protocolos para camadas PHY e MAC (STALLINGS, 2004).

Desde então, a demanda por WLANs com diferentes frequências e taxas de dados cresceu significativamente. Para atender a essa demanda, o grupo de trabalho IEEE 802.11 tem emitido uma lista cada vez maior de padrões. Assim, podemos dizer que o WiFi que conhecemos hoje é o resultado de uma evolução contínua de vários padrões.

A versão original do padrão IEEE 802.11 foi lançada em 1997, mas atualmente é considerada obsoleta. Ela especificava taxas de transmissão de 1 ou 2 megabits por segundo (Mbps) e incluía três tecnologias alternativas para a camada física:

- Infravermelho (IR) difuso operando a 1 Mbps;
- Espectro espalhado por salto de frequência (FHSS), com taxas de 1 Mbps ou 2 Mbps;

- Espectro espalhado por sequência direta (DSSS), com taxas de 1 Mbps ou 2 Mbps.

As duas últimas tecnologias de rádio utilizavam transmissão por micro-ondas na banda ISM de 2,4 GHz. A taxa de dados era transmitida através de sinais infravermelhos (IR) ou por sinais de rádio usando as técnicas de FHSS ou DSSS. Embora o infravermelho faça parte da especificação, ele não teve implementações práticas (TEKTRONIX, 2013).

O DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) é uma técnica de espalhamento espectral que aumenta a largura de banda do sinal transmitido ao multiplicá-lo por uma sequência pseudoaleatória. Essa técnica espalha o sinal sobre uma faixa mais ampla de frequências, o que o torna menos suscetível a interferências e melhora a segurança da transmissão. No DSSS, cada bit de dados é representado por múltiplos bits do código de espalhamento, o que ajuda a reduzir os efeitos de ruído e interferência.

Já o FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) é outra técnica de espalhamento espectral que consiste em alterar a frequência da portadora de forma pseudoaleatória em intervalos regulares. O sinal "salta" entre diferentes frequências dentro de uma faixa predefinida, o que torna a transmissão menos vulnerável a interferências em uma única frequência. Essa abordagem ajuda a evitar interferências e melhora a robustez do sistema em ambientes onde outras transmissões podem ocupar as mesmas frequências.

Uma limitação desse padrão inicial era a quantidade de opções oferecidas, o que tornava a interoperabilidade entre dispositivos um desafio. Na prática, esse padrão era mais uma "especificação beta" do que uma norma rígida, permitindo que os fabricantes desenvolvessem produtos diferenciados, mas com pouca compatibilidade entre eles.

A versão DSSS do padrão IEEE 802.11 foi rapidamente complementada (e popularizada) pela emenda IEEE 802.11b em 1999, que aumentou a taxa de transmissão para 11 Mbps. A ampla adoção de redes IEEE 802.11 só ocorreu após o lançamento do IEEE 802.11b, e, por isso, poucas redes foram implementadas com o padrão original IEEE 802.11-1997 (TEKTRONIX, 2013).

A Tabela 2 a seguir apresenta os padrões IEEE 802.11 e suas principais características, que serão detalhadas nas seções seguintes.

**Tabela 2 - Padrões IEEE 802.11.**

Data de Lançamento	Padrão	Faixa de Frequência	Largura de Banda (MHz)	Modulação	Tecnologias de Antena Avançadas	Taxa de Dados Máxima	Protocolo MAC
1997	802.11	2,4 GHz	20 MHz	DSSS, FHSS	N/A	2 Mbit/s	CSMA/CA
1999	802.11b	2,4 GHz	20 MHz	DSSS	N/A	11 Mbit/s	CSMA/CA
1999	802.11a	5 GHz	20 MHz	OFDM	N/A	54 Mbit/s	CSMA/CA
2003	802.11g	2,4 GHz	20 MHz	DSSS, OFDM	N/A	54 Mbit/s	CSMA/CA
2009	802.11n	2,4 GHz, 5 GHz	20 MHz, 40 MHz	OFDM	MIMO, até 4 fluxos espaciais	600 Mbit/s	CSMA/CA
2013	802.11ac	5 GHz	40 MHz, 80 MHz, 160 MHz	OFDM	MIMO, MU-MIMO, até 8 fluxos espaciais	6,93 Gbit/s	CSMA/CA
2019	802.11ax	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz	OFDMA	MU-MIMO, até 8 fluxos espaciais	9,6 Gbit/s	CSMA/CA, OFDMA

Fonte: Autor.

### IEEE 802.11b

O padrão IEEE 802.11b possui uma taxa de dados bruta máxima de 11 Mbps e utiliza o método de acesso ao meio CSMA/CA, o mesmo protocolo de acesso definido no padrão original "*legacy*". Como abordado anteriormente para o Zigbee, o CSMA/CA no WiFi funciona de forma semelhante, visando evitar colisões antes que elas ocorram. Em redes sem fio, o dispositivo verifica se o canal está livre antes de iniciar a transmissão. Caso o canal esteja ocupado, ele aguarda um intervalo de tempo aleatório (*backoff*) antes de tentar novamente. Essa técnica é fundamental para redes WiFi, onde as colisões são mais difíceis de detectar devido às características do meio sem fio.

Produtos IEEE 802.11b apareceram no mercado no início de 2000 e são uma extensão direta da técnica de modulação definida no padrão original. O aumento dramático na taxa de transferência do IEEE 802.11b (comparado ao padrão original), juntamente com significativas reduções de preço, levou à rápida aceitação do IEEE 802.11b como a tecnologia de LAN sem fio definitiva.

Uma desvantagem dos dispositivos IEEE 802.11b é que eles podem ter problemas de interferência com outros produtos que operam na faixa de 2,4 GHz. Dispositivos que operam na faixa de 2,4 GHz incluem telefones celular móveis, dispositivos Bluetooth, monitores de bebê e alguns equipamentos de rádio amador. Problemas de interferência e de densidade de usuários na faixa de 2,4 GHz tornaram-se uma questão importante à medida que a popularidade do WiFi cresceu.

## IEEE 802.11a

O padrão IEEE 802.11a foi introduzido como uma extensão do padrão original e ratificado em 1999. Ele utiliza o mesmo protocolo básico, mas foi o primeiro da família IEEE 802.11 a operar na banda de 5 GHz. Com o uso de multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) em 52 subportadoras, o IEEE 802.11a atinge uma taxa de dados bruta máxima de 54 Mbps, o que geralmente resulta em uma taxa de transferência efetiva entre 20 Mbps e 25 Mbps. Atualmente, muitos países permitem operações na faixa de 5,47 a 5,725 GHz, o que adiciona mais canais à banda de 5 GHz e aumenta a capacidade geral para redes sem fio. Contudo, o IEEE 802.11a não é interoperável com o IEEE 802.11b, pois ambos operam em bandas de frequência diferentes. Ainda assim, a maioria dos pontos de acesso de classe empresarial agora oferece capacidade de banda dupla (TEKTRONIX, 2013).

Este foi o primeiro padrão a adotar o OFDM, que em seguida, foi utilizado pelo padrão IEEE 802.11g, IEEE 802.11n e IEEE 802.11ac. O conceito fundamental das transmissões OFDM é o uso de um grande número de subportadoras estreitas e ortogonais para transmitir dados em paralelo, em vez de depender de uma única portadora de banda larga. Uma característica distinta do OFDM é que a modulação das subportadoras ortogonais é realizada por meio de uma Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT), como ilustrado na Figura 9 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

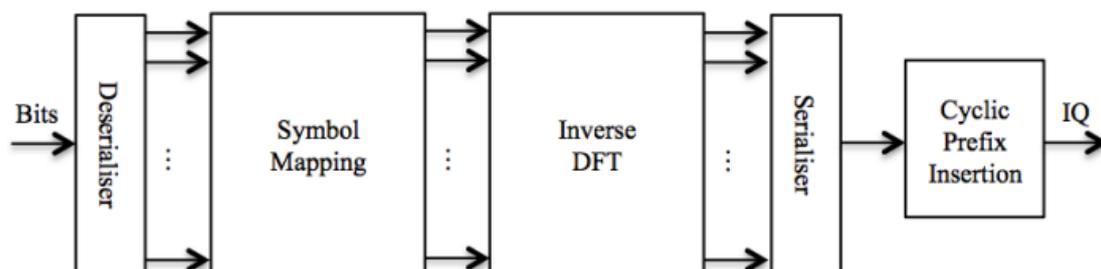


Figura 9 - Diagrama de Blocos de uma transmissão OFDM. Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS.

A Figura 9 mostra que cada subportadora em uma transmissão OFDM é modulada de forma independente. Embora seja teoricamente possível que cada subportadora utilize um esquema de modulação distinto, como ocorre em padrões de comunicações móveis, como o *Long Term Evolution* (LTE), nas

transmissões WLAN é necessário que todas as subportadoras utilizem o mesmo esquema de modulação. A Figura 9 também indica a inserção de um prefixo cíclico após a IDFT, que atua como um intervalo de proteção no domínio do tempo, minimizando a interferência intersimbólica (ISI) entre símbolos OFDM consecutivos e preservando a ortogonalidade entre as subportadoras (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

Na IDFT de uma transmissão OFDM, os símbolos são modulados em subportadoras parcialmente sobrepostas. No entanto, nem todas as subportadoras são dedicadas à transmissão de dados, conforme ilustrado na Figura 10. Subportadoras piloto são distribuídas ao longo do canal, além das subportadoras de dados, e desempenham um papel fundamental na sincronização e na estimativa do canal.

A Figura 10 mostra que existem áreas no canal onde subportadoras são propositalmente excluídas, conhecidas como subportadoras nulas. Elas são colocadas, geralmente, nas bordas do canal para evitar interferências entre canais. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

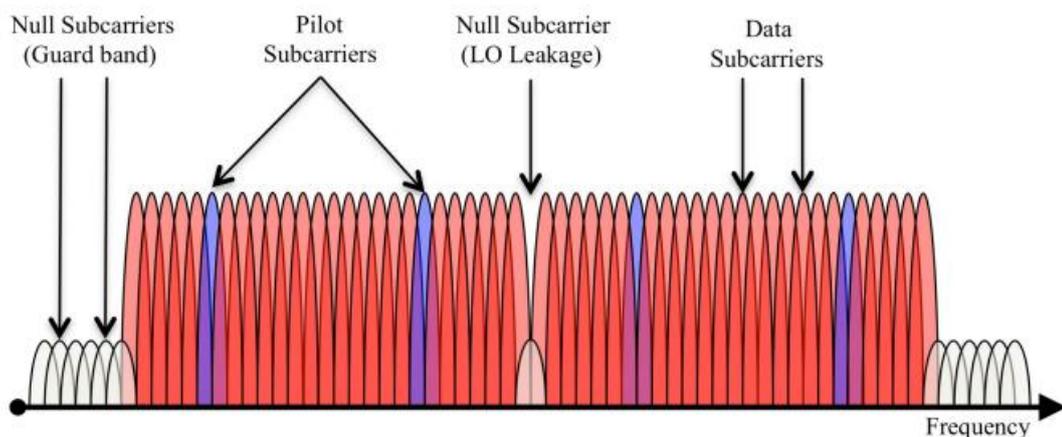


Figura 10 - Subportadoras OFDM no domínio da frequência. Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS.

O uso de várias subportadoras estreitas em sistemas OFDM apresenta várias vantagens sobre o uso de uma única portadora de banda larga. Um dos benefícios mais significativos é a redução de ISI, o que simplifica enormemente a complexidade da equalização de canal (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

A banda de 5 GHz proporciona ao IEEE 802.11a uma vantagem significativa, especialmente considerando que a banda ISM de 2,4 GHz é altamente congestionada. Em ambientes de 2,4 GHz, a interferência com outros dispositivos, como fornos de micro-ondas e telefones sem fio, pode causar quedas de conexão frequentes e degradação de serviço. No entanto, a frequência mais alta de 5 GHz traz uma pequena desvantagem: o alcance do IEEE 802.11a é ligeiramente menor em comparação ao IEEE 802.11b/g. Isso ocorre porque os sinais IEEE 802.11a são mais facilmente absorvidos por paredes e objetos sólidos, e a perda de intensidade de sinal aumenta proporcionalmente ao quadrado da frequência.

Porém, IEEE 802.11a se beneficia do maior número de canais utilizáveis e da baixa presença de sistemas interferentes na banda de 5 GHz, o que aumenta sua largura de banda e confiabilidade em comparação ao IEEE 802.11b/g.

Muitas vezes há confusão quanto aos tempos de lançamento do IEEE 802.11a e do IEEE 802.11b. Os produtos IEEE 802.11a chegaram ao mercado mais tarde, pois a fabricação de componentes para 5 GHz era mais complexa. Além disso, os produtos de primeira geração apresentaram problemas de desempenho e confiabilidade. Quando os produtos de segunda geração chegaram ao mercado, o IEEE 802.11a não foi amplamente adotado pelo consumidor final, pois o IEEE 802.11b, mais acessível, já havia ganhado popularidade. No entanto, o IEEE 802.11a encontrou aceitação significativa em ambientes corporativos, especialmente em empresas que precisavam de maior capacidade e confiabilidade do que o IEEE 802.11b/g podia oferecer (TEKTRONIX, 2013).

### **IEEE 802.11g**

O padrão IEEE 802.11g é uma extensão do IEEE 802.11b, aumentando as taxas de dados para valores entre 12 e 54 Mbps por canal. Ele é compatível com o IEEE 802.11b, pois ambos operam na faixa de frequência de 2,4 GHz. A principal diferença entre os dois é que o IEEE 802.11g utiliza tanto OFDM quanto DSSS, enquanto o IEEE 802.11b utiliza apenas DSSS. Com o IEEE 802.11g, dispositivos IEEE 802.11b podem se conectar a pontos de acesso IEEE 802.11g,

e dispositivos IEEE 802.11g podem se conectar a pontos de acesso IEEE 802.11b, mas em ambos os casos a taxa de transmissão será limitada à velocidade mais baixa do IEEE 802.11b (STALLINGS, 2004).

### **IEEE 802.11n**

O padrão IEEE 802.11n trouxe avanços significativos para redes WLAN, aprimorando o alcance, a confiabilidade e a taxa de transferência, que pode chegar a até 600 Mbps. Essas melhorias incluem o uso da tecnologia MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) e canais de 40 MHz, além de avanços na camada PHY e extensões de protocolo na camada MAC para otimizar a largura de banda (TEKTRONIX, 2013).

A tecnologia MIMO, que permite o uso de múltiplas antenas no transmissor e no receptor, melhora tanto a taxa de transferência quanto a confiabilidade das comunicações sem fio. Inicialmente introduzida no padrão IEEE 802.11n e expandida no IEEE 802.11ac, o MIMO abrange desde configurações simples, como SISO (*Single Input, Single Output*), até configurações mais complexas como 4x4 e 8x8, que são comuns em pontos de acesso, enquanto dispositivos finais, como celulares e computadores, geralmente utilizam configurações menores, como 2x2 ou 3x3. Alguns padrões, como o IEEE 802.11ac (discutido mais adiante), suportam tanto a técnica MIMO de usuário único quanto multiusuário (MU-MIMO), permitindo que um ponto de acesso transmita simultaneamente para múltiplos clientes com diferentes fluxos espaciais por cliente (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

A técnica MIMO pode ser utilizado de duas maneiras principais em redes WiFi:

1. Multiplexação Espacial: aumenta as taxas de dados ao permitir que dispositivos transmitam ou recebam fluxos de dados independentes em antenas distintas ao mesmo tempo.
2. Diversidade Espacial: aumenta a robustez da transmissão em ambientes desafiadores ao usar múltiplas antenas para melhorar a relação sinal-ruído (SNR) no receptor, embora não aumente o número de fluxos de dados.

Na prática, os sistemas WiFi frequentemente podem combinar multiplexação espacial e diversidade espacial para obter uma melhor relação entre taxas de dados elevadas e maior robustez. Essa combinação maximiza a eficiência do MIMO, proporcionando desempenho superior em uma ampla variedade de cenários de comunicação sem fio (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

Outro recurso opcional do IEEE 802.11n são os canais de 40 MHz. Produtos IEEE 802.11 anteriores usavam canais de aproximadamente 20 MHz de largura. Os produtos IEEE 802.11n têm a opção de usar canais de 20 ou 40 MHz de largura, desde que o ponto de acesso (AP) também tenha capacidade para 40 MHz. Canais que operam com uma largura de 40 MHz fornecem o dobro da taxa de dados na camada PHY em comparação a um único canal de 20 MHz. A largura de banda mais ampla pode ser habilitada tanto no modo de 2,4 GHz quanto no de 5 GHz, mas não deve interferir com outros sistemas IEEE 802.11 ou não IEEE 802.11 (como Bluetooth) que usem as mesmas frequências.

### **IEEE 802.11ac**

O padrão IEEE 802.11ac (ou VHT – *Very High Throughput*) foi desenvolvido para atender à crescente demanda por maior taxa de transferência em redes sem fio, especialmente na banda de 5 GHz. Lançado oficialmente em 2014, o IEEE 802.11ac introduz melhorias significativas em relação ao IEEE 802.11n, proporcionando uma taxa de transferência multiestação de pelo menos 1 Gbps e uma taxa de link único de pelo menos 500 Mbps (TEKTRONIX, 2013).

As principais melhorias incluem:

- Maior largura de canal: Suporta canais de até 160 MHz, o que permite uma maior taxa de dados.
- Mais fluxos espaciais MIMO: Suporta até 8 fluxos espaciais simultâneos, aumentando a capacidade de transmissão.
- MU-MIMO: Permite que um ponto de acesso transmita para vários dispositivos ao mesmo tempo, melhorando a eficiência em ambientes de alta densidade.

- Modulação de Alta Densidade: Com suporte para modulação 256-QAM, que aumenta a quantidade de dados transmitidos por ciclo de sinal.
- Largura de Canal 80+80 MHz e 160 MHz: Essas larguras de banda ampliadas permitem um aumento expressivo na taxa de transferência.

Com essas melhorias, dispositivos compatíveis com o IEEE 802.11ac podem alcançar taxas de até quase 7 Gbps, utilizando 8 fluxos espaciais e uma largura de canal de 160 MHz.

### **IEEE 802.11ax**

O padrão IEEE 802.11ax, também conhecido como WiFi 6, foi desenvolvido para melhorar a eficiência, a capacidade e o desempenho em ambientes de alta densidade de dispositivos, como residências, escritórios e espaços públicos. Operando nas bandas de 2,4 GHz, 5 GHz e, em alguns casos, 6 GHz (WiFi 6E), o IEEE 802.11ax oferece maior taxa de transferência por usuário e uma conexão mais estável em comparação com seus predecessores.

Principais características do IEEE 802.11ax:

- OFDMA: Permite dividir o canal em subcanais menores, possibilitando que vários dispositivos compartilhem o canal simultaneamente, o que reduz a latência e aumenta a eficiência em redes congestionadas.
- MU-MIMO Melhorado: Suporta MU-MIMO tanto no *uplink* quanto no *downlink*, permitindo que o roteador se comunique com vários dispositivos ao mesmo tempo, tanto para envio quanto para recebimento de dados.
- 1024-QAM: Aumenta a eficiência da modulação, permitindo uma taxa de dados maior por ciclo de sinal, o que se traduz em uma taxa de transferência mais alta.
- Intervalo de Guarda Dinâmico: Adapta o tempo de guarda entre pacotes de acordo com o ambiente, reduzindo a interferência em condições de múltiplos percursos.

- *BSS Coloring*: Identifica e marca pacotes de redes próximas, ajudando a reduzir interferências de redes vizinhas em ambientes densos.
- *Target Wake Time (TWT)*: Permite que dispositivos negociem horários específicos para "acordar" e enviar/receber dados, o que reduz o consumo de energia, especialmente em dispositivos IoT.

Com essas inovações, o IEEE 802.11ax é capaz de fornecer uma taxa de dados teórica de até 9,6 Gbps, com maior eficiência e desempenho em cenários com muitos dispositivos conectados. Este padrão é ideal para suportar aplicações de alta demanda, como streaming de vídeo em 4K/8K, jogos online e automação residencial, além de ser uma base robusta para ambientes com dispositivos IoT.

### Outras especificações

A sensibilidade do receptor WLAN é especificada como uma PER relatada pelo dispositivo sob teste por meio de uma interface digital. A PER mínima que um receptor deve atingir é de 8% para padrões DSSS e de 10% para os padrões OFDM, *High Throughput* e *Very High Throughput*.

A sensibilidade mínima de entrada é definida estritamente como o nível de potência mais baixo no qual um receptor pode atingir o critério de PER prescrito. Os requisitos mínimos para DSSS estão ilustrados na Tabela 3 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

**Tabela 3 - Limites de Sensibilidade Mínima para Receptor DSSS.**

Tipo de DSSS	Limite de PER (%)	Sensibilidade Mínima (dBm)
DSSS 2 Mb/s	8	-80 dBm
DSSS 11 Mb/s	8	-76 dBm

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS.

Para os padrões WLAN que utilizam tecnologia baseada em OFDM, a sensibilidade mínima de entrada é uma combinação do esquema de modulação, taxa de código e largura de banda de entrada. Conforme mostrado na Tabela 4,

os requisitos mínimos são consistentes entre as especificações OFDM, HT e VHT.

**Tabela 4 – Sensibilidade mínima para receptores WLAN utilizando OFDM.**

Esquema de Modulação	Taxa de Código	Sensibilidade Mínima (20 MHz BW)	Sensibilidade Mínima (40 MHz BW)	Sensibilidade Mínima (80 MHz BW)	Sensibilidade Mínima (160 MHz BW)
BPSK	$\frac{1}{2}$	-82 dBm	-79 dBm	-76 dBm	-73 dBm
BPSK <sup>1</sup>	$\frac{3}{4}$	-81 dBm	N/A	N/A	N/A
QPSK	$\frac{1}{2}$	-79 dBm	-76 dBm	-73 dBm	-70 dBm
QPSK	$\frac{3}{4}$	-77 dBm	-74 dBm	-71 dBm	-68 dBm
16-QAM	$\frac{1}{2}$	-74 dBm	-71 dBm	-68 dBm	-65 dBm
16-QAM	$\frac{3}{4}$	-72 dBm	-69 dBm	-66 dBm	-63 dBm
64-QAM	$\frac{2}{3}$	-66 dBm	-63 dBm	-60 dBm	-57 dBm
64-QAM	$\frac{3}{4}$	-65 dBm	-62 dBm	-59 dBm	-56 dBm
64-QAM <sup>2</sup>	$\frac{5}{6}$	-64 dBm	-61 dBm	-58 dBm	-55 dBm
256-QAM <sup>3</sup>	$\frac{3}{4}$	-59 dBm	-56 dBm	-53 dBm	-50 dBm
256-QAM <sup>3</sup>	$\frac{5}{6}$	-57 dBm	-54 dBm	-51 dBm	-48 dBm

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS.

A Tabela 4 mostra uma forte correlação entre a complexidade do esquema de modulação e a sensibilidade do receptor necessária. Por exemplo, esquemas de modulação de ordem superior, como o 256-QAM, exigem uma SNR mais alta no receptor para atingir as mesmas taxas de erro de quadros de esquemas mais robustos. Os dispositivos WiFi são projetados para usar técnicas de modulação adaptativa que empregam esquemas de modulação mais robustos em ambientes de baixa SNR e taxas de transferência mais altas em cenários onde o ambiente de canal suporta isso (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

### 3.3 Modelos de canal de propagação

O canal de radiopropagação representa todo o meio físico entre o transmissor e o receptor, incluindo o ambiente ao redor de ambos. Esse canal envolve objetos fixos, como árvores, prédios e montanhas, e objetos móveis, como pessoas e veículos, todos contribuindo para a propagação do sinal.

Devido à diversidade de obstáculos e à movimentação dos elementos móveis, o canal de radiopropagação adquire um comportamento estocástico, ou seja, apresenta características imprevisíveis e variantes no tempo. Cada objeto no ambiente pode afetar a trajetória do sinal, causando atenuação, reflexão, difração e *scattering* (dispersão), como é exemplificado na Figura 11 a seguir (Material de aula ESTI015-17 (EN2620) - Prof Ivan Casella).

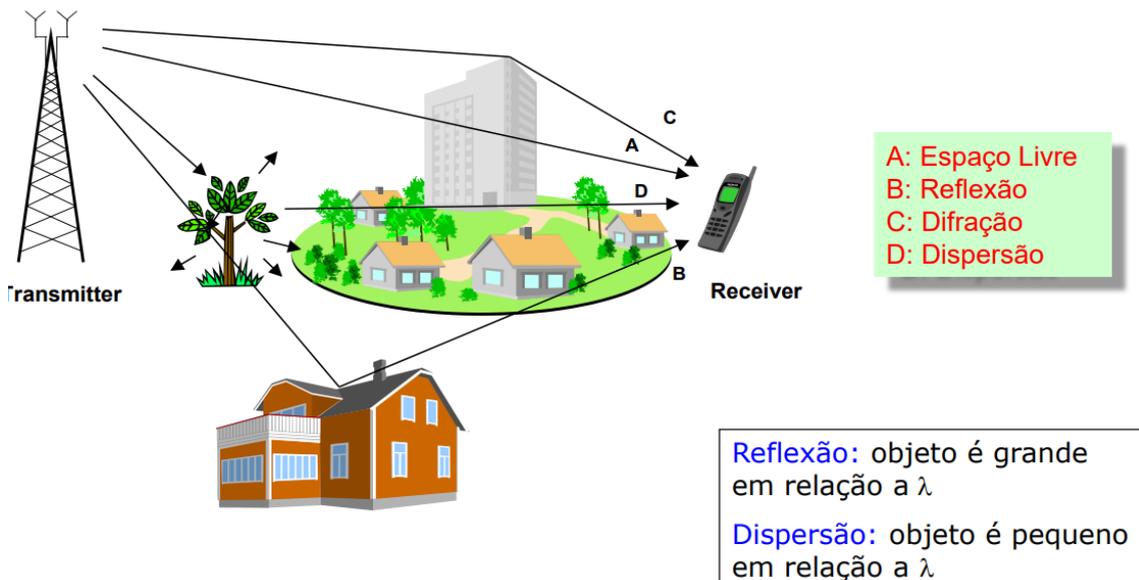


Figura 11 - Reflexão, Difração e Dispersão. Fonte: Material de aula ESTI015-17 (EN2620) - Prof Ivan Casella

A reflexão ocorre quando as ondas de rádio incidem sobre um objeto cuja dimensão é significativamente maior que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da onda transmitida. Nesse processo, o sinal não é absorvido pelo objeto, mas, em vez disso, é desviado completamente de sua trajetória original. Esse fenômeno é comum em áreas urbanas, onde prédios e outras grandes estruturas fazem com que o sinal de rádio reflita e alcance o receptor por múltiplos percursos. A reflexão impacta diretamente a qualidade do sinal, pois pode criar interferências construtivas e destrutivas conforme o sinal refletido se sobrepõe ao sinal direto.

A difração ocorre quando as ondas de rádio encontram a extremidade de um objeto de dimensões maiores que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e com uma superfície irregular. Ao incidir na borda desse objeto, as ondas são desviadas, o que permite que o sinal atinja regiões que, de outra forma, estariam fora da linha de visada direta (NLOS - *Non Line of Sight*). Esse fenômeno é explicado pelos princípios de Huygens e Fresnel, que descrevem como as ondas se comportam

ao contornar obstáculos. A difração é especialmente importante em ambientes com muitos bloqueios visuais, como montanhas ou prédios altos, permitindo que o sinal chegue a locais escondidos do transmissor.

A dispersão, ou *scattering*, ocorre quando as ondas de rádio incidem sobre objetos cujas dimensões são menores ou iguais ao comprimento de onda ( $\lambda$ ). Nesse caso, o sinal não é simplesmente refletido ou desviado, mas espalhado em múltiplas direções. Pequenos objetos, como folhas de árvores, postes e até mesmo partículas no ar, podem causar esse efeito de dispersão. A dispersão resulta em um espalhamento do sinal, que chega ao receptor em vários ângulos e com intensidades variadas, o que pode causar desvanecimento e interferência. Em cenários de comunicação sem fio, a dispersão adiciona uma complexidade extra à propagação, pois aumenta a probabilidade de sinais múltiplos e interferências.

Em um ambiente de comunicação sem fio, o fenômeno de multipercurso ocorre quando o sinal transmitido chega ao receptor por diversos caminhos distintos, e também deve ser considerado. Esse comportamento multipercurso gera uma série de efeitos que impactam a qualidade e a estabilidade do sinal recebido. Um dos principais efeitos observados é a variação temporal do sinal, ocasionada pelos diferentes tempos de propagação em cada trajeto. Como cada percurso possui um comprimento específico, os sinais provenientes de diferentes trajetórias chegam ao receptor em momentos distintos, criando um fenômeno de atraso múltiplo que gera interferências.

Outro efeito importante é o desvio Doppler, uma modulação aleatória da frequência do sinal causada pelo movimento entre o transmissor e o receptor, ou dos objetos no ambiente. Quando há deslocamento, a frequência do sinal pode variar ligeiramente, o que altera a sua percepção no receptor e pode causar distorções no conteúdo transmitido. Esse desvio é mais comum em sistemas móveis, onde o transmissor e o receptor estão em constante movimento, e o abordaremos em detalhes mais adiante.

O multipercurso também provoca flutuações na intensidade do sinal recebido, conhecidas como desvanecimento. Essas flutuações ocorrem devido à interferência construtiva e destrutiva entre os diversos sinais que chegam ao

receptor. Dependendo de como as ondas se combinam, a intensidade do sinal pode aumentar ou diminuir aleatoriamente, tornando-se um desafio para a manutenção de uma comunicação estável.

Por fim, comunicações sem fio também estão muito expostas ao ruído, que seria uma alteração aleatória indesejada que interfere no sinal transmitido, comprometendo a integridade da mensagem recebida. Em um cenário ideal, sem a presença de ruído, seria possível transmitir uma mensagem com potência extremamente baixa e ainda alcançar longas distâncias, pois não haveria perdas de sinal durante a propagação.

As principais fontes de ruído são variadas e incluem tanto origens naturais quanto interferências externas. Entre as fontes naturais, podem-se citar fenômenos atmosféricos e radiações cósmicas, enquanto sinais externos interferentes podem ser de outros dispositivos eletrônicos ou sistemas de comunicação.

Um dos principais tipos de ruído é o ruído térmico, gerado pelo movimento aleatório dos elétrons dentro dos materiais condutores. Esse movimento, intensificado pela temperatura, causa pequenas flutuações elétricas que se manifestam como ruído no sinal transmitido. Como o ruído térmico está presente em todos os componentes eletrônicos e sistemas de comunicação, é um dos fatores inevitáveis que limita a eficiência e a qualidade da transmissão de dados em sistemas sem fio.

Portanto a variabilidade do canal de propagação é um dos maiores desafios nas comunicações sem fio, pois demanda modelos que capturem com precisão as flutuações e distorções do sinal ao longo do tempo. Para simular essas dinâmicas e prever a qualidade do sinal em diferentes condições ambientais, são utilizados modelos estatísticos específicos, classificados em pequena, média e larga escala, cada qual adequado a distintos cenários e aplicações (Rappaport, 2002).

Modelos de pequena escala descrevem variações rápidas do sinal em distâncias curtas, sendo usados para captar efeitos de curto alcance, como o desvanecimento rápido. Modelos de média escala, por sua vez, abordam variações em distâncias intermediárias, típicas de ambientes urbanos, onde a

presença de obstáculos complexos afeta a propagação. Já os modelos de larga escala são aplicados para prever o comportamento do sinal em longas distâncias, levando em conta grandes áreas e variações no terreno, sendo amplamente usados no planejamento de redes e na análise de cobertura. A seguir, serão detalhados cada uma dessas categorias de modelos.

### 3.3.1 Modelos de larga escala

Os modelos de propagação de grande escala, como o próprio nome sugere, caracterizam as variações no sinal recebido que acontecem em amplas escalas, abrangendo longas distâncias ou períodos prolongados de tempo. Entre os principais modelos de propagação de grande escala, destacam-se:

- Modelo de espaço-livre;
- Modelo de espaço-livre modificado;
- Modelo de Okumura-Hata;

#### 1. *Modelo de espaço-livre.*

O modelo de propagação em espaço livre é utilizado para prever a intensidade do sinal recebido quando o transmissor e o receptor possuem uma linha de visão desobstruída entre eles. Esse modelo é aplicado em sistemas de comunicação via satélite e enlaces de micro-ondas com linha de visão. Assim como outros modelos de propagação de ondas de rádio em grande escala, ele prevê que a potência recebida diminui em função da distância de separação entre transmissor e receptor, seguindo uma função de potência. A potência recebida por uma antena receptora a uma distância  $d$  de uma antena transmissora pode ser calculada pela equação de Friis para espaço livre (Rappaport, 2002).

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (3.3)$$

onde  $P_t$  é a potência transmitida,  $P_r(d)$  é a potência recebida, que é uma função da separação T-R,  $G_t$  é o ganho da antena transmissora,  $G_r$  é o ganho da antena receptora,  $d$  é a distância de separação T-R em metros,  $L$  é o fator de perda do sistema não relacionado à propagação ( $L \geq 1$ ), e  $\lambda$  é o comprimento

de onda em metros. O ganho de uma antena está relacionado à sua abertura efetiva,  $A_e$ , por:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (3.4)$$

A abertura efetiva  $A_e$  está relacionada ao tamanho físico da antena, e  $\lambda$  está relacionada à frequência da portadora por:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad (3.5)$$

onde  $f$  é a frequência da portadora em Hertz,  $\omega_c$  é a frequência da portadora em radianos por segundo, e  $c$  é a velocidade da luz em metros/s. Os valores de  $P_t$  e  $P_r$  devem ser expressos nas mesmas unidades, e  $G_t$  e  $G_r$  são quantidades adimensionais. As perdas diversas  $L$  ( $L \geq 1$ ) são geralmente devidas à atenuação de linha, perdas de filtro e perdas de antena no sistema de comunicação. Um valor de  $L = 1$  indica nenhuma perda no *hardware* do sistema (Rappaport, 2002).

A equação de espaço livre de Friis (3.3) mostra que a potência recebida cai com o quadrado da distância de separação T-R. Isso implica que a potência recebida decai com a distância a uma taxa de 20 dB/década.

Um radiador isotrópico é uma antena ideal que irradia potência uniformemente em todas as direções, e é frequentemente usada para referenciar ganhos de antena em sistemas sem fio. A potência isotrópica radiada efetiva (EIRP) é definida como:

$$EIRP = P_t G_t \quad (3.6)$$

e representa a potência máxima irradiada disponível de um transmissor na direção de ganho máximo da antena, em comparação com um radiador isotrópico (Rappaport, 2002).

Na prática, a potência radiada efetiva (ERP) é usada em vez de EIRP para denotar a potência máxima irradiada em comparação com uma antena dipolo de meia onda (em vez de uma antena isotrópica). Como uma antena dipolo tem um ganho de 1,64 (2,15 dB acima de um isotrópico), o ERP será 2,15 dB menor que o EIRP para o mesmo sistema de transmissão. Na prática, os ganhos de antena

são dados em unidades de dBi (ganho dB em relação a uma fonte isotrópica) ou dBd (ganho dB em relação a um dipolo de meia onda).

A perda de percurso, que representa a atenuação do sinal como uma quantidade positiva medida em dB, é definida como a diferença (em dB) entre a potência transmitida efetiva e a potência recebida, e pode ou não incluir o efeito dos ganhos das antenas. A perda de percurso para o modelo de espaço livre quando os ganhos das antenas são incluídos é dada por

$$PL(dB) = 10\log\frac{P_t}{P_r} = -10\log\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (3.7)$$

Quando os ganhos de antena são excluídos, as antenas são assumidas como tendo ganho unitário, e a perda de percurso é dada por

$$PL(dB) = 10\log\frac{P_t}{P_r} = -10\log\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (3.8)$$

O modelo de espaço livre de Friis só é um preditor válido para  $P_r$  para valores de  $d$  que estão na região de campo distante da antena transmissora. A região de campo distante, ou região de Fraunhofer, de uma antena transmissora é definida como a região além da distância de campo distante  $d_f$ , que está relacionada à maior dimensão linear da antena transmissora e ao comprimento de onda da portadora. A distância de Fraunhofer é dada por:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.9)$$

onde  $D$  é a maior dimensão linear física da antena. Além disso, para estar na região de campo distante,  $d_f$  deve satisfazer

$$d_f \gg D$$

$$d_f \gg \lambda$$

Além disso, é claro que a equação (3.3) não é válida para  $d = 0$ . Por essa razão, modelos de propagação em larga escala usam uma distância próxima,  $d_0$ , como um ponto de referência de potência recebida conhecido. A potência recebida,  $P_r(d)$ , a qualquer distância ( $d > d_0$ ), pode estar relacionada a  $P_r$  em

$d_0$ . O valor  $P_r(d_0)$  pode ser previsto a partir da equação (3.3), ou pode ser medido no ambiente de rádio tomando a potência recebida média em muitos pontos localizados a uma distância radial próxima  $d_0$  do transmissor. A distância de referência deve ser escolhida de forma que esteja na região de campo distante, isto é, ( $d_0 > d_f$ ), e  $d_0$  é escolhida para ser menor que qualquer distância prática usada no sistema de comunicação móvel. Assim, usando a equação (3.3), a potência recebida em espaço livre a uma distância maior que  $d_0$  é dada por

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2, \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad (3.10)$$

Em sistemas de rádio móvel, não é incomum encontrar que  $P_r$  possa variar por muitas ordens de magnitude ao longo de uma área de cobertura típica de vários quilômetros quadrados. Devido à grande faixa dinâmica de níveis de potência recebida, frequentemente são usadas unidades de dBm ou dBW para expressar os níveis de potência recebidos. A equação (3.8) pode ser expressa em unidades de dBm ou dBW, simplesmente tomando o logaritmo de ambos os lados e multiplicando por 10. Por exemplo, se  $P_r$  estiver em unidades de dBm, a potência recebida é dada por

$$P_r(d)dBm = 10 \log \left( \frac{P_r(d_0)}{0.001W} \right) + 20 \log \left( \frac{d_0}{d} \right), \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad (3.11)$$

onde  $P_r(d_0)$  está em unidades de watts.

A distância de referência  $d_0$  para sistemas práticos usando antenas de baixo ganho na região de 1-2 GHz é tipicamente escolhida como 1 m em ambientes internos e 100 m ou 1 km em ambientes externos, de modo que o numerador nas equações (3.8) e (3.9) seja um múltiplo de 10. Isso torna os cálculos de perda de percurso fáceis em unidades de dB (Rappaport, 2002).

## *II. Modelo de espaço-livre modificado*

O Modelo de Espaço Livre Modificado é uma extensão do modelo de espaço livre padrão, ajustado para cenários onde não há uma linha de visão direta entre o transmissor (Tx) e o receptor (Rx). No modelo de espaço livre

tradicional, a potência recebida  $P_r$  é inversamente proporcional ao quadrado da distância  $d$ , o que é representado pela relação:

$$P_r \propto d^{-2}$$

No entanto, em ambientes onde a propagação do sinal é mais complexa, como em áreas urbanas ou com obstruções, a relação entre potência recebida e distância pode não seguir exatamente essa proporção. Nesse caso, o modelo é ajustado para que a potência decaia inversamente com um expoente  $\gamma$  da distância, onde  $\gamma$  é um parâmetro que depende do ambiente específico:

$$P_r \propto d^{-\gamma}$$

Assim, a potência recebida no modelo de espaço livre modificado é dada por:

$$P_r(d) = G_t G_r \frac{P_t}{d^\gamma} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \quad (3.12)$$

A potência recebida em dBm para o modelo de espaço-livre modificado é dada por:

$$P_r^{dBm} = 10 \log(G_t \times G_r) + 10 \log\left(\frac{P_t}{10^{-3}}\right) - 20 \log(f_{\text{MHz}}) - 10 \gamma \log(d_{\text{km}}) + K \quad (3.13)$$

Onde:

$$K = 27.558 - 10\gamma \log(1000)$$

e:

$$100m < d_0 < 1000m$$

Note que os valores de  $d$  e  $f$  devem ser considerados em km e MHz respectivamente.

A Tabela 5 apresenta valores típicos do expoente  $\gamma$  para diferentes ambientes, utilizados no modelo de espaço livre modificado para refletir a variação de atenuação em função do tipo de ambiente de propagação.

Tabela 5 - Valores de Gamma para cada ambiente.

Ambiente	$\gamma$
Espaço Livre	2
Rádio Celular em Área Urbana	2,7 - 3,5
Reflexão Especular Ideal	4
Rádio Celular Urbano Sombreado	3 - 5
Linha de Visada em Prédios	1,6 - 1,8
Obstruído em Prédios	4 - 6
Obstruído em Fábricas	2 - 3

Fonte: Material de aula ESTI015-17 (EN2620) - Prof Ivan Casella

### III. Modelo Okumura-Hata

O modelo de Okumura é um dos mais amplamente utilizados para previsão de sinal em áreas urbanas. Esse modelo é aplicável para frequências na faixa de 150 MHz a 1920 MHz (embora seja tipicamente extrapolado até 3000 MHz) e distâncias de 1 km a 100 km. Pode ser usado para alturas de antena de estação base variando de 30 m a 1000 m (Rappaport, 2002).

Okumura desenvolveu um conjunto de curvas que fornecem a atenuação mediana em relação ao espaço livre  $A_{mu}$ , em uma área urbana sobre um terreno quase plano com uma altura efetiva de antena da estação base  $h_{te}$  de 200 m e uma altura de antena móvel  $h_{re}$  de 3 m. Essas curvas foram desenvolvidas a partir de medições extensivas usando antenas omnidirecionais tanto na base quanto no móvel, e são traçadas como uma função da frequência na faixa de 100 MHz a 1920 MHz e como uma função da distância da estação base na faixa de 1 km a 100 km. Para determinar a perda de percurso usando o modelo de Okumura, calcula-se primeiro a perda de percurso em espaço livre entre os pontos de interesse e, em seguida, adiciona-se o valor de  $A_{mu}(f, d)$  (obtido das curvas) juntamente com fatores de correção para o tipo de terreno. O modelo pode ser expresso como:

$$L50(dB) = L_f + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad (3.14)$$

Onde:

- $L50$  é o valor percentil 50 (isto é, mediano) da perda de percurso de propagação;
- $L_f$  é a perda de propagação em espaço livre;
- $A_{mu}$  é a atenuação mediana em relação ao espaço livre;
- $G(h_{te})$  é o fator de ganho da altura da antena da estação base;
- $G(h_{re})$  é o fator de ganho da altura da antena móvel;
- $G_{AREA}$  é o ganho devido ao tipo de ambiente;

Note que os ganhos de altura da antena são estritamente uma função da altura e não têm relação com os padrões da antena.

Além disso, Okumura descobriu que  $G(h_{te})$  varia a uma taxa de 20 dB por década e  $G(h_{re})$  varia a uma taxa de 10 dB por década para alturas menores que 3 m (Rappaport, 2002).

As expressões para os ganhos de altura das antenas são:

$$G(h_{te}) = 20 \log \left( \frac{h_{te}}{200} \right) \quad , \quad 1000m > h_{te} > 30m \quad (3.15)$$

$$G(h_{re}) = 10 \log \left( \frac{h_{re}}{3} \right) \quad , \quad h_{re} \leq 3m \quad (3.16)$$

$$G(h_{re}) = 20 \log \left( \frac{h_{re}}{3} \right) \quad , \quad 10m > h_{re} > 3m \quad (3.17)$$

Outras correções também podem ser aplicadas ao modelo de Okumura. Alguns dos parâmetros importantes relacionados ao terreno são a ondulação do terreno ( $\Delta h$ ), inclinação média do terreno e os parâmetros relacionados à mistura de áreas terrestres e marítimas. Uma vez calculados os parâmetros de terreno relacionados, os fatores de correção necessários podem ser adicionados ou subtraídos conforme necessário. Todos esses fatores de correção também estão disponíveis nas curvas de Okumura.

O modelo de Okumura é inteiramente baseado em dados medidos e não fornece nenhuma explicação analítica. Para muitas situações, é possível fazer extrapolações das curvas derivadas para obter valores fora da faixa de medição, embora a validade de tais extrapolações dependa das circunstâncias e da suavidade da curva em questão.

O modelo de Hata é uma formulação paramétrica dos dados gráficos de perda de percurso fornecidos por Okumura e é válido para frequências de 150 MHz a 1500 MHz. Hata apresentou a perda de propagação em áreas urbanas como uma fórmula padrão e forneceu equações de correção para aplicação em outras situações. A fórmula padrão para a perda de percurso mediana em áreas urbanas é dada por:

$$L50_{\text{Urban}}(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \log d \quad (3.18)$$

onde:

- $f_c$  é a frequência (em MHz) de 150 MHz a 1500 MHz;
- $h_{te}$  é a altura efetiva da antena transmissora (estação base) (em metros), variando de 30 m a 200 m;
- $h_{re}$  é a altura efetiva da antena receptora (móvel) (em metros), variando de 1 m a 10 m;
- $d$  é a distância de separação T-R (em km);
- $a(h_{re})$  é o fator de correção para a altura efetiva da antena móvel, que é uma função do tamanho da área de cobertura;

Para uma cidade de pequeno a médio porte, o fator de correção da antena móvel é dado por:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log f_c - 0.7)h_{re} - (1.56 \log f_c - 0.8) \text{ dB} \quad (3.19.1)$$

E para uma cidade grande, é dado por:

$$a(h_{re}) = 8.29(\log 1.54 h_{re})^2 - 1.1, \quad f_c \leq 300 \text{ MHz} \quad (3.19.2)$$

$$a(h_{re}) = 3.2(\log 11.75 h_{re})^2 - 4.97, \quad f_c > 300 \text{ MHz} \quad (3.19.3)$$

Para obter a perda de percurso em uma área suburbana, a fórmula padrão de Hata na equação (3.12) é modificada como:

$$L50(\text{dB}) = L50_{\text{Urban}} - 2 \left[ \log \left( \frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5.4 \quad (3.20)$$

e para perda de percurso em áreas rurais abertas, a fórmula é modificada como:

$$L50(\text{dB}) = L50_{\text{Urban}} - 4.78 [\log f_c]^2 + 18.33 [\log f_c] - 40.98 \quad (3.21)$$

Embora o modelo de Hata não tenha as correções específicas de percurso disponíveis no modelo de Okumura, as expressões acima têm valor prático significativo. As previsões do modelo de Hata são muito próximas do modelo original de Okumura, desde que  $d$  exceda 1 km. Esse modelo é bem adequado para grandes sistemas de células móveis, mas não para sistemas de comunicação pessoal (PCS) com células de raio da ordem de 1 km.

### 3.3.2 Modelos de média escala

Os modelos de propagação de média escala descrevem as variações na potência média do sinal recebido em uma ampla área, considerando uma determinada distância entre a estação base (BS) e o dispositivo móvel (MS). Essas variações são estabelecidas com base nos modelos de grande escala e são influenciadas pela não-uniformidade do terreno e pela presença de obstruções, como edifícios, pessoas, veículos, árvores e outros elementos que impactam a propagação do sinal.

Por conta dessas características, alguns autores também classificam esse modelo como sendo de grande escala. O efeito de *shadowing* é o exemplo mais representativo desse tipo de fenômeno.

#### 1. Modelo Shadowing (Log-normal)

O modelo de espaço livre modificado, não considera o fato de que o ambiente ao redor pode ser muito diferente em duas localizações distintas com a mesma separação T-R. Isso leva a sinais medidos que podem ser muito diferentes do valor médio previsto por este modelo. Porém, medições práticas mostraram que, para qualquer valor de  $d$ , a perda de percurso  $PL(d)$  em uma localização específica é aleatória e distribuída de forma log-normal (normal em dB) em torno do valor médio dependente da distância (Rappaport, 2002). Isto é,

$$PL(d)[\text{dB}] = \overline{PL}(d) + X_\sigma = \overline{PL}(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.22)$$

onde  $X_\sigma$  é uma variável aleatória com distribuição gaussiana média zero (em dB) e desvio padrão  $\sigma$  (também em dB), e os ganhos da antena estão incluídos em  $PL(d)$ , visto que:

$$P_r(d)dBm = P_r(dBm) - PL(d)[dB] \quad (3.23)$$

A distribuição log-normal descreve os efeitos de *shadowing* (sombreamento) aleatório que ocorrem em um grande número de locais de medição que possuem a mesma separação T-R, mas têm diferentes níveis de obstrução ao longo do caminho de propagação. Esse fenômeno é conhecido como sombreamento log-normal. Simplificando, o sombreamento log-normal implica que os níveis de sinal medidos em uma separação T-R específica têm uma distribuição gaussiana (normal) em torno da média dependente da distância, conforme o modelo espaço livre modificado, onde os níveis de sinal medidos têm valores em unidades de dB. O desvio padrão da distribuição gaussiana que descreve o sombreamento também está em unidades de dB. Assim, os efeitos aleatórios de *shadowing* são contabilizados usando a distribuição gaussiana, que se adapta facilmente à avaliação (Rappaport, 2002).

A distância de referência próxima  $d_0$ , o expoente de perda de percurso  $n$  e o desvio padrão  $\sigma$ , descrevem estatisticamente a perda de percurso para uma localização arbitrária com uma separação T-R específica, e esse modelo pode ser usado em simulações de computador para fornecer níveis de potência recebidos para locais aleatórios no design e análise de sistemas de comunicação.

Na prática, os valores de  $n$  e  $\sigma$  são calculados a partir de dados medidos, utilizando regressão linear de modo que a diferença entre as perdas de percurso medidas e estimadas seja minimizada em um sentido de erro quadrático médio sobre uma ampla faixa de locais de medição e separações T-R. O valor de  $PL(d_0)$  na equação (3.22) é baseado em medições próximas ou em uma suposição de espaço livre do transmissor para  $d_0$ . Um exemplo de como o expoente de perda de percurso é determinado a partir de dados medidos é apresentado. A Figura 12 ilustra dados medidos reais em vários sistemas de rádio celular e demonstra as variações aleatórias em torno da perda de percurso

média (em dB) devido ao sombreamento em separações T-R específicas (Rappaport, 2002).

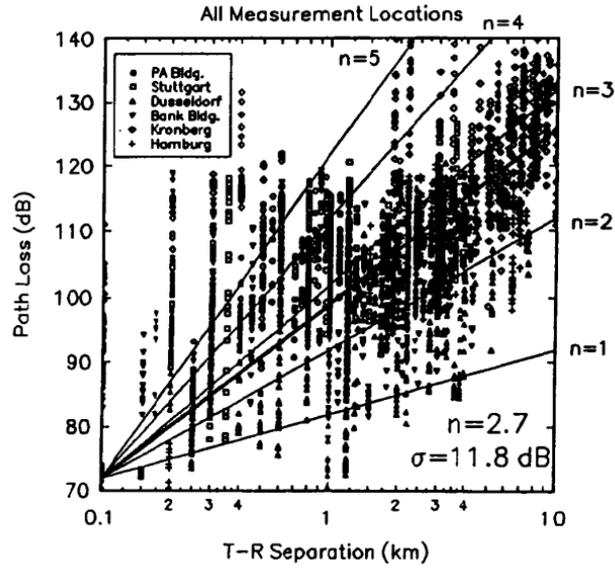


Figura 12 - Dados reais medidos. Fonte: Rappaport, 2002.

Como  $PL(d)$  é uma variável aleatória com distribuição normal em dB em torno da média dependente da distância, o mesmo ocorre com  $P_r(d)$ , e a função-Q ou função de erro (erf) pode ser usada para determinar a probabilidade de que o nível de sinal recebido exceda (ou fique abaixo) de um nível particular. A função-Q é definida como:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (3.24)$$

Onde:

$$Q(z) = 1 - Q(-z) \quad (3.25)$$

A probabilidade de que o nível de sinal recebido exceda um valor  $\gamma$  pode ser calculada a partir da função de densidade cumulativa como:

$$P_r[P_r(d) > \gamma] = Q\left(\frac{\gamma - \overline{P_r(d)}}{\sigma}\right) \quad (3.26)$$

De forma similar, a probabilidade de que o nível de sinal recebido esteja abaixo de  $\gamma$  é dada por:

$$P_r[P_r(d) < \gamma] = Q\left(\frac{\overline{P_r(d)} - \gamma}{\sigma}\right) \quad (3.27)$$

### 3.3.3 Modelos de pequena escala

Os efeitos de propagação de pequena escala representam variações rápidas no sinal recebido, que ocorrem em distâncias de poucos comprimentos de onda ou em intervalos de tempo muito curtos, em comparação com a duração de um símbolo transmitido. Esses efeitos capturam as flutuações rápidas na intensidade do sinal causadas por mudanças no ambiente próximo ao receptor ou por movimentos rápidos de objetos e do próprio receptor, resultando em alterações significativas na amplitude e fase do sinal em escalas muito reduzidas.

#### I. Modelo de Rayleigh

O modelo de Rayleigh é amplamente utilizado para descrever o desvanecimento de sinal em canais de comunicação móvel quando o número de trajetórias de multipercurso não resolvíveis é grande. Nesse cenário, o teorema do limite central pode ser aplicado, permitindo modelar a resposta ao impulso como um processo aleatório Gaussiano complexo com simetria circular. Isso significa que a amplitude do envelope do sinal recebido segue uma distribuição de Rayleigh.

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r \geq 0 \quad (3.28)$$

onde:

- $r$  representa a amplitude do envelope (módulo do sinal recebido),
- $\sigma^2$  é a potência média do sinal.

Para a fase  $\theta$ , o modelo assume uma distribuição uniforme entre 0 e  $2\pi$ , pois, em condições de multipercurso aleatório, todas as fases são igualmente prováveis.

$$f_\theta(\theta) = \int_0^\infty \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{2} \times \frac{r^2}{\sigma^2}} dr = \frac{1}{2\pi} \quad (3.29)$$

## II. Efeito doppler

O efeito Doppler descreve a variação na frequência de um sinal recebido devido ao movimento relativo entre a fonte do sinal e o receptor. Esse fenômeno ocorre em comunicações sem fio e impacta diretamente a recepção do sinal, especialmente em sistemas móveis onde o receptor ou a fonte está em movimento.

Quando uma onda é emitida ou refletida por um objeto em movimento em direção ao receptor, a frequência do sinal percebida aumenta. Se o objeto está se afastando, a frequência percebida diminui. Este efeito foi descrito teoricamente por Johann Doppler em 1842 e ocorre em diferentes tipos de ondas, incluindo som e ondas eletromagnéticas.

Em comunicações móveis, a frequência do sinal aumenta conforme a estação móvel se aproxima da estação de base (ERB) e diminui quando a MS se afasta da ERB. Essa variação de frequência pode interferir na estabilidade e qualidade do sinal recebido.

O desvio de frequência causado pelo efeito Doppler,  $f_d$ , pode ser calculado com base na velocidade relativa entre o transmissor e o receptor e na orientação do movimento em relação ao sinal. A fórmula do desvio Doppler é dada por:

$$f_d = \frac{v}{\lambda_0} \cos(\phi) \quad (3.30)$$

onde  $v$  é a velocidade relativa,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da frequência original e  $\phi$  é o ângulo de incidência.

A frequência do sinal recebido  $f$  é dada por:

$$f = f_0 + f_d \quad (3.31)$$

onde  $f_0$  é a frequência original do sinal transmitido e  $f_d$  é o desvio Doppler.

Esses efeitos são importantes em sistemas de comunicação móvel, pois a variação de frequência devido ao efeito Doppler pode causar distorções e perdas no sinal. O ajuste correto da frequência e a compensação do desvio

Doppler são essenciais para manter a qualidade da transmissão em cenários com alta mobilidade.

## 4. Implementação de um ambiente de casa inteligente

Este capítulo descreve o processo de desenvolvimento de um ambiente de casa inteligente, abordando a integração de componentes de *hardware* e *software*. Serão analisados dois casos de uso práticos: o acionamento de uma lâmpada por meio de um interruptor inteligente WiFi e a automação de uma persiana utilizando um motor tubular Zigbee.

Essas implementações ilustram a comunicação entre os dispositivos e a interface com o usuário, evidenciando como diferentes tecnologias podem ser empregadas para criar um ambiente automatizado e eficiente.

### 4.1 Hardware

#### Raspberry Pi 4 – Model B

O *Raspberry pi 4 model B*, apresentado na Figura 13, é computador de tamanho reduzido, amplamente utilizada no desenvolvimento de sistemas de automação e robótica pela sua capacidade de processamento, aliada ao baixo custo e baixo consumo energético (*Raspberry datasheet*, 2024).

Ele possui um processador *Quad-core* de 64 bits e versões de até 8GB de RAM (*Random Access Memory*), sendo capaz de lidar com uma variedade de tarefas, porém a conectividade é o principal fator que motivou a escolha deste equipamento, pelo suporte para *Dual-display* via micro HDMI (*High-Definition Multimedia Interface*), LAN sem fio *Dual-band*, *Bluetooth 5.0*, *Gigabit Ethernet* e USB (*Universal Serial Bus*) 3.0, além das conexões GPIO que facilitam a utilização com sensores e atuadores (*Raspberry datasheet*, 2024).



Figura 13 - Raspberry Pi 4 - Model B. Fonte: Raspberry Pi website.

Quando integrado a um ambiente de casa inteligente, o *Raspberry Pi 4* pode atuar como controlador central, coordenando e controlando dispositivos inteligentes como luzes, termostatos, câmeras de segurança e fechaduras de portas. Também pode funcionar como servidor de mídia, permitindo a transmissão de filmes, músicas e outros conteúdos multimídia em toda a casa. Além disso, pode ser configurado para monitoramento remoto da casa, utilizando câmeras de segurança compatíveis, ou para automação personalizada, criando soluções específicas para as necessidades individuais de cada usuário.

Neste projeto será utilizado um *Raspberry Pi 4 – Model B* com 8 GBs de Memória RAM como uma espécie de agregador ou servidor, onde estarão conectados todos os dispositivos periféricos, sensores e atuadores. Ele também será responsável pelo armazenamento dos dados e publicação na *Web* de maneira que possam ser acessados via *Home Assistant*, *software* que será apresentado a seguir.

## **ESP8266**

O ESP8266 é uma placa de desenvolvimento de baixo custo e altamente versátil e muito popular no desenvolvimento de projetos IoT. Esta placa é fabricada pela empresa chinesa Espressif Systems e possui capacidade de integração WiFi e além de portas digitais e analógicas que expandem as possibilidades de utilização em projetos de comunicação, automação, eletrônica e robótica.

Ele é equipado com um microcontrolador de baixo consumo de energia e um módulo WiFi integrado como pode ser verificado na Figura 14, que permite que ela se conecte à *Internet* e se comunique com outros dispositivos por meio de uma rede sem fio. O microcontrolador é baseado na arquitetura Xtensa LX106, que possui um processador de 32 bits e uma frequência de *Clock* que pode variar de 80 MHz a 160 MHz, dependendo da versão e do modelo específico do chip (ESP8266 datasheet, 2023).



Figura 14 - ESP-8266. Fonte: Espressif Systems.

Além de sua capacidade de conexão WiFi, o ESP8266 possui uma variedade de pinos de entrada/saída (GPIO) que podem ser utilizados para conectar sensores, atuadores e outros componentes eletrônicos. Isso torna a placa extremamente flexível e adequada para uma ampla gama de aplicações, desde sistemas de monitoramento ambiental até controle de dispositivos domésticos inteligentes (ESP8266datasheet, 2023).

Existem várias versões do ESP8266 disponíveis, desde módulos compactos que podem ser facilmente integrados a protótipos até placas de desenvolvimento mais robustas com recursos adicionais, como mais GPIOs, ADCs e até mesmo suporte a baterias recarregáveis.

## Zigbee Hub USB (Sonoff)

Para este estudo será utilizado um tipo específico de *hub* Zigbee, responsável por agregar todos os dispositivos que utilizam este protocolo de comunicação como os convencionais, porém que é utilizado como um *Dongle USB*, como apresentado na Figura 15, conectado diretamente ao *Raspberry Pi*.



Figura 15 - Sonoff ZIGBEE 3.0 USB DONGLE PLUS. Fonte: Sonoff.

Trata-se do Sonoff Zigbee 3.0 USB DONGLE PLUS que utiliza uma combinação dos chips CC2652P + CP2102N com ganho de saída de +20dBm, suporte Zigbee 3.0 e *firmware* de coordenador flash para Zigbee2MQTT, na Figura 16 é possível verificar os componentes do dispositivo.

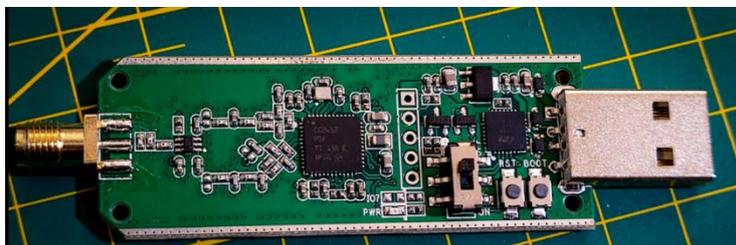


Figura 16 - Parte interna hub ZB USB. Fonte: Autor.

Com relação à estrutura física, ele é envolto em um estojo de alumínio com objetivo de diminuir a interferência direta causada pelo WiFi (Sonoff Manual and user specifications, 2022).

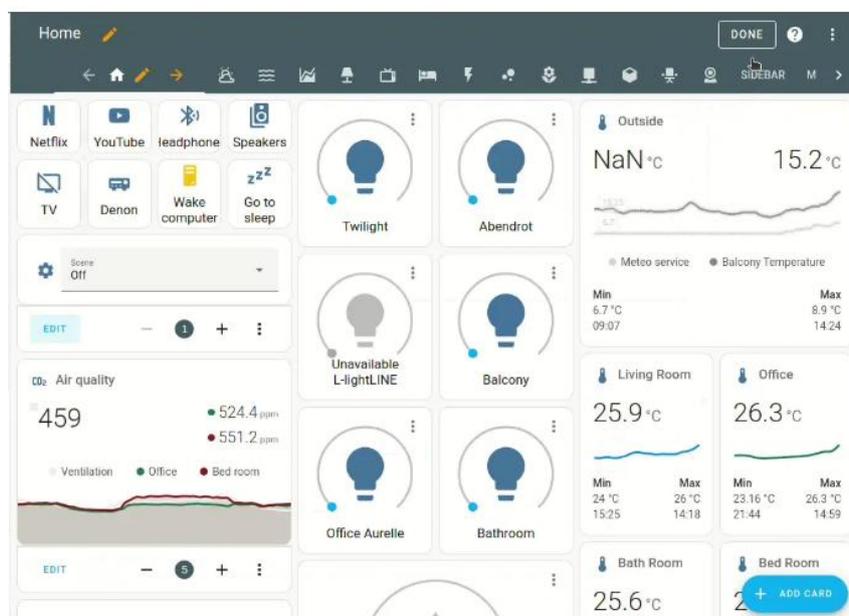
Utilizando o *firmware* disponibilizado pelo fabricante, e segundo as informações disponibilizadas pela Sonoff, este dispositivo é capaz de suportar até 32 conexões simultâneas diretas e até 80 dispositivos em uma rede formato malha com outros roteadores. O alcance máximo não é especificado pelo fabricante oficialmente, porém as estimativas amplamente divulgadas pela comunidade de desenvolvedores e usuários, mencionam valores em torno de 10 a 15 metros em ambientes ideais livres de obstruções.

## **4.2 Software**

### **Home Assistant**

O *Home Assistant* é uma plataforma de automação residencial de código aberto que permite controlar uma ampla variedade de dispositivos e serviços inteligentes em sua casa. Ele atua como um *hub* central para integrar e gerenciar dispositivos de diferentes marcas e protocolos, proporcionando uma experiência unificada e personalizável para automação residencial. A principal função do *Home Assistant* é permitir que você automatize tarefas e crie cenários personalizados para sua casa, com base em diferentes eventos, condições e ações. Ele suporta uma variedade de dispositivos, incluindo lâmpadas inteligentes, termostatos, câmeras de segurança, sensores de movimento, sistemas de áudio e vídeo, eletrodomésticos inteligentes e uma ampla gama de protocolos, incluindo Zigbee, Z-wave, WiFi, *Bluetooth*, entre outros. O que permite que você integre facilmente diversos dispositivos em uma única interface (*Home Assistant Documentation*, 2024).

Além disso, o *Home Assistant* possui *dashboards* personalizáveis, como pode ser verificado na Figura 17, onde é possível monitorar diversos aspectos dos dispositivos nele conectados, como consumo de energia, quantidade de acionamentos, além de métricas com relação a qualidade da transmissão de dados.



**Figura 17 – Exemplo de dashboard do Home Assistant. Fonte: Home Assistant website.**

Um outro fator importante que diz respeito a segurança e privacidade, é a possibilidade de hospedar o *Home Assistant* com todas as suas funcionalidades em uma infraestrutura local como um *Raspberry Pi* ou mesmo máquinas virtuais. Isso permite que você mantenha o controle total sobre seus dados e privacidade e torna as automações independentes da conexão com a *Internet* podendo operar totalmente offline.

### **4.3 Cenários práticos de monitoramento e controle sem fio**

O Ambiente desenvolvido consiste em um quarto que possui 2 cenários de automação:

No primeiro cenário, a automação de uma persiana é realizada utilizando um motor tubular e um interruptor de cena, ambos baseados em Zigbee. Esses dispositivos se conectam ao *Raspberry Pi*, que utiliza um coordenador *Sonoff* para integrar-se à rede Zigbee. O sistema é gerenciado pelo *Home Assistant*, onde a lógica de comportamento dos dispositivos é programada. Como os dispositivos foram produzidos pelo fabricante *Tuya*, o *Home Assistant* foi configurado com um *plug-in* específico para garantir o controle e a integração dos componentes de *hardware* utilizados.

No segundo cenário, o acionamento de uma lâmpada é feito por meio de um interruptor WiFi, construído com o microcontrolador ESP8266. O dispositivo foi conectado a um roteador, possibilitando o controle remoto da lâmpada através de uma página *web*, acessível via *smartphone*.

#### **4.3.1 Análise do acionamento de uma persiana elétrica (Zigbee)**

Neste cenário, foi utilizado um motor tubular Zigbee, pré-configurado em suas posições aberto (100%) e fechado (0%). Este motor está conectado a um *hub* Zigbee (Coordenador) que possui conexão com um roteador WiFi através do *Raspberry Pi* e possibilita o envio de informações ao agregador online *Home Assistant* que possui o *Plug-in Tuya Cloud*. Para o acionamento foi utilizado um interruptor de cena Zigbee que possui os estados acionado e não acionado, e está conectado à rede assim como o motor tubular.

O diagrama de funcionamento deste cenário pode ser verificado na Figura 18 e seus componentes físicos na Figura 19, Figura 20, Figura 21 e Figura 22, apresentadas abaixo:

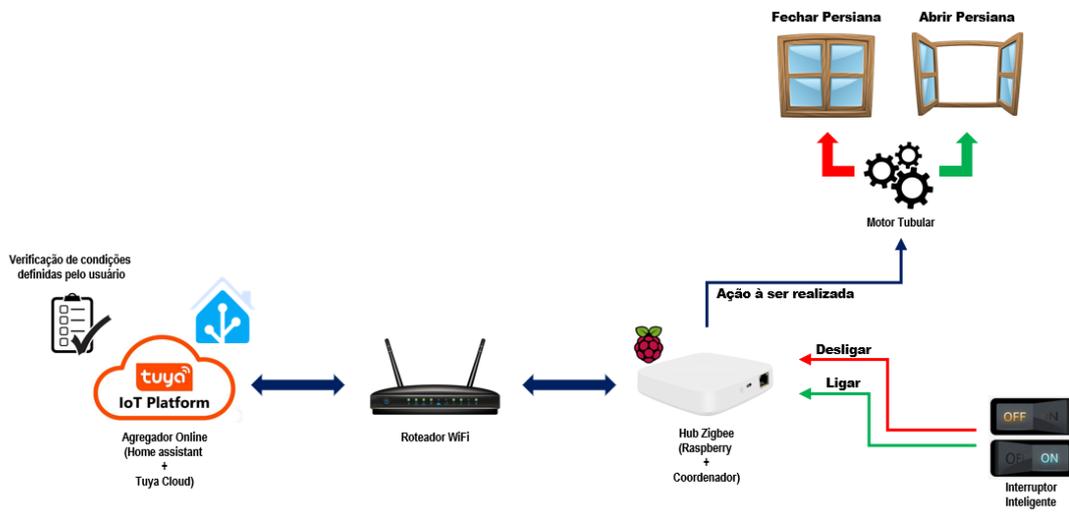


Figura 18 - Diagrama de funcionamento da persiana inteligente. Fonte: Autor.



Figura 19 - Hub zigbee conectado ao Raspberry Pi. Fonte: Autor.



**Figura 21 - Roteador WiFi. Fonte: Autor.**



**Figura 20 - Persiana com motor tubular. Fonte: Autor.**



Figura 22 - Interruptor inteligente. Fonte: Autor.

Como resultado, quando o interruptor é modificado para a posição ligado ou desligado, a informação é enviada ao *hub* Zigbee que através do roteador WiFi se conecta ao agregador online. Ao receber essa informação o agregador verifica em sua lista de configurações definida pelo usuário a ação a ser realizada e envia novamente ao *hub* que direciona a informação ao motor tubular abrindo ou fechando a persiana.

Embora existam diversas etapas, o acionamento ocorre de maneira instantânea, o que é importante para fornecer uma boa experiência ao usuário.

#### **4.3.2 Análise do acionamento de um interruptor WiFi**

Neste cenário, foi utilizado um interruptor inteligente construído a partir de um ESP8266 conectado a um módulo Relé de 4 canais. Este dispositivo se conecta a um roteador WiFi para recepção de comandos. O acionamento ocorre através de uma página web em rede local publicada pelo ESP8266 que pode ser acessada por um *smartphone* ou computador.

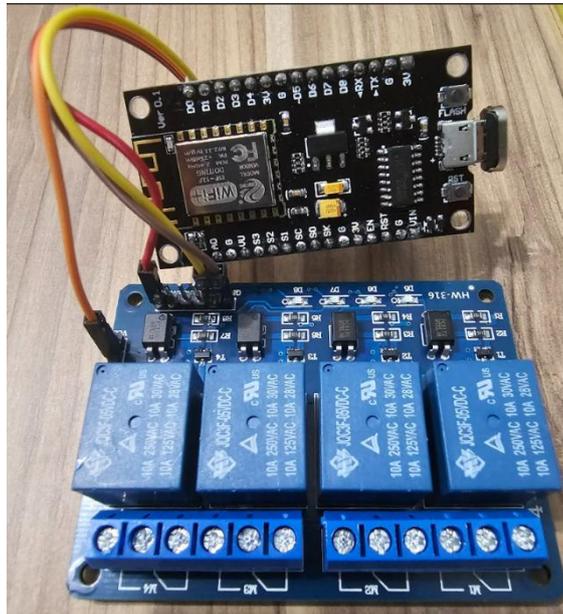
O diagrama de funcionamento deste cenário pode ser verificado na Figura 23 e seus componentes físicos na Figura 24 e na Figura 25 apresentadas abaixo:



Figura 23 - Diagrama de funcionamento do sistema de interruptor inteligente. Fonte: Autor.



Figura 24 - Lâmpada utilizada no interruptor inteligente. Fonte: Autor.



**Figura 25 - Interruptor inteligente construído a partir do ESP8266. Fonte: Autor.**

Como resultado, quando um comando é executado na página *web* publicada pelo ESP8266, a informação é recebida pelo controlador via WiFi, e o modulo relé que realiza a interrupção ou não do circuito, ligando ou desligando a lâmpada.

Nesse contexto, a diferença principal com relação ao primeiro cenário está no funcionamento local, ou seja, sem a exigência de conexão com a *Internet*. Isso oferece maior segurança, uma vez que os dados não estão acessíveis externamente, além de garantir a continuidade das automações mesmo em caso de falha no serviço de *Internet*.

## 5. Análise das plataformas desenvolvidas empregando as tecnologias Zigbee e WiFi

Para a análise de desempenho das redes Zigbee e WiFi, foram construídos dois *setups* de teste projetados para coletar métricas essenciais que não puderam ser acessadas nos dispositivos comerciais mencionados no capítulo anterior. Esses *setups* permitem a obtenção de dados importantes, como potência e taxa de pacotes, que serão utilizados para verificação das taxas de erro e em modelos de propagação de canal.

O desempenho e a sustentabilidade da comunicação foram avaliados em diferentes distâncias entre dispositivos e transmissores. Os testes foram realizados em um ambiente real de casa inteligente, onde cerca de 20 outros dispositivos Zigbee e 15 dispositivos WiFi estavam em operação em redes distintas, simulando condições reais de operação. Os detalhes são apresentados a seguir.

### 5.1 Descrição do ambiente de testes

A casa onde os testes foram realizados apresenta um comprimento total de 1801 cm e uma largura de 343 cm. O transmissor foi colocado em uma das extremidades da casa, precisamente no ponto médio da largura, a 171,5 cm. O receptor foi posicionado em 10 pontos diferentes, com a mesma largura, mas com incrementos de distância de 180 cm, conforme ilustrado na Figura 26 abaixo. As posições foram mantidas constantes tanto para os testes com Zigbee quanto para o WiFi, a fim de minimizar variações e permitir uma comparação mais consistente.

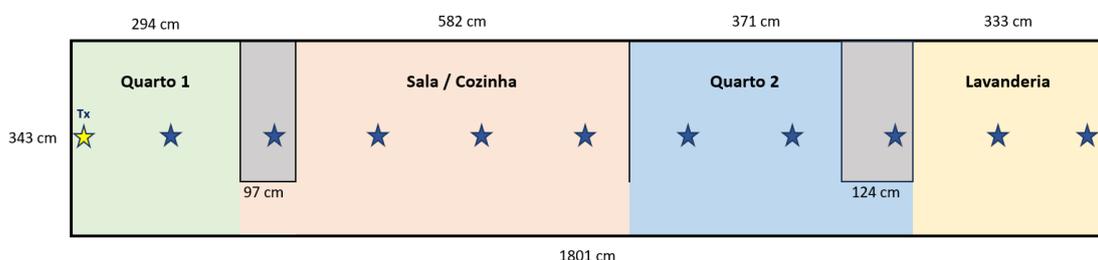


Figura 26 - Representação do ambiente de testes. Fonte: Autor.

Durante a execução dos testes, outros dispositivos Zigbee e WiFi presentes no ambiente não foram desativados. Essa abordagem foi adotada

para simular um cenário real de uma casa inteligente, onde há interação e convivência entre diversos dispositivos.

## 5.2 Análise da plataforma desenvolvida empregando a tecnologia Zigbee

Para os testes práticos empregando a tecnologia Zigbee, foram utilizados módulos XBEE S2C com adaptadores USB, conectados a um computador e controlados pelo *software* DIGI X-CTU para análise de transmissão e espectro. Os detalhes de cada componente assim como a preparação para os testes podem ser verificados a seguir.

Nos testes práticos foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Dois módulos Zigbee XBEE S2C com chipset Silicon Labs EM357 SoC (Anexo A - DATA SHEET XBEE S2C);
- Duas placas adaptadoras para o XBEE, provida de um chip conversor de USB para serial;
- Dois cabos USB padrão mini;
- Computador com sistema operacional Windows 11, 16GB memória RAM e processador Intel Core i3;

Os dispositivos Zigbee utilizados na comunicação, bem como suas placas adaptadoras USB podem ser visualizados a seguir na Figura 27.

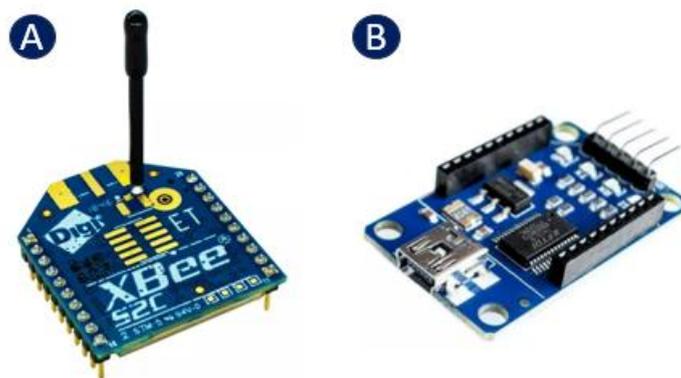


Figura 27 - (A) Dispositivo Zigbee XBEE S2C e (B) Placa adaptadora USB.

Fonte: Autor.

O *software* DIGI X-CTU, foi utilizado para controlar a transmissão e a recepção entre os dispositivos ZB, realizar testes de potência transmitida e análise de espectro (DIGI X-CTU User Guide).

Para a realização dos testes, os módulos XBEE foram configurados como coordenador e *end-device*, onde o coordenador foi considerado transmissor (Tx) e o *end-device*, considerado receptor (Rx). Foi utilizado o canal 18 (0x12 em hexadecimal), onde a frequência está compreendida entre 2439 MHz e 2441 MHz. Na transmissão entre os dispositivos, foi criado um pacote com 84 bytes de dados e o modo API foi habilitado.

O modulo Tx foi conectado ao computador e fixado a 78cm de altura como pode ser observado na Figura 28.



**Figura 28 - Montagem do transmissor (Tx) para plataforma Zigbee. Fonte: Autor.**

O modulo Rx foi fixado em um suporte com altura 143,5cm e alimentado por uma extensão elétrica, permitindo seu deslocamento pelo ambiente, como pode ser verificado na Figura 29.



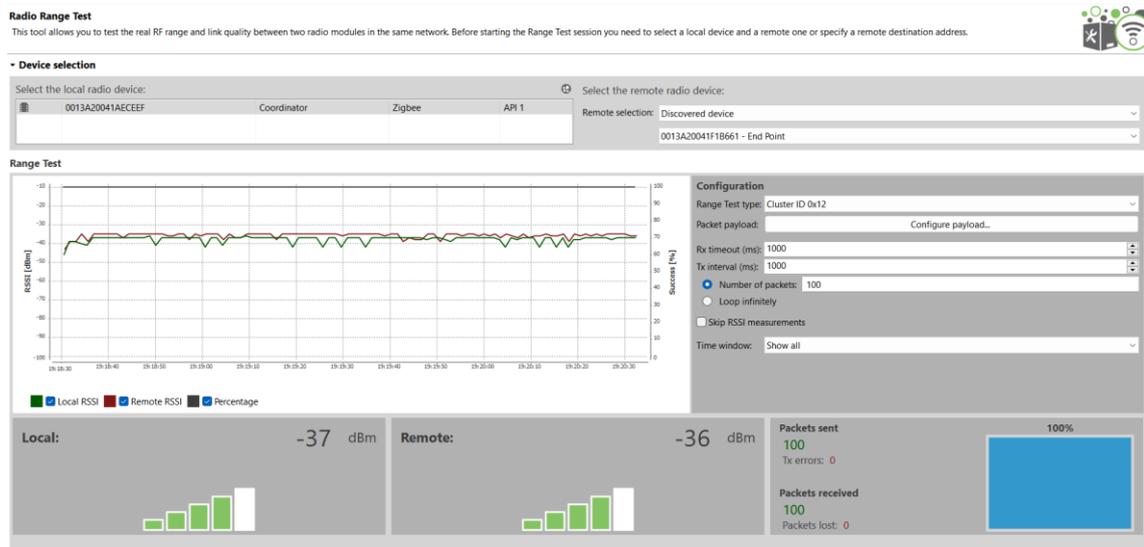
Figura 29 - Montagem do receptor (Rx) para plataforma Zigbee. Fonte: Autor.

### 5.2.1 Parâmetros de desempenho obtidos para plataforma Zigbee

Para verificar o desempenho do Zigbee em uma situação real de casa inteligente, foram utilizados parâmetros como a taxa de erro de pacote (PER), taxa de erro de bit (BER) e a relação sinal ruído (SNR) por meio de medições práticas.

#### *1. Determinação da potência recebida para plataforma Zigbee*

Com os equipamentos posicionados, a medição da potência de transmissão foi efetuada utilizando a ferramenta “*Radio Range Test*” do software X-CTU, onde são efetuadas transmissões durante um intervalo determinado de tempo e são estimadas as potências através da RSSI em ambos os módulos, além das quantidades de pacotes transmitidos, pacotes recebidos, erros e perdas de pacotes como pode ser observado na Figura 30.



**Figura 30 - Exemplo de resultado obtido no Radio Range Test. Fonte: Autor.**

Utilizando uma transmissão de 120 segundos, os valores de RSSI obtidos para cada uma das distâncias podem ser verificados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Potência média recebida no coordenador e end-device.**

Distância (Cm)	RSSI Tx (dBm)	RSSI Rx (dBm)
180	-37	-36
360	-46	-46
540	-68	-68
720	-66	-65
900	-79	-78
1080	-72	-74
1260	-70	-70
1440	-83	-83
1620	-85	-85
1800	-88	-88

**Fonte: Autor.**

Nota-se que o valor da potência, cai com a distância chegando a -88 dBm a 1800cm, e nesta mesma distância começam a ocorrer erros de pacote, porém que não impedem a transmissão, o que é condizente com a sensibilidade do XBEE S2C apresentada pelo fabricante que é de -100 dBm em modo padrão e de -102 dBm em modo *boost*. Também é possível verificar pequenas variações de 1 a 2 dBm entre os valores obtidos em Tx e em Rx.

## II. Determinação da SNR para plataforma Zigbee

Para a determinação da SNR inicialmente é necessário verificar a potência de ruído ( $P_n$ ) do canal de comunicação, na faixa de 2.4 GHz. Esta verificação foi realizada de três formas diferentes, duas medidas práticas utilizando a ferramenta *Spectrum Analyzer* do software X-CTU que utiliza o modulo XBEE conectado ao computador para verificar a presença de sinais de radiofrequência nos canais Zigbee. A terceira verificação trata-se do cálculo teórico considerando a SNR do receptor.

A primeira medida prática da potência de ruído, foi realizada no mesmo local onde foram verificadas as potências RSSI, e para assegurar de que não existia transmissão entre os módulos Tx e Rx, o modulo Rx foi desligado durante os testes.

O teste teve duração de 120 segundos, onde foram verificados dados referentes ao canal 18 (0x12 em hexadecimal) que dentro do software X-CTU corresponde ao canal de número 7 para o Zigbee. A potência média durante o período de teste é calculada pelo próprio X-CTU, e nesta ocasião foi obtida uma potência média de -49 dBm. Durante o tempo de análise também foram registradas a potência máxima e mínima no canal selecionado, que foram de -27 dBm e -85 dBm respectivamente, como pode ser verificado nas medições na Figura 31.



Figura 31 - Análise de espectro realizada no ambiente residencial. Fonte: Autor.

Para determinação da SNR, o valor médio obtido de -49 dBm será considerado potência de ruído, uma vez que não existia transmissão entre os 2 módulos XBEE.

A próxima medida prática da potência de ruído foi realizada seguindo o mesmo procedimento e mantendo o modulo Rx desligado, porém desta vez, o ambiente utilizado foi uma câmara anecoica do Laboratório de Comunicações da Universidade Federal do ABC.

O teste realizado teve duração de 240 segundos, de maneira a minimizar os impactos de abertura e fechamento da porta da câmara nas medidas efetuadas. Verificando novamente o canal 18, que corresponde ao canal 7 no software X-CTU, a potência média no canal sem transmissões entre os módulos XBEE foi de -89 dBm, e durante o tempo de análise foi registrada uma potência máxima de -82 dBm, e mínima de -94 dBm, como pode ser verificado na Figura 32.

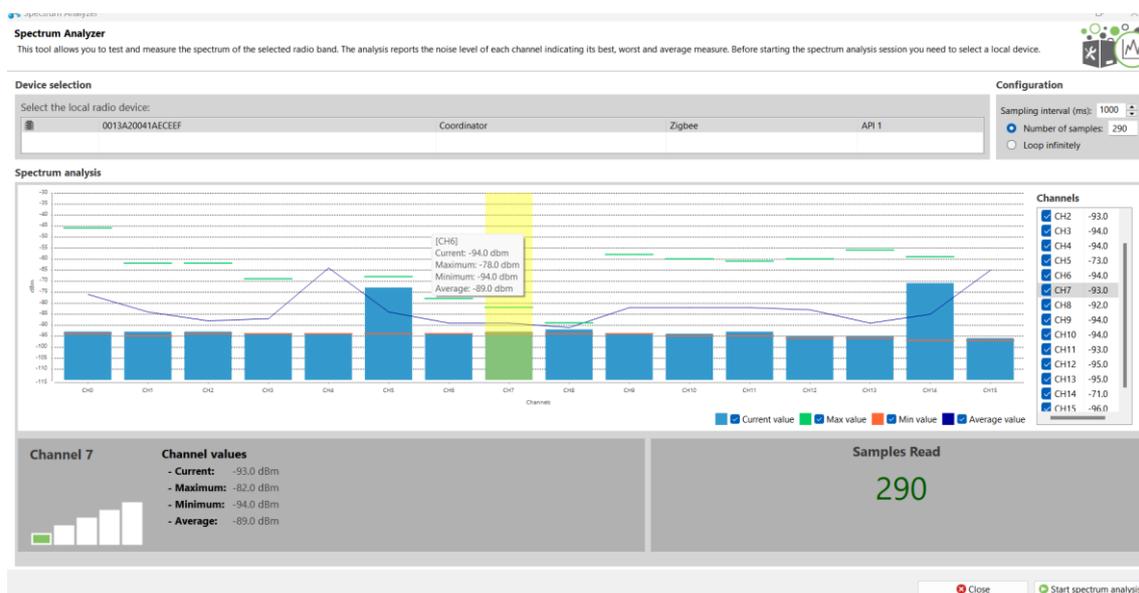


Figura 32 - Análise de espectro realizada na câmara anecoica. Fonte: Autor.

Novamente, o valor médio obtido de -89 dBm, será considerado potência de ruído, uma vez que não existia transmissão entre os 2 módulos XBEE.

A potência de ruído teórica modelada pelo ruído térmico pode ser verificada através da equação 5.1, onde K é a constante de Boltzmann, W é a banda ocupada pelo sinal e T é a temperatura em Kelvin (Sklar, 2001).

$$P_n = K \times T_K \times W \quad 5.1$$

Porém, para o cálculo da SNR, também podemos considerar a figura de ruído ( $F$ ), que é um parâmetro que relaciona a SNR na entrada de um circuito com o SNR na saída deste circuito. Assim, a figura de ruído mede a degradação do SNR causada pelos componentes da rede, principalmente amplificadores (Sklar, 2001).

Desta forma, podemos representar a potência de ruído segundo a equação 5.2, onde  $T_e$  é definido conforme a equação 5.3, utilizando a temperatura do receptor  $T_0$  e a figura de ruído  $F$  (Sklar, 2001).

$$P_{nRx} = K \times (T_K + T_e) \times W \quad 5.2$$

$$T_e = (F - 1) \times T_0 \quad 5.3$$

Considerando a banda  $W$  do canal como 3.5 MHz, as temperaturas  $T$  e  $T_0$  sendo 290 Kelvin e a figura de ruído  $F$  no valor de 6 dB, temos os seguintes valores em dBm:

$$P_n = -108,54 \text{ dBm}$$

$$P_{nRx} = -102,54 \text{ dBm}$$

Nota-se que a utilização da figura de ruído aumenta o valor da potência de ruído em 6 dB, quando comparada a potência calculada sem a utilização da figura de ruído.

Por fim, a SNR será definida para todos os casos segundo a equação 5.4, onde  $P_{in}$  é a potência RSSI no receptor, e  $P_n$  é a potência de ruído.

$$SNR = \frac{P_{in}}{P_n} \quad 5.4$$

Os valores em dB da SNR considerando a potência RSSI obtida anteriormente para cada uma das distâncias e a potência de ruído obtida pela análise de espectro do canal são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Calculo da SNR para as medições realizadas no ambiente residencial e no laboratório.**

Distancia (Cm)	RSSI Rx (dBm)	Pn_Casa (dBm)	SNR_Casa (dB)	Pn_Lab (dBm)	SNR_Lab (dB)
180	-36	-49	13	-89	53
360	-46	-49	3	-89	43
540	-68	-49	-19	-89	21
720	-65	-49	-16	-89	24
900	-78	-49	-29	-89	11
1080	-74	-49	-25	-89	15
1260	-70	-49	-21	-89	19
1440	-83	-49	-34	-89	6
1620	-85	-49	-36	-89	4
1800	-88	-49	-39	-89	1

**Fonte: Autor.**

Podemos verificar que utilizando a potência de ruído de -49 dBm, verificada no ambiente residencial através do software X-CTU, a SNR obtida a uma distância de 180 cm é de 13 dB, e esse valor cai com relação a distância chegando a -39 dB em 1800 cm.

Ao utilizar a potência de ruído verificada no laboratório de -89 dBm, a SNR obtida a uma distância de 180 cm passa a ser 53 dB, o valor também cai com a distância chegando a 1 dB em 1800 cm.

Embora não tenham sido realizadas medidas de potência no laboratório, ao compararmos estes 2 valores, notamos que utilizando a potência de ruído verificada no laboratório o valor da SNR é 40 dB maior, em relação ao valor calculado utilizando a potência de ruído no ambiente residencial. O que reflete a degradação do sinal devido a presença de paredes, portas, além de outros dispositivos transmitindo em mesma frequência.

A SNR considerando os valores da potência de ruído calculados com e sem a figura de ruído são apresentados a seguir na Tabela 8, onde SNR são os valores sem a figura de ruído e  $SNR_{rx}$  são os valores considerando a figura de ruído.

Tabela 8 - SNR calculada a partir da potência de ruído teórica.

Distancia (Cm)	RSSI Rx (dBm)	Pn	SNR	Pnr <sub>x</sub>	SNR <sub>rx</sub>
180	-36	-108,54	72,54	-102,54	66,54
360	-46	-108,54	62,54	-102,54	56,54
540	-68	-108,54	40,54	-102,54	34,54
720	-65	-108,54	43,54	-102,54	37,54
900	-78	-108,54	30,54	-102,54	24,54
1080	-74	-108,54	34,54	-102,54	28,54
1260	-70	-108,54	38,54	-102,54	32,54
1440	-83	-108,54	25,54	-102,54	19,54
1620	-85	-108,54	23,54	-102,54	17,54
1800	-88	-108,54	20,54	-102,54	14,54

Fonte: Autor.

Comparando os resultados obtidos, com e sem a utilização da figura de ruído, notamos uma diferença de 6 dB em todas as distancias, como por exemplo em 180 cm onde temos uma SNR de 72,54 dB e SNR<sub>rx</sub> de 66,54 dB.

Também é possível realizar uma comparação entre os valores obtidos na Tabela 7 e na Tabela 8, essa comparação pode verificada na Figura 33 abaixo.

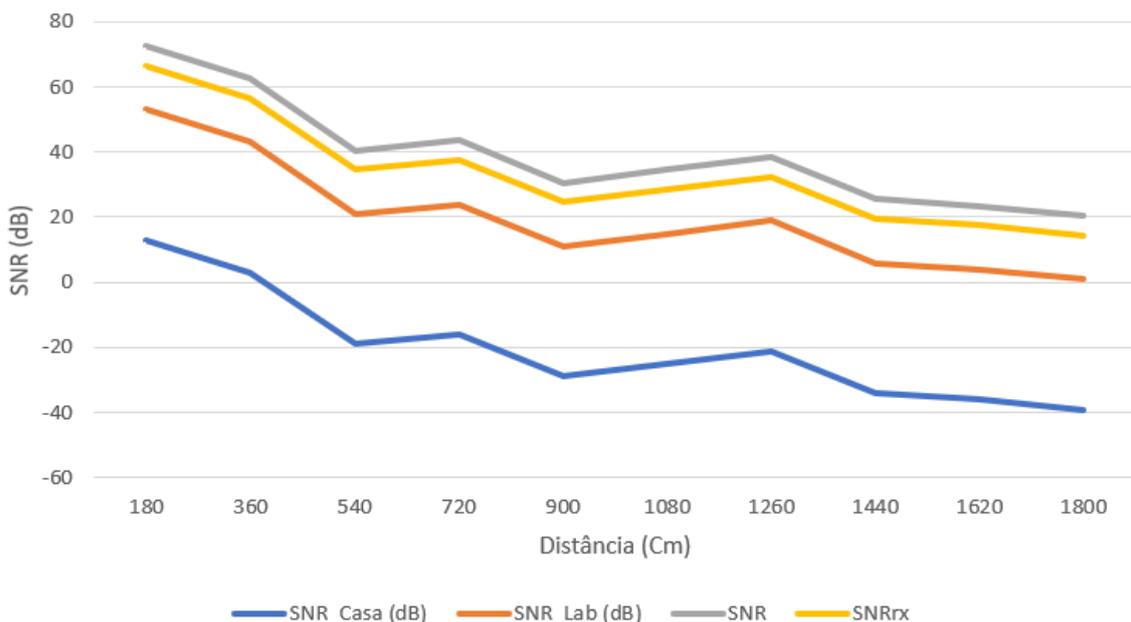


Figura 33 - Gráfico de comparação entre valores de SNR calculados para plataforma Zigbee.  
Fonte: Autor.

Nota-se que os valores de SNR calculados utilizando a potência de ruído medida na casa são os menores em comparação a todos os outros.

### III. Determinação da PER e BER medidas para plataforma Zigbee

Para a verificação da BER e PER medidas, foi utilizada ferramenta “Radio Range Test” do software X-CTU, que também apresenta os números de pacotes enviados, recebidos, com erro de bit ou perdidos durante o teste. Na Figura 34, a seguir, pode-se verificar um exemplo destes dados obtidos no canto inferior esquerdo.

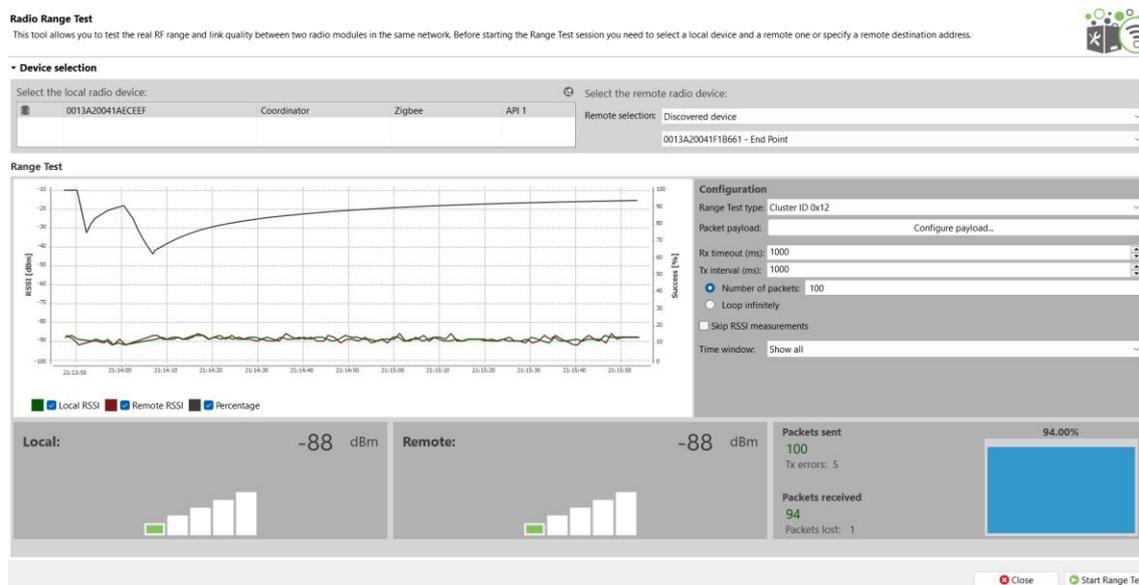


Figura 34 - Exemplo de resultado obtido no Radio Range Test. Fonte: Autor.

Os números de pacotes recebidos, perdidos e com erro, podem ser verificados na Tabela 9 para cada uma das distâncias verificadas.

Tabela 9 - Pacotes recebidos, perdidos e com erro para plataforma Zigbee.

Distancia (Cm)	Pct Enviados	Pct com erro	Pct Recebidos	Pct Perdidos	Porcentagem
180	100	0	100	0	1
360	100	0	100	0	1
540	100	0	100	0	1
720	100	0	100	0	1
900	100	0	100	0	1
1080	100	0	100	0	1
1260	100	0	100	0	1
1440	100	0	100	0	1
1620	100	0	100	0	1
1800	100	5	94	1	0,94

Fonte: Autor.

No contexto deste trabalho de graduação, os parâmetros estatísticos relacionados à transmissão de pacotes foram definidos conforme descrito a seguir:

- **Pacotes enviados:** correspondem a todos os pacotes transmitidos pelo transmissor (Tx);
- **Pacotes com erro:** são aqueles recebidos pelo receptor (Rx), mas cuja informação transmitida não pôde ser extraída corretamente;
- **Pacotes recebidos:** representam os pacotes transmitidos pelo Tx e recebidos com sucesso pelo Rx, sem erros na transmissão;
- **Pacotes perdidos:** são os pacotes transmitidos pelo Tx que não chegaram ao Rx, ou seja, que não foram recebidos de forma alguma;

Com base nos pacotes medidos, é possível determinar diversos parâmetros de taxa de erro, como a PER total, que indica a proporção de erros e perdas de pacotes. Esse parâmetro pode ser calculado utilizando a equação 5.5 (Casey, P.R., Tepe, K.E. & Kar, N., 2010),

$$PER_{Total} = \frac{Pacotes_{Erro} + Pacotes_{Perdidos}}{Pacotes_{Enviados}} \quad 5.5$$

Considerando apenas o número de pacotes com erro é possível estabelecer a  $PER_{RxError}$  maneira isolada através da equação 5.6 (Casey, P.R., Tepe, K.E. & Kar, N., 2010),

$$PER_{RxError} = \frac{Pacotes_{Erro}}{Pacotes_{Enviados}} \quad 5.6$$

Através do número de perdas de pacote também é possível determinar a taxa de perda de pacote (PLR) através da equação 5.7 (Casey, P.R., Tepe, K.E. & Kar, N., 2010),

$$PLR = \frac{Pacotes_{Perdidos}}{Pacotes_{Enviados}} \quad 5.6$$

A BER por sua vez, foi obtida utilizando a equação 5.4, onde a  $PER_{RxError}$  é conhecida, e  $b$  é o número de bits por pacote. (Rappaport, 2002),

$$PER_{RXError} = 1 - (1 - BER_{Medida})^b \quad 5.7$$

Desta forma, os valores medidos de BER e PER conforme os dados da medidos e considerando pacotes com 84 bytes de informação são apresentados a seguir na Tabela 10.

**Tabela 10 – Parâmetros de taxa de erro determinados para plataforma Zigbee.**

Distância (Cm)	PERTotal	PER RXError	PLR	BER
180	0	0	0	0
360	0	0	0	0
540	0	0	0	0
720	0	0	0	0
900	0	0	0	0
1080	0	0	0	0
1260	0	0	0	0
1440	0	0	0	0
1620	0	0	0	0
1800	0,06	0,05	0,01	7,63E-05

Fonte: Autor.

Segundo a norma IEEE 802.15.4, a taxa de erros de pacote para dispositivos Zigbee, deve ser igual ou inferior a 1%. E podemos verificar que os erros de pacote ocorreram apenas a distância de 1800 cm, onde a PLR verificada foi 1%, a taxa de erros excluindo perdas 5%, e a PER total 6%. O que é coerente visto a degradação esperada do sinal com o aumento da distância.

Também é possível realizar uma análise das médias de BER e PER com base na soma dos resultados obtidos em todas as medições. Esta análise tem como objetivo verificar o impacto dos erros considerando todos os 1000 pacotes transmitidos durante os testes, os valores correspondentes estão apresentados na Tabela 11 abaixo.

**Tabela 11 - PER e BER médias.**

Pkg Sent	Error	Pkg Received	Pkg Lost	Percentage	PERMedTot()	PERMed (rxer)	PLR Med	BER
1000	5	94	1	0,094	0,006	0,005	0,001	7,45911E-06

Fonte: Autor.

Nota-se que ao considerar todos os 1000 pacotes, a PER média total para a ser de 0.6%, enquanto a taxa de erros média excluindo perdas é de 0,5% e a PLR de 0.1%.

### 5.2.2 Medidas de propagação obtidas para plataforma Zigbee

Nesta sessão, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo de *shadowing* log-normal, utilizando a equação 3.22. Para os cálculos, foram considerados os valores de potência recebida conforme listados na Tabela 6. Com base nesses dados, foram determinados os coeficientes de desvanecimento, representados pelos parâmetros  $\gamma$ ,  $\sigma^2$  e  $\sigma$ , os quais descrevem a variabilidade do sinal causada pelo efeito de *shadowing* em diferentes cenários.

Os cálculos foram realizados com o auxílio do *software* GNU Octave. Abaixo, são apresentados os valores obtidos para cada um dos parâmetros:

$$\gamma = 5.07$$

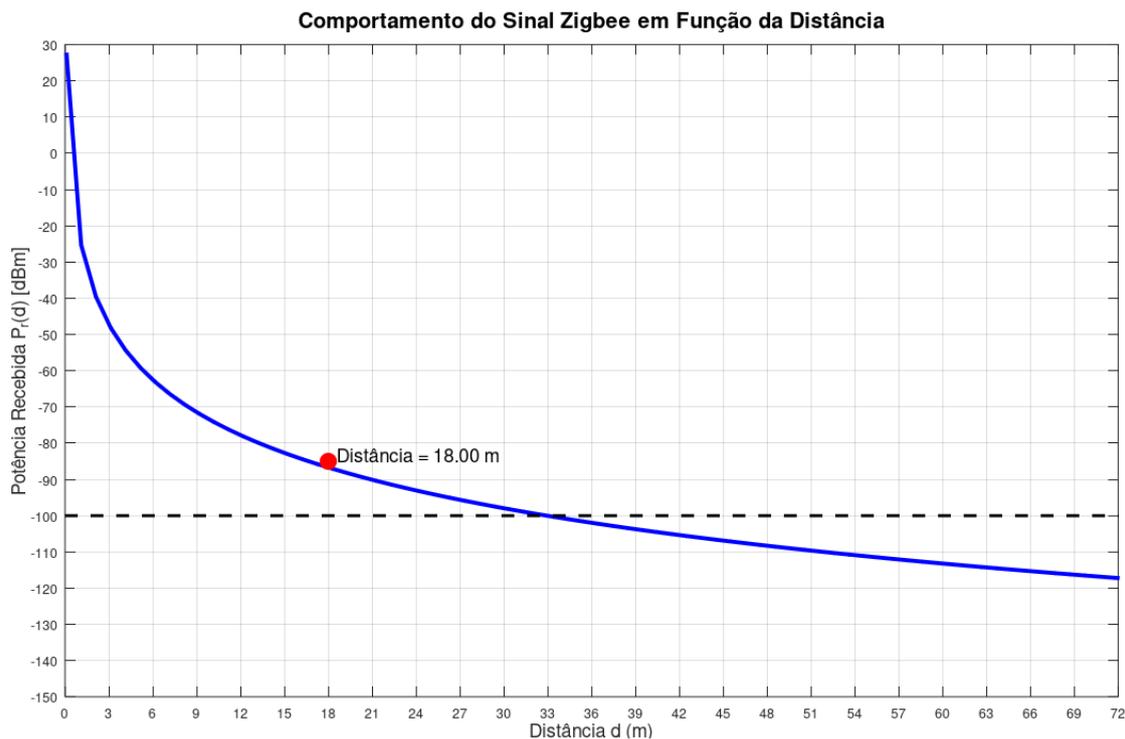
$$\sigma^2 = 21.79 \text{ dB}^2$$

$$\sigma = 4.66 \text{ dB}$$

Assim, a função que descreve o comportamento do sinal Zigbee, considerando  $d_{ref} = 1.8 \text{ m}$  e  $\overline{PL}(d_{ref}) = -36 \text{ dBm}$  é dada por:

$$P_r(d) \text{ dBm} = -36 + 10 \times 5.07 \times \log\left(\frac{1.8}{d}\right) \quad (5.1)$$

Essa expressão permite modelar a potência do sinal recebido em função da distância  $d$ , levando em conta as características específicas do ambiente de propagação. A Figura 35 ilustra graficamente essa relação.



**Figura 35 - Potência recebida Zigbee em função da distância. Fonte: Autor.**

No gráfico, destaca-se o ponto em que a potência recebida alcança -85 dBm, valor que representa a sensibilidade mínima para dispositivos compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2016) e -100 dBm que seria a sensibilidade dos módulos XBEE utilizados (Anexo A - DATA SHEET XBEE S2C).

### **5.3 Análise da plataforma desenvolvida empregando a tecnologia WiFi**

Nos testes práticos, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Computador com sistema operacional Windows 11, 16GB memória RAM e processador Intel Core i3;
- Computador com sistema operacional Windows 11, 64GB memória RAM e processador Intel Core i7;
- Roteador TP-Link Deco M4 (IEEE 802.11ac);

Além disso, também foram utilizados os *softwares* InSSIDer, para verificação das potências e Wireshark para verificação dos pacotes.

O roteador utilizado foi configurado para operar em 2.4 GHz no padrão IEEE 802.11n e posicionado a 75 cm de altura como pode ser verificado na Figura 36.



Figura 36 - Roteador TP-Link Deco M4. Fonte: Autor.

O computador com Intel Core I3 foi conectado a ele executando o *software* InSSIDer para análise das potências recebidas. Uma banqueta com 65 cm foi utilizada como apoio para mover o computador pela casa conforme a Figura 37.

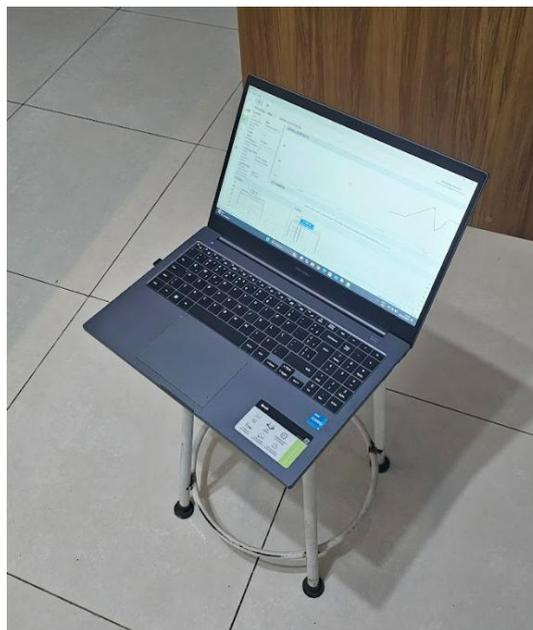


Figura 37 - Computador com Software InSSIDer. Fonte: Autor.

Para possibilitar a análise dos pacotes, o segundo computador foi conectado ao roteador, e uma pasta compartilhada foi criada para troca de arquivos entre os dois dispositivos via WiFi. Foram transferidos três arquivos, totalizando 1,48 GB, e os pacotes foram monitorados no Wireshark, filtrando exclusivamente a comunicação entre os endereços IP dos dois computadores.

### 5.3.1 Parâmetros de desempenho obtidos para plataforma WiFi

De forma similar aos testes com Zigbee, foram utilizados parâmetros como PER, BER e SNR em medições práticas para avaliar o desempenho.

#### I. Determinação da potência recebida para plataforma WiFi

Com os equipamentos posicionados, a medição da potência de transmissão foi realizada com o *software* InSSIDer durante aproximadamente 2,5 minutos resultando em um gráfico de potência conforme ilustrado na Figura 38.



Figura 38 - Exemplo de medida utilizando o software InSSIDer. Fonte: Autor.

O procedimento foi repetido para cada uma das 10 posições, e o valor médio para cada ponto pode ser verificado na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12 - Medidas de potência WiFi.

Ponto	Distancia (Cm)	RSSI Rx(dBm)
1	180	-13,2
2	360	-50,8
3	540	-29,2
4	720	-40,4
5	900	-48,4
6	1080	-53,8
7	1260	-53,2
8	1440	-54
9	1620	-61,2
10	1800	-60

Fonte: Autor.

Nota-se um decréscimo mais acentuado da potência recebida nos primeiros 900 cm, com valores que vão de -13,2 dBm a 180 cm, para -48,4 dBm a 900 cm. Um ponto de destaque é o registrado a 360 cm, onde a potência medida foi de -50,8 dBm, coincidindo com a localização de um banheiro, espaço estreito e cercado por paredes, que possivelmente contribuem para a degradação do sinal devido à maior atenuação. Já em distâncias superiores a 900 cm, o RSSI tende a se estabilizar em torno de -60 dBm, indicando uma menor variação na intensidade do sinal nessas condições.

## II. Determinação da SNR para plataforma WiFi

Para a obtenção da SNR inicialmente é necessário verificar a potência de ruído do canal de comunicação, na frequência de 2.4 GHz. Para o caso do WiFi foi utilizado o cálculo teórico somente devido à falta de um analisador de espectro disponível no ambiente residencial.

A potência de ruído teórica foi modelada a partir do ruído térmico utilizando a equação 5.1 (Sklar, 2001) apresentada anteriormente. Foram considerados a banda  $W$  de 40 MHz e a temperatura  $T$  de 290 Kelvin.

$$P_n = -97,96 \text{ dBm}$$

A figura de ruído (F), também foi analisada representando a degradação causada pelos componentes do circuito principalmente amplificadores (Sklar, 2001).

Considerando as temperaturas  $T$  e  $T_0$  sendo 290 Kelvin e a figura de ruído  $F$  de 6 dB, foi obtido o valor abaixo em dBm:

$$P_{nRx} = -91,96 \text{ dBm}$$

Por fim, a SNR foi definida segundo a equação 5.4. Os valores em dB da SNR, considerando a potência recebida em cada uma das distâncias e a potência de ruído calculada são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13 – SNR Calculada WiFi.**

Distancia (Cm)	RSSI Rx (dBm)	Pn	SNR	Pnrx	SNRrx
180	-13,2	-97,96	84,76	-91,96	78,76
360	-50,8	-97,96	47,16	-91,96	41,16
540	-29,2	-97,96	68,76	-91,96	62,76
720	-40,4	-97,96	57,56	-91,96	51,56
900	-48,4	-97,96	49,56	-91,96	43,56
1080	-53,8	-97,96	44,16	-91,96	38,16
1260	-53,2	-97,96	44,76	-91,96	38,76
1440	-54	-97,96	43,96	-91,96	37,96
1620	-61,2	-97,96	36,76	-91,96	30,76
1800	-60	-97,96	37,96	-91,96	31,96

**Fonte: Autor.**

Observa-se que o SNR diminui com o aumento da distância, passando de 84,76 dB a 180 cm para 37,96 dB a 1800 cm, devido à atenuação do sinal ao longo do percurso. Quando considerada a figura de ruído, os valores de SNR ajustados ( $SNR_{rx}$ ) apresentam uma redução uniforme de 6 dB em relação ao SNR em todas as distâncias, como exemplificado em 180 cm, onde o SNR é de 84,76 dB e o  $SNR_{rx}$  é de 78,76 dB.

### *III. Determinação da BER e PER Medidas para plataforma WiFi*

Para verificar a BER e PER medidas, utilizou-se o *software* Wireshark durante a transferência de três arquivos, totalizando 1,48 GB. A análise foi limitada aos endereços IP do computador emissor e do receptor, que foram posicionados juntos, a 1800 cm do roteador, como representado na Figura 39.

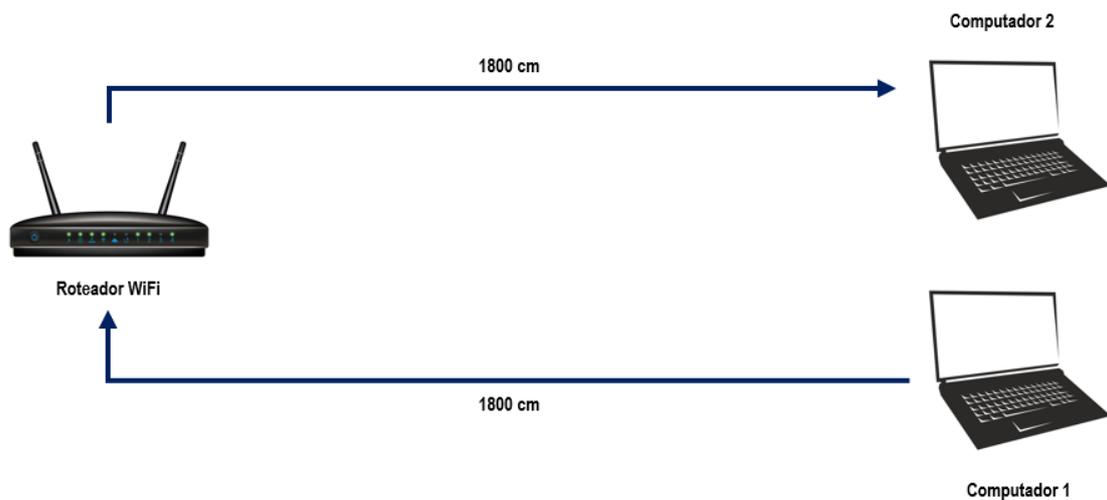


Figura 39 - Representação da montagem dos computadores. Fonte: Autor.

Os números de pacotes recebidos, perdidos e com erro estão detalhados na Tabela 14.

Tabela 14 - Pacotes recebidos, perdidos e com erro para plataforma WiFi.

Distancia (Cm)	RSSI Rx(dBm)	Pkg Sent	Error	Pkg Received	Pkg Lost	Percentage
1800	-60	658683	7590	651093	56	0,99

Fonte: Autor.

Foram calculados a  $PER_{Total}$ ,  $PER_{RxError}$ ,  $PLR$  e a  $BER$  considerando pacotes com média de 2257 bytes. O Número de bytes por pacote foi obtido também através do software Wireshark como pode ser verificado na Figura 40.

Protocol	Percent Packets	Packets	Percent Bytes	Bytes	Bits/s	End Packets	End Bytes	End Bits
Frame	100.0	658683	100.0	1486535955	3184 k	0	0	0
Ethernet	100.0	658683	0.6	9221562	19 k	0	0	0
Internet Protocol Version 6	100.0	658683	1.8	26347320	56 k	0	0	0
Transmission Control Protocol	100.0	658683	0.9	13560564	29 k	650578	13398464	28 k
NetBIOS Session Service	1.2	8020	94.8	1409773567	3020 k	4352	6755072	14 k
SMB2 (Server Message Block Protocol version 2)	0.6	3663	94.4	1403003434	3005 k	2241	264779	567
Distributed Computing Environment / Remote Procedure Call (DCE/RPC)	0.0	72	0.0	15136	32	36	4968	10

Figura 40 - Número de pacotes e Bytes analisados pelo Wireshark. Fonte: Autor.

Os valores calculados para a  $PER_{Total}$ ,  $PER_{RxError}$ ,  $PLR$  e a  $BER$  são apresentados na Tabela 15 a seguir:

Tabela 15 – Parâmetros de taxa de erro determinados para plataforma WiFi.

Ponto	Distancia (Cm)	PERtotal	PERrxerror	PLR	BER
10	1800	0,0116	0,0115	8,502E-05	6,419E-07

Fonte: Autor.

A  $PER_{Total}$  obtida foi de 1,16%, valor que está significativamente abaixo do limite de 10% estabelecido para dispositivos que utilizam modulação OFDM, como o roteador padrão IEEE 802.11n utilizado nos testes (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012). Esse índice, que considera tanto erros quanto perdas de pacotes, demonstra um nível satisfatório de desempenho, evidenciando a estabilidade dos dispositivos testados nas condições experimentais avaliadas.

### 5.3.2 Medidas de propagação obtidas para plataforma WiFi

Nesta sessão, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo de *shadowing* log-normal e utilizando os valores de potência recebida apresentados na Tabela 12. Com base nos dados coletados, foram calculados os coeficientes de desvanecimento para o sinal WiFi utilizando o *software* GNU Octave.

$$\gamma = 4.88$$

$$\sigma^2 = 60.90 \text{ dB}^2$$

$$\sigma = 7.80 \text{ dB}$$

Assim, a função que descreve o comportamento do sinal WiFi, considerando  $d_{ref} = 1.8 \text{ m}$  e  $\overline{PL}(d_{ref}) = -13.2 \text{ dBm}$  é dada por:

$$P_r(d) \text{ dBm} = -13.2 + 10 \times 4.88 \times \log\left(\frac{1.8}{d}\right) \quad (5.2)$$

A Figura 41 apresenta a variação da potência recebida em função da distância  $d$ , destacando o ponto crítico de -80 dBm, que representa a sensibilidade mínima necessária para uma conexão básica, conforme especificações para uma banda  $W$  de 20 MHz e modulação BPSK (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

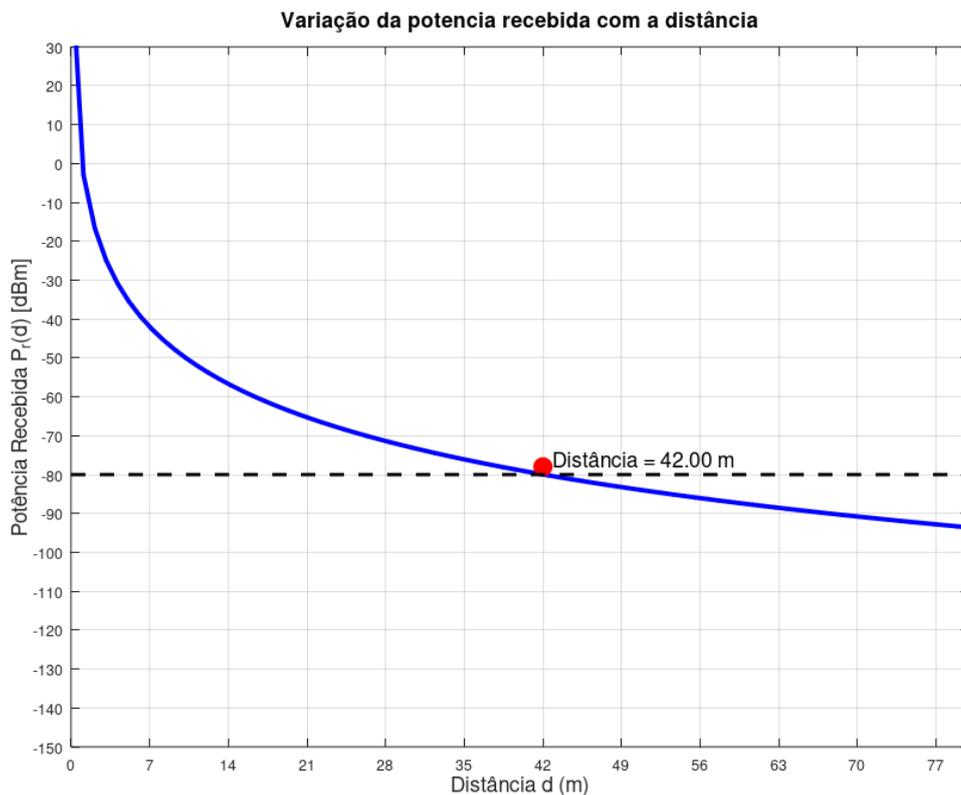


Figura 41 - Potência recebida WiFi em função da distância. Fonte: Autor.

#### 5.4 Comparação dos resultados obtidos

A análise de desempenho, baseada na PER, revelou que, para o Zigbee, a taxa de erro no limite de alcance (18 metros) foi de 6%, acima do limite esperado de 1%. No entanto, ao calcular a PER média em um conjunto de 10 medições, obteve-se uma média de 0,6%, inferior ao limite especificado, indicando que a performance pode variar conforme o número de pacotes analisados, sendo necessárias medições com um maior número de pacotes para uma avaliação mais robusta.

Para o WiFi, a PER foi analisada no ponto de 18 metros, onde se obteve uma taxa de 1,16%, bem abaixo do limite de 10% especificado para dispositivos OFDM, como o padrão IEEE 802.11n. Isso indica uma performance satisfatória do WiFi em toda extensão do ambiente de testes.

As análises de propagação indicaram que o ambiente indoor é particularmente sensível, apresentando um coeficiente de perda de propagação mais elevado e uma atenuação significativa do sinal, tanto para o Zigbee ( $\gamma = 5,07$ ) quanto para o WiFi ( $\gamma = 4,88$ ). Esses valores estão acima do esperado para ambientes obstruídos urbanos ( $\gamma = 4$ ), sugerindo que, em cenários residenciais, as obstruções internas, como paredes e móveis, têm um impacto relevante na propagação dos sinais.

Com base nos valores de  $\gamma$ , foi possível estimar o alcance máximo para cada protocolo: aproximadamente 18 metros para o Zigbee e 42 metros para o WiFi. Esses alcances são adequados para a maioria das aplicações em casas inteligentes, que eventualmente podem necessitar mais de um roteador ou dispositivos repetidores de sinal.

## **6. Conclusões e pesquisas futuras**

### **6.1 Principais conclusões**

O objetivo deste estudo foi investigar a performance e a escalabilidade de dispositivos inteligentes Zigbee e WiFi em um ambiente real de casa inteligente, com foco na comparação entre os parâmetros medidos no ambiente, os valores calculados a partir dessas medições e os requisitos das normas IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4.

Os resultados deste estudo fornecem uma base sólida para a implementação de dispositivos Zigbee e WiFi no ambiente residencial analisado. A metodologia adotada pode servir como diretriz para o posicionamento estratégico de roteadores e dispositivos, visando maximizar a cobertura e o desempenho. Este trabalho contribui para a compreensão das limitações e potencialidades dos protocolos Zigbee e WiFi em aplicações domésticas, auxiliando na criação de casas inteligentes mais eficientes e robustas.

### **6.2 Sugestões de trabalhos futuros**

Para aprofundar e expandir os resultados obtidos neste estudo, pesquisas futuras poderiam focar em aprimorar a precisão das medições e a robustez dos dados coletados. Isso poderia ser alcançado por meio do uso de equipamentos de medição capazes de capturar detalhes mais refinados sobre o comportamento dos sinais Zigbee e WiFi em ambientes residenciais. A utilização de analisadores de espectro de alta precisão, dispositivos com capacidade de monitoramento contínuo seriam especialmente úteis para entender melhor as variações de sinal e a taxa de erro de pacotes.

Além disso, uma diversificação dos cenários e dos posicionamentos dos dispositivos seria recomendada, variando fatores como a disposição dos móveis, e outros obstáculos que possam interferir na propagação do sinal. Testes em diferentes tipos de residência, também forneceria uma visão mais completa sobre como o layout afeta o desempenho dos protocolos Zigbee e WiFi.

## Referências Bibliográficas

Vivek G.V, Sunil M.P. Enabling IoT Services Using WiFi - Zigbee Gateway For A Home Automation System. *IEEE International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks*, p.77-85, 2015.

Stolojescu-Crisan, C.;Crisan, C.; Butunoi, B.-P. An IoT-Based Smart Home Automation System. *Sensors (MDPI)*, 2021.

Khan, M.A.; Ahmad, I.; Nordin, A.N.; Ahmed, A.E.-S.; Mewada, H.; Daradkeh, Y.I.; Rasheed, S.; Eldin, E.T.; Shafiq, M. Smart Android Based Home Automation System Using Internet of Things. *Sustainability (MDPI)*, 2022.

Knapik, W.; Kowalska, M.K.; Odlanicka-Poczobutt, M.; Kasperek, M. The Internet of Things through Internet Access Using an Electrical Power Transmission System (Power Line Communication) to Improve Digital Competencies and Quality of Life of Selected Social Groups in Poland's Rural Areas. *Energies*, 2022, 15, 5018.

J.R. Emiliano Leite, Paulo S. Martins e Edson L. Ursini. Segurança e Gerenciamento da Rede IoT. *Brazilian Technology Symposium (UNICAMP)*,2019.

Finep inovação e pesquisa. Kevin Ashton – entrevista exclusiva com o criador do termo “Internet das Coisas”. Disponível em: <http://finep.gov.br/noticias/todas-noticias/4446-kevin-ashton-entrevista-exclusiva-com-o-criador-do-termo-Internet-das-coisas> Acesso em: 03 Abril 2024.

International telecommunication union. Overview of the Internet of things - Recommendation ITU-T Y.2060. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx#:~:text=The%20Internet%20of%20Things%20%28IoT%29%20has%20been%20defined,existing%20and%20evolving%20interoperable%20information%20and%20communication%20technologies>. Acesso em: 03 Abril 2024.

Digital Guide IONOS. What is Ethernet (IEEE 802.3). 2022. Disponível em: <https://www.ionos.com/digitalguide/server/know-how/ethernet/> Acesso em 17 Abril 2024.

Digital Guide IONOS. CSMA/CD. 2019. Disponível em: <https://www.ionos.com/digitalguide/server/know-how/csmacd-carrier-sense-multiple-access-collision-detection/> Acesso em 17 Abril 2024.

Disciplinas USP: Redes de Computadores Prof. Ivan Nunes da Silva. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5650960/mod\\_resource/content/2/REDES\\_Aula03.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5650960/mod_resource/content/2/REDES_Aula03.pdf) Acesso em: 17 abril 2024.

Costa L., Duarte O. UFRJ: Redes de computadores – Camada Física – OFDM. 2007. Disponível em: [https://www.gta.ufrj.br/grad/07\\_2/jefferson/Page5.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/07_2/jefferson/Page5.html) Acesso em: 17 Abril 2024

J.F Kurose ; K.W. Ross, PTC 2550 - Aula 11 – USP Disciplinas (Adaptado). 2017. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3251819/mod\\_resource/content/0/PTC\\_2550%20-%20201701%20-%20Aula%2011.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3251819/mod_resource/content/0/PTC_2550%20-%20201701%20-%20Aula%2011.pdf). Acesso em: 17 Abril 2024.

Datasheet: Raspberry Pi 4 Model B. Release 1.1. 2014. Disponível em: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf> Acesso em: 16 Abril 2014.

Datasheet: ESP8266EX. Version 7.1. 2023 Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf) Acesso em: 16 Abril 2024.

Zigbee 3.0 USB Dongle Plus User Manual and Specifications. 2022. Disponível em: <https://sonoff.tech/product/gateway-and-sensors/sonoff-Zigbee-3-0-usb-dongle-plus-e/> Acesso em: 16 Abril 2024.

Home Assistant Documentation. Disponível em: <https://www.home-assistant.io/docs/> Acesso em: 16 Abril 2024.

DIGI X-CTU User Guide. Disponível em: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/90001458-13/default.htm> Acesso em: 20 Agosto 2024.

Casey, P.R., Tepe, K.E. & Kar, N. Design and Implementation of a Testbed for IEEE 802.15.4 (Zigbee) Performance Measurements. *Journal of Wireless Communications Network* 103406 (2010).

SKLAR, Bernard. Digital Communications – Fundamentals and Applications. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

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

ZIGBEE ALLIANCE. *Zigbee Specification*. Zigbee Document 05-3474-21. Davis, CA: Zigbee Alliance, 2015.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. IEEE Std IEEE 802.15.4-2015. New York: IEEE, 2016.

TEKTRONIX. *WiFi: Overview of the IEEE 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements*. Disponível em: <https://www.tektronix.com/WiFi2>. Acesso em: 1 nov. 2024.

STALLINGS, William. *IEEE 802.11: Wireless LANs from a to n*. IT Pro, v. 32, n. 4, p. 32-34, set./out. 2004.

SENDRA, Sandra; GARCIA, Miguel; TURRO, Carlos; LLORET, Jaime. *WLAN IEEE 802.11a/b/g/n Indoor Coverage and Interference Performance Study*. International Journal on Advances in Networks and Services, v. 4, n. 1 e 2, 2011. Disponível em: [http://www.ariajournals.org/networks\\_and\\_services/](http://www.ariajournals.org/networks_and_services/). Acesso em: 1 nov. 2024.

NATIONAL INSTRUMENTS. *Introduction to Wireless LAN Measurements from IEEE 802.11a to IEEE 802.11ac, 2012*. Disponível em: <https://www.ni.com/rf-academy>. Acesso em: 1 nov. 2024.

# Anexos

## ANEXO A – DATA SHEET XBEE S2C.

SPECIFICATIONS	XBee® S2C 802.15.4
<b>PERFORMANCE</b>	
<b>TRANSCEIVER CHIPSET</b>	Silicon Labs EM357 SoC
<b>DATA RATE</b>	RF 250 Kbps, Serial up to 1 Mbps
<b>INDOOR/URBAN RANGE</b>	200 ft (60 m)
<b>OUTDOOR/RF LINE-OF-SIGHT RANGE</b>	4000 ft (1200 m)
<b>TRANSMIT POWER</b>	3.1 mW (+5 dBm) / 6.3 mW (+8 dBm) boost mode
<b>RECEIVER SENSITIVITY (1% PER)</b>	-100 dBm / -102 dBm boost mode
<b>FEATURES</b>	
<b>SERIAL DATA INTERFACE</b>	UART, SPI
<b>CONFIGURATION METHOD</b>	API or AT commands, local or over-the-air (OTA)
<b>FREQUENCY BAND</b>	ISM 2.4 GHz
<b>FORM FACTOR</b>	Through-Hole, Surface Mount
<b>HARDWARE</b>	S2C
<b>ADC INPUTS</b>	(4) 10-bit ADC inputs
<b>DIGITAL I/O</b>	15
<b>ANTENNA OPTIONS</b>	Through-Hole: PCB Antenna, U.FL Connector, RPSMA Connector, or Integ SMT: RF Pad, PCB Antenna, or U.FL Connector
<b>OPERATING TEMPERATURE</b>	-40° C to +85° C
<b>DIMENSIONS (L X W X H) AND WEIGHT</b>	Through-Hole: 0.960 x 1.087 in (2.438 x 2.761 cm) SMT: 0.866 x 1.33 x 0.120 in (2.199 x 3.4 x 0.305 cm)
<b>NETWORKING AND SECURITY</b>	
<b>PROTOCOL</b>	XBee 802.15.4 (Proprietary 802.15.4)
<b>UPDATABLE TO DIGIMESH PROTOCOL</b>	Yes
<b>UPDATABLE TO ZIGBEE PROTOCOL</b>	Yes
<b>INTERFERENCE IMMUNITY</b>	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
<b>ENCRYPTION</b>	128-bit AES
<b>RELIABLE PACKET DELIVERY</b>	Retries/Acknowledgements
<b>IDS</b>	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)
<b>CHANNELS</b>	16 channels
<b>POWER REQUIREMENTS</b>	
<b>SUPPLY VOLTAGE</b>	2.1 to 3.6V
<b>TRANSMIT CURRENT</b>	33 mA @ 3.3 VDC / 45 mA boost mode
<b>RECEIVE CURRENT</b>	28 mA @ 3.3 VDC / 31 mA boost mode
<b>POWER-DOWN CURRENT</b>	<1 µA @ 25° C