

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
BACHARELADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

Análise comparativa de desempenho de redes wi-fi 4, 5, 6 em ambientes com fiber-to-the-home

Juarez de Paula Campos Júnior

JUIZ DE FORA
AGOSTO, 2025

Análise comparativa de desempenho de redes wi-fi 4, 5, 6 em ambientes com fiber-to-the-home

JUAREZ DE PAULA CAMPOS JÚNIOR

Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da computação
Bacharelado em Sistemas de Informação

Orientador: Alex Borges Vieira

JUIZ DE FORA
AGOSTO, 2025

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO DE REDES WI-FI 4, 5, 6 EM AMBIENTES COM FIBER-TO-THE-HOME

Juarez de Paula Campos Júnior

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA , COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO.

Aprovada por:

Alex Borges Vieira
Doutorado em Ciências da Computação

Edelberto Franco Silva
Doutorado em Computação

Luciano Jerez Chaves
Doutorado em Ciência da Computação

JUIZ DE FORA
14 DE AGOSTO, 2025

Aos meus amigos e irmãos.

Aos pais, pelo apoio e sustento.

Resumo

A evolução das tecnologias de comunicação sem fio tem ampliado significativamente o papel das redes *Wi-Fi* na conectividade de ambientes residenciais, comerciais e institucionais. Com a presença consolidada dos padrões IEEE 802.11 a ,b, g, n, ac e ax no mercado, torna-se essencial compreender a evolução dessas tecnologias em contextos reais de uso. Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre essas tecnologias, considerando critérios como velocidade de transmissão, latência, alcance e estabilidade.

Palavras-chave: *Wi-Fi*. Redes sem fio. IEEE. Desempenho de redes. Tecnologias de comunicação.

Abstract

The evolution of wireless communication technologies has significantly expanded the role of *Wi-Fi* networks in connectivity in residential, commercial, and institutional environments. With the established presence of the IEEE 802.11 a ,b, g, n, ac and ax standards in the market, it is essential to understand the evolution of these technologies in real-world contexts. This work aims to conduct a comparative analysis of these technologies, considering criteria such as transmission speed, latency, range, and stability.

Keywords: *Wi-Fi*. Wireless networks. IEEE. Network performance. Communication technologies.

Agradecimentos

Dedico e agradeço este trabalho primeiramente a Deus, pela força e desempenho, à minha família, minha amada esposa Poliana Campos, por sempre me apoiar nos momentos de constantes desafios, a minha doce filha Ana Luiza Anacleto Campos, aos meus pais, minha mãe Maria Clemilda Silva Campos e Juarez de Paula Campos, pelo amor incondicional e pelos conselhos e também apoio ao meu irmão, meus avôs e meus sogros, pelo apoio e incentivo constantes durante toda minha trajetória acadêmica.

“Um ser humano deve transformar informação em inteligência ou conhecimento.

Tendemos a esquecer que nenhum computador jamais fará uma nova pergunta”.

*Grace Hopper, cientista da computação
pioneira em programação*

Conteúdo

Lista de Figuras	6
Lista de Tabelas	7
Lista de Abreviações	8
1 Introdução	9
1.1 Contextualização	9
1.2 Justificativa	9
1.3 Motivação	10
1.4 Importância do Estudo	11
2 Conceitos Técnicos	12
2.1 Embasamento Teórico	14
2.1.1 Frequências e Bandas de Operação	14
2.2 Padrões IEEE 802.11	19
2.2.1 <i>Wi-Fi</i> 4 (802.11)	20
2.2.2 <i>Wi-Fi</i> 5 (802.11ac)	20
2.2.3 <i>Wi-Fi</i> 6 (802.11ax)	21
3 Metodologia	22
3.1 Ambiente de Testes	22
3.2 Equipamentos Utilizados	26
3.3 Procedimentos de Teste Complementares	26
3.4 Limitações da Metodologia	29
4 Resultados	30
4.1 Análise dos Estudos	30
4.1.1 Tabelas de Resultados	31
4.1.2 Análises Complementares	34
4.1.3 Análise dos Resultados	36
5 Conclusão	37
Bibliografia	38

Lista de Figuras

2.1	Diferenças entre <i>Wi-Fi</i> 2,4 GHz e 5 GHz.	18
3.1	Cobertura de sinal em ambiente de 1 andar.	23
3.2	Cobertura de sinal em ambiente de 2 andares.	23
3.3	Cobertura de sinal no ambiente controlado 1.	24
3.4	Cobertura de sinal no ambiente controlado 2.	25
3.5	Comparação entre as tecnologias <i>Wi-Fi</i> 4, 5 e 6	28
3.6	Demonstração da velocidade das tecnologias <i>Wi-Fi</i> 4, 5 e 6	29
4.1	Desempenho máximo de <i>download</i> e <i>upload</i> por tecnologia, cidade	31
4.2	Mínimo registrado de <i>download</i> e <i>upload</i> pelas cidades listadas	32
4.3	Media de <i>download</i> e <i>upload</i> por cidade	32
4.4	Media de <i>download</i> e <i>upload</i> por cidade e tecnologia	33
4.5	Distância máxima relatada pela coleta de dados	34
4.6	Distância média relatada pela coleta de dados	35

Lista de Tabelas

2.1	Canais e frequências na faixa de 2,4 GHz utilizados no <i>Wi-Fi</i>	15
2.2	Resumo das subdivisões da faixa de 5 GHz (U-NII)	17

Lista de Abreviações

BSS	<i>Basic Service Set</i>
DCC	Departamento de Ciência da Computação
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
GHz	<i>GigaHertz</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISPs	<i>Internet Service Providers</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MHz	<i>MegaHertz</i>
MIMO	<i>Multiple Input, Multiple Output</i>
MU-MIMO	<i>Multi-User Multiple Input, Multiple Output</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RUs	<i>Resource Units</i>
SR	<i>Spatial Reuse</i>
TI	Tecnologia da Informação
TWT	<i>Target Wake Time</i>
U-NII	<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
<i>Wi-Fi</i>	<i>Wireless Fidelity</i>
WPA3	<i>Wi-Fi Protected Access 3</i>

1 Introdução

1.1 Contextualização

Na conectividade sem fio se tornou um elemento essencial no cotidiano da sociedade contemporânea, impactando áreas como educação, trabalho, lazer e comunicação. Entre as tecnologias de redes sem fio, o *Wi-Fi*, baseado no conjunto de padrões IEEE 802.11, destaca-se como a principal solução de acesso à internet em ambientes domésticos, corporativos e públicos (SILVA; ALMEIDA, 2021).

Ao longo dos anos, os padrões *Wi-Fi* evoluíram significativamente, buscando atender à crescente demanda por maior largura de banda, menor latência, maior eficiência espectral e capacidade de conexão simultânea de múltiplos dispositivos. Essa evolução resultou em diferentes gerações de tecnologias, como os padrões 802.11b/g/n operando na faixa de 2,4 GHz, o 802.11ac na faixa de 5 GHz, e mais recentemente o 802.11ax (2,4 e 5 GHz), que opera em ambas as faixas e oferece melhorias notáveis em ambientes densamente povoados.

Apesar das especificações técnicas amplamente documentadas, a performance real das redes *Wi-Fi* pode variar significativamente dependendo de fatores ambientais como interferência, obstáculos físicos, distância do ponto de acesso, quantidade de dispositivos conectados e ruído de canal. Isso levanta a necessidade de uma análise empírica que compare o desempenho desses padrões em condições reais de uso.

1.2 Justificativa

A velocidade de conexão constitui um fator determinante para a qualidade da experiência do usuário, sobretudo em aplicações que demandam alto desempenho, como transmissões de vídeo em alta definição, realização de videoconferências e transferência de grandes volumes de dados. A análise criteriosa de como diferentes padrões de redes *Wi-Fi* se destacam ou apresentam restrições nesse contexto é fundamental para a seleção e utilização

adequadas dessas tecnologias.

Nesse sentido, este estudo tem como objetivos:

- Realizar uma análise comparativa do desempenho das redes *Wi-Fi*, considerando métricas essenciais como velocidade e cobertura;
- Examinar as implicações do desempenho dessas redes em cenários de uso comuns;
- Identificar limitações e desafios inerentes a cada padrão tecnológico;
- Propor recomendações fundamentadas para a otimização do uso dessas redes em diferentes contextos de aplicação.

1.3 Motivação

A constante evolução das tecnologias de comunicação sem fio tem ampliado de forma significativa as possibilidades de acesso à informação e aos serviços digitais, tornando as redes *Wi-Fi* indispensáveis no cotidiano. Entre os fatores que determinam a qualidade dessa experiência, a velocidade de conexão assume papel central, especialmente em atividades que demandam elevado desempenho, como transmissões de vídeo em alta definição, videoconferências e transferência de grandes volumes de dados.

Compreender, de maneira aprofundada, como diferentes padrões *Wi-Fi* se comportam diante dessas demandas é essencial para identificar não apenas suas potencialidades, mas também as limitações e desafios que podem comprometer a eficiência da rede. Essa análise se torna ainda mais relevante em um cenário no qual o número de dispositivos conectados cresce continuamente e as aplicações digitais se mostram cada vez mais exigentes em termos de largura de banda, latência e estabilidade de conexão.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivos:

- Comparar o desempenho de redes *Wi-Fi* a partir de métricas essenciais, como velocidade e cobertura;
- Analisar os impactos do desempenho dessas redes em cenários de uso comuns;
- Identificar limitações e desafios característicos de cada padrão tecnológico;

- Apresentar recomendações práticas para otimizar o uso das redes em diferentes contextos de aplicação.

Ao alcançar tais objetivos, busca-se fornecer subsídios técnicos e práticos que contribuam para decisões mais assertivas no planejamento, implementação e utilização de redes sem fio, beneficiando usuários domésticos, corporativos e institucionais.

1.4 Importância do Estudo

Esta pesquisa é crucial em um mundo em que as redes de comunicação desempenham um papel central. Compreender as diferenças de desempenho entre *Wi-Fi* 802.11b/g/n, 802.11ac e 802.11ax é essencial para:

- Melhorar a experiência do usuário, seja em casa, no trabalho ou em trânsito.
- Orientar a tomada de decisões na implantação de redes em ambientes empresariais e públicos.
- Fornecer *insights* para o desenvolvimento de políticas de telecomunicações e regulamentações.
- Identificar oportunidades para inovação e desenvolvimento tecnológico.

Como *Wi-Fi* 802.11b/g/n, 802.11ac e 802.11ax se comparam em termos de velocidade de conexão?, qual equipamento é melhor para atender as necessidades diárias de cada usuário?, A melhor opção sempre será a mais moderna?, todas essas perguntas são as que temos o interesse em responder.

Portanto, ao analisar comparativamente as tecnologias *Wi-Fi* 802.11b/g/n, 802.11ac e 802.11ax, este estudo busca oferecer respostas fundamentadas que auxiliem na escolha da solução mais adequada a cada contexto, contribuindo para o aprimoramento da experiência do usuário e para o avanço das aplicações em redes sem fio.

2 Conceitos Técnicos

A Tecnologia *Wi-Fi*, baseada na família de padrões IEEE 802.11, evoluiu significativamente desde sua criação, acompanhando a crescente demanda por redes mais rápidas, estáveis e capazes de suportar múltiplos dispositivos simultaneamente. Essa evolução se dá não apenas pelo aumento das velocidades máximas, mas principalmente pela incorporação de avanços técnicos que melhoram a eficiência do espectro, reduzem interferências e otimizam o consumo energético. Nesta seção, são apresentados e contextualizados os principais conceitos técnicos que sustentam essa trajetória de desenvolvimento.

A base do *Wi-Fi* está na utilização de faixas de frequência conhecidas como bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), que são porções do espectro reservadas para aplicações sem necessidade de licenciamento. Em 1985, o FCC (*Federal Communications Commission*) regulamentou o uso não licenciado dessas bandas, permitindo o desenvolvimento livre de tecnologias sem fio, como o *Wi-Fi*, dentro de certos limites de potência e modulação (GAST, 2013).

Os primeiros padrões, como o 802.11b, utilizaram técnicas de modulação como o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e o FHSS (*Frequency-Hopping Spread Spectrum*), que aumentavam a robustez do sinal frente a interferências. O acesso ao meio era controlado pelo protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), que verifica se o canal está livre antes de transmitir dados, evitando colisões (GAST, 2013).

Com a introdução do 802.11g e principalmente do *Wi-Fi* 4, surgiram inovações significativas, como a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que permite a transmissão paralela de dados por meio de sub portadoras, aumentando a taxa de transferência. Foi também com o 802.11n que se introduziu o conceito de MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*), técnica que utiliza múltiplas antenas para explorar caminhos diferentes de propagação, ampliando a capacidade do link sem fio (IEEE, 2021).

A evolução seguiu com o padrão 802.11ac (*Wi-Fi* 5), operando na banda de 5 GHz, menos congestionada do que a de 2,4 GHz, e introduziu o uso de canais mais largos

(até 160 MHz) e modulações de ordem superior, como a 256-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). O 802.11ac também trouxe o MU-MIMO (*Multi-User MIMO*) no sentido de *downlink*, permitindo que o ponto de acesso enviasse dados simultaneamente para múltiplos dispositivos, otimizando a eficiência da rede. Para evitar interferências com sistemas de radar, foi incorporada a função DFS (*Dynamic Frequency Selection*), que permite ao roteador escolher dinamicamente frequências livres e seguras.

Com o surgimento do 802.11ax (*Wi-Fi 6*), houve uma verdadeira mudança de paradigma. Esse padrão foi projetado para ambientes densos, com grande quantidade de dispositivos conectados, como casas inteligentes, escritórios e locais públicos. Uma das inovações centrais foi o uso do OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), que, ao contrário do OFDM, permite a transmissão para múltiplos dispositivos simultaneamente por meio de unidades de recurso (RUs). O MU-MIMO passou a funcionar também no *uplink*, ou seja, os dispositivos podem enviar dados ao ponto de acesso ao mesmo tempo (UL MU-MIMO) (CISCO SYSTEMS, 2020; INTEL CORPORATION, 2021).

O *Wi-Fi 6* também introduziu a modulação 1024-QAM, que aumenta a densidade de dados transmitidos por símbolo, e o DCM (*Dual Carrier Modulation*), que melhora a confiabilidade da transmissão em ambientes com ruído. Para reduzir interferências entre redes vizinhas, foram aplicadas técnicas como BSS *Coloring* e SR (*Spatial Reuse*), que identificam transmissões de outras redes e ajustam dinamicamente os limites de detecção de potência, possibilitando a reutilização do canal de forma mais inteligente. O conceito de TWT (*Target Wake Time*) também ganhou destaque, promovendo economia de energia ao permitir que dispositivos negociem horários específicos para acordar e transmitir, ideal para dispositivos IoT.

Outros conceitos técnicos também ganham relevância nesse contexto. A MAC (*Medium Access Control*) continua sendo essencial para o controle de quem transmite na rede e quando. A CCA (*Clear Channel Assessment*) é utilizada para detectar se o canal está ocupado, embora ainda tenha limitações em diferenciar interferência de tráfego legítimo. A RSSI (*Received Signal Strength Indication*), por sua vez, mede a potência do sinal recebido e é um dos principais indicadores de qualidade da conexão.

Em redes *Wi-Fi* modernas, a segmentação de rede é usada para dividir o tráfego

em sub-redes lógicas, oferecendo maior controle e segurança. Já a QoE (*Quality of Experience*) surge como uma métrica mais subjetiva e voltada ao usuário final, complementando o QoS (*Quality of Service*) ao considerar a satisfação percebida com o serviço.

A evolução contínua do *Wi-Fi* mostra como conceitos técnicos interligados e refinados ao longo do tempo permitiram avanços notáveis em desempenho, confiabilidade e escalabilidade. Hoje, com o avanço para o *Wi-Fi* 6E e as pesquisas em *Wi-Fi* 7 (802.11be), o foco se volta para aplicações que exigem ainda mais largura de banda, menor latência e maior qualidade de experiência para o usuário — consolidando o *Wi-Fi* como uma das principais tecnologias de conectividade do século XXI.

2.1 Embasamento Teórico

As redes *Wi-Fi*, baseadas no padrão IEEE 802.11, têm evoluído continuamente desde sua introdução no final da década de 1990. Inicialmente projetadas para prover acesso sem fio básico à internet, as redes *Wi-Fi* passaram a atender demandas mais complexas, como *streaming* de vídeo em alta definição, jogos online, videoconferências e dispositivos IoT.

Cada nova versão do padrão 802.11 trouxe melhorias em termos de taxa de transferência, eficiência espectral, alcance e suporte a múltiplos dispositivos conectados simultaneamente.

O cenário digital atual é caracterizado por uma demanda insaciável por velocidade, latência mínima e confiabilidade na conectividade. A ampla adoção de dispositivos móveis, serviços de *streaming*, videoconferências e a transição para a IoT que destacam as necessidades das redes de alta qualidade. *Wi-Fi* 802.11 b/g/n (2,4 GHz), 802.11ac (5 GHz) e 802.11ax (2,4 e 5 GHz) são as tecnologias que alimentam essa demanda, e cada uma delas traz características únicas, desafios e oportunidades.

2.1.1 Frequências e Bandas de Operação

Os padrões *Wi-Fi* operam principalmente nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz. A banda de 2,4 GHz é de maior alcance e porém mais congestionado. A banda de 5 GHz tem maior capacidade de dados, mas menor alcance. O *Wi-Fi* 6 opera em ambas, combinando as

vantagens com maior eficiência.

Frequencia 2.4 Ghz

A faixa de 2,4 GHz é utilizada desde os primeiros padrões *Wi-Fi* (802.11b/g/n) e possui maior alcance e penetração em obstáculos devido ao maior comprimento de onda (IEEE, 2021). Entretanto, essa faixa é bastante congestionada por outros dispositivos como micro-ondas, pequenos radio comunicadores como babás eletrônicas, telefones sem fio e Bluetooth, o que pode causar interferências significativas.

Tabela 2.1: Canais e frequências na faixa de 2,4 GHz utilizados no *Wi-Fi*

Canal	Frequência (MHz)	Observações
1	2412	Não sobreposto
2	2417	Sobreposição
3	2422	Sobreposição
4	2427	Sobreposição
5	2432	Sobreposição
6	2437	Não sobreposto
7	2442	Sobreposição
8	2447	Sobreposição
9	2452	Sobreposição
10	2457	Sobreposição
11	2462	Não sobreposto
12	2467	Uso restrito (Europa/Brasil)
13	2472	Uso restrito (Europa/Brasil)

A tabela 2.1 apresentada descreve a relação entre os canais da faixa de 2,4 GHz utilizados em redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11 (*Wi-Fi*), especificando suas frequências centrais e observações quanto à sobreposição espectral. Segundo (KUROSE; ROSS, 2013), cada canal *Wi-Fi* possui largura de banda aproximada de 22 MHz, enquanto o espaçamento nominal entre canais é de apenas 5 MHz. Esse espaçamento reduzido resulta em sobreposição significativa entre a maioria dos canais, gerando interferência

co-canal e adjacente, que pode comprometer o desempenho da rede, especialmente em ambientes com múltiplos dispositivos conectados simultaneamente.

Como evidenciado na tabela, apenas os canais 1 (2412 MHz), 6 (2437 MHz) e 11 (2462 MHz) são considerados não sobrepostos, pois a distância em frequência entre eles é suficiente para evitar interferência mútua. Os demais canais apresentam sobreposição parcial ou total, sendo que os canais 12 e 13, embora tecnicamente disponíveis em alguns países, possuem uso restrito no Brasil e na Europa devido a regulamentações de espectro (TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

A correta compreensão da organização dos canais de 2,4 GHz é, portanto, essencial para o planejamento de redes *Wi-Fi* eficientes. A escolha inadequada de canais pode levar à redução da taxa de transferência e ao aumento da latência, em decorrência de colisões e retransmissões de pacotes. Por esse motivo, recomenda-se adotar prioritariamente canais não sobrepostos em ambientes de alta densidade de dispositivos, visando maximizar a capacidade e minimizar os impactos da interferência.

Este entendimento constitui uma base importante para as análises subsequentes sobre desempenho de redes *Wi-Fi*, abordando tanto aspectos teóricos quanto aplicados na escolha de canais e otimização da cobertura em diferentes ambientes.

Frequencia 5 Ghz

A faixa de 5 GHz utilizada pelas redes *Wi-Fi* é subdividida em blocos conhecidos como **U-NII** (*Unlicensed National Information Infrastructure*) (IEEE, 2021), definidos com base na frequência, com o uso permitido e regulamentações técnicas. Essas subdivisões criadas organizam o espectro, reduzem interferências que podem existir e promovem o uso seguro de equipamentos sem fio. Cada parte possui características distintas, como potência permitida, exigência de detecção de radar e aplicações específicas.

- **U-NII-1 (Faixa Baixa):** Frequência de 5,150 a 5,250 GHz, com canais 36, 40, 44 e 48. É utilizado principalmente em ambientes residenciais e comerciais de pequeno porte. Apresenta baixa potência de transmissão e **não requer DFS**, o que favorece conexões rápidas e estáveis para dispositivos domésticos.
- **U-NII-2A (Faixa Média):** Frequência de 5,250 a 5,350 GHz, com canais 52, 56, 60

e 64. Essa faixa é sujeita à interferência com radares meteorológicos e de aviação, motivo pelo qual **requer DFS** (*Dynamic Frequency Selection*). É utilizada em ambientes onde há necessidade de evitar conflitos com sistemas sensíveis.

- **U-NII-2C (Faixa Estendida):** Frequência de 5,470 a 5,725 GHz, abrangendo os canais de 100 a 144. Assim como a U-NII-2A, também **requer DFS**, sendo ideal para redes corporativas ou locais com alta densidade de dispositivos conectados. Oferece ampla disponibilidade de canais e melhor desempenho em ambientes controlados.
- **U-NII-3 (Faixa Alta):** Frequência de 5,725 a 5,850 GHz, com canais 149, 153, 157, 161 e 165. Essa faixa permite **maior potência de transmissão e não requer DFS**, sendo recomendada para provedores de internet (ISPs), enlaces ponto-a-ponto e aplicações em áreas externas.

Tabela 2.2: Resumo das subdivisões da faixa de 5 GHz (U-NII)

Bloco	Frequência (GHz)	Canais	DFS
U-NII-1	5,150 – 5,250	36, 40, 44, 48	Não
U-NII-2A	5,250 – 5,350	52, 56, 60, 64	Sim
U-NII-2C	5,470 – 5,725	100 a 144	Sim
U-NII-3	5,725 – 5,850	149, 153, 157, 161, 165	Não

A Tabela 2.2 apresenta um panorama das subdivisões da faixa de 5 GHz utilizadas pelas redes sem fio no padrão IEEE 802.11, conhecidas como U-NII. Cada bloco de frequências possui características próprias quanto à disponibilidade de canais e às exigências regulatórias, incluindo, em alguns casos, a obrigatoriedade do mecanismo DFS.

Segundo (KUROSE; ROSS, 2013), a utilização da faixa de 5 GHz proporciona um número significativamente maior de canais não sobrepostos em comparação à faixa de 2,4 GHz, o que contribui para a redução de interferências e para o alcance de taxas de transmissão mais elevadas. Entretanto, determinados blocos dessa faixa exigem o uso do DFS, mecanismo responsável por detectar sinais de radares e, quando necessário, alterar automaticamente o canal de operação para evitar interferências. Essa exigência

é comum nos blocos U-NII-2A e U-NII-2C, que compartilham espectro com sistemas de radar meteorológico e militar.

Conforme descrito por (TANENBAUM; WETHERALL, 2011), o bloco U-NII-1 (5,150–5,250 GHz) é geralmente destinado a aplicações internas (indoor), não requerendo DFS. Já o bloco U-NII-3 (5,725–5,850 GHz) é amplamente utilizado em enlaces externos e aplicações de alta potência, também sem a necessidade do DFS. Por outro lado, os blocos U-NII-2A e U-NII-2C, apesar de oferecerem uma quantidade expressiva de canais, demandam atenção especial no planejamento da rede, pois as restrições impostas pelo DFS podem ocasionar mudanças automáticas de canal e, conseqüentemente, interrupções momentâneas na conexão.

Assim, compreender a organização da faixa de 5 GHz e as regulamentações associadas é essencial para o planejamento eficiente de redes *Wi-Fi*, permitindo a seleção estratégica dos canais mais adequados a cada cenário e a otimização do desempenho da infraestrutura.

Conclusão comparativa



Figura 2.1: Diferenças entre *Wi-Fi* 2,4 GHz e 5 GHz.

A Figura 2.1 apresenta uma comparação visual entre as faixas de frequência de 2,4 GHz e 5 GHz, destacando suas principais diferenças em termos de alcance, velocidade e penetração em obstáculos. A escolha entre essas duas faixas depende diretamente do ambiente e das necessidades de uso.

A faixa de 2,4 GHz é mais indicada para locais amplos ou com muitas barreiras físicas, pois apresenta maior alcance e melhor penetração, embora sofra com maior interferência e limitação de velocidade. Já a faixa de 5 GHz proporciona taxas de transmissão mais elevadas e menor interferência, sendo ideal para aplicações que demandam largura de banda e estabilidade, como *streaming* de alta qualidade e jogos online.

O uso de roteadores *dual band* representa uma solução eficiente, pois permite aproveitar simultaneamente os benefícios de ambas as faixas, garantindo melhor desempenho e flexibilidade na rede. Assim, conclui-se que a seleção da frequência deve considerar o cenário físico, a quantidade de dispositivos conectados e o tipo de aplicação utilizada.

2.2 Padrões IEEE 802.11

Os principais padrões analisados neste trabalho são:

- **802.11a**: lançado em 1999, opera na frequência de 5 GHz com velocidade máxima de até 54 Mbps, sendo o primeiro padrão a utilizar a faixa de 5 GHz.
- **802.11b**: lançado em 1999, opera na frequência de 2,4 GHz com velocidade máxima de 11 Mbps.
- **802.11g**: lançado em 2003, opera na frequência de 2,4 GHz com velocidade máxima de 54 Mbps.
- **802.11n**: lançado em 2009, opera nas frequências de 2,4 GHz e 5 GHz, com velocidade máxima de até 600 Mbps.
- **802.11ac**: lançado em 2013, opera na frequência de 5 GHz, com velocidade máxima de até 1,3 Gbps.
- **802.11ax**: lançado em 2019, opera nas frequências de 2,4 GHz e 5 GHz, com velocidade máxima de até 9,6 Gbps.

Com o enfoque na pesquisa realizada vamos detalhar sobre os conceitos abordados entre *Wi-Fi* 4, *Wi-Fi* 5 e *Wi-Fi* 6.

2.2.1 *Wi-Fi* 4 (802.11)

Com a introdução do padrão IEEE 802.11n, também conhecido como *Wi-Fi* 4, o desempenho das redes sem fio passou por um salto significativo. Lançado oficialmente em 2009, o *Wi-Fi* 4 trouxe inovações fundamentais, como a tecnologia MIMO (Multiple Input, Multiple Output), que permite a transmissão e recepção simultânea de múltiplos fluxos de dados através de múltiplas antenas. Essa abordagem aumenta consideravelmente a taxa de transferência, que pode alcançar até 600 Mbps com quatro fluxos espaciais ativos.

Além disso, o *Wi-Fi* 4 introduziu a possibilidade de utilizar canais de 40 MHz de largura, o dobro da largura usada até então, melhorando o desempenho sem comprometer a compatibilidade com redes anteriores (802.11a/b/g). Do ponto de vista do controle de acesso ao meio, houve avanços na camada MAC, como a agregação de quadros, que reduziu a sobrecarga de pacotes e melhorou a eficiência da transmissão.

O padrão também manteve o uso da banda de 2,4 GHz, altamente difundida, mas passou a operar também na faixa de 5 GHz, proporcionando uma alternativa com menos interferência. A compatibilidade retroativa garantiu que dispositivos legados pudessem coexistir com os novos roteadores, assegurando uma transição tecnológica suave.

2.2.2 *Wi-Fi* 5 (802.11ac)

A quinta geração das redes *Wi-Fi*, o 802.11ac, conhecida como *Wi-Fi* 5, foi projetada com o objetivo de alcançar velocidades superiores a 1 Gbps, além de melhorar a experiência em ambientes com múltiplos dispositivos conectados. Lançado em duas fases (2013 e 2015), o *Wi-Fi* 5 opera exclusivamente na banda de 5 GHz, evitando interferências comuns na faixa de 2,4 GHz.

Entre os principais avanços técnicos está a introdução da modulação 256-QAM, que aumenta a densidade de bits por símbolo, resultando em maior eficiência espectral. Também foram ampliadas as larguras de canal (80 MHz na primeira onda e até 160 MHz na segunda), além do suporte a até 8 fluxos espaciais MIMO na camada física.

Um dos diferenciais mais relevantes foi o uso do MU-MIMO (*Multi-User* MIMO) no *downlink*, permitindo a transmissão simultânea para até quatro dispositivos clientes, otimizando a capacidade da rede em ambientes com alta densidade de usuários. A tec-

nologia *beamforming* também foi aprimorada, possibilitando o direcionamento inteligente do sinal, aumentando alcance e estabilidade.

Apesar de seu foco na banda de 5 GHz, o *Wi-Fi* 5 manteve compatibilidade com dispositivos anteriores que operam em 2,4 GHz por meio do uso simultâneo com o padrão 802.11n, garantindo versatilidade. Essa geração consolidou a era do *Wi-Fi* em velocidades *gigabit*, sendo amplamente adotada em ambientes domésticos, corporativos e comerciais.

2.2.3 *Wi-Fi* 6 (802.11ax)

O padrão 802.11ax, ou *Wi-Fi* 6, lançado oficialmente em 2019, representa uma mudança significativa de paradigma. Ao invés de apenas buscar maiores velocidades teóricas, como nas gerações anteriores, o foco principal passou a ser a eficiência espectral.

O *Wi-Fi* 6 mantém o uso de até 8 fluxos espaciais MIMO, mas avança ao introduzir a modulação 1024-QAM, que aumenta ainda mais a taxa de bits por símbolo. Além disso, incorpora símbolos OFDM mais longos, com intervalos de guarda maiores, aumentando a robustez da transmissão em cenários (CISCO SYSTEMS, 2020).

Tecnologias como BSS *Coloring* e SR (*Spatial Reuse*) foram introduzidas para reduzir a interferência entre redes próximas, ajustando dinamicamente os limites de potência de detecção. A função *Target Wake Time* (TWT) também se destaca, permitindo que dispositivos programem seus ciclos de atividade e economia de energia, ideal para dispositivos IoT. Além disso, o *Wi-Fi* 6 passou a operar simultaneamente nas bandas de 2,4 GHz e 5 GHz, retomando o uso eficiente da faixa de 2,4 GHz com maior desempenho e alcance.

Em termos de aplicações práticas, o *Wi-Fi* 6 é especialmente eficaz em situações que exigem baixa latência, alta densidade de conexões e grande largura de banda, como realidade aumentada/virtual, videoconferências, jogos on-line e ambientes com dezenas de dispositivos simultâneos. Com suporte ao padrão de segurança WPA3, essa geração também melhora a privacidade e a proteção de dados, mesmo em redes públicas.

3 Metodologia

Neste trabalho, foram analisados dois tipos distintos de ambientes: um ambiente residencial (Ambiente 1) e um ambiente controlado (Ambiente 2). A metodologia aplicada buscou simular cenários reais de uso, respeitando recomendações técnicas de instalação e considerando fatores que impactam diretamente o desempenho das redes *Wi-Fi*.

3.1 Ambiente de Testes

Ambiente 1

Residencial com divisórias e móveis sem definições de espessura das paredes ou número de cômodos. No ambiente residencial que tem 60m², seguiu-se o padrão recomendado pelos fabricantes de roteadores, que orientam a instalação do equipamento em posição central na residência. Essa centralização tem como objetivo garantir uma distribuição uniforme do sinal sem fio, maximizando o alcance e a qualidade da conexão em todos os cômodos.

Entretanto, é importante destacar que as condições físicas de cada residência podem afetar significativamente a propagação do sinal. Barreiras como paredes de concreto, espelhos, portas metálicas, vidros temperados, entre outros elementos, atuam como obstáculos que reduzem a intensidade do sinal e, conseqüentemente, o desempenho da rede, para esse ambiente conseguimos extrair o máximo de informações sobre latência, capacidade de atingimento em download e upload em *MegaBytes* pelas tecnologias citadas.

Nestes casos, a orientação de um profissional especializado se torna fundamental para avaliar a viabilidade da instalação padrão ou propor soluções alternativas mais adequadas ao ambiente em questão. Tais soluções podem envolver a redistribuição do roteador, uso de repetidores, pontos de acesso adicionais, repetidores ou redes do tipo mesh. Mesmo considerando essas possíveis variações, os testes realizados indicam que, na maioria dos casos, o padrão de instalação centralizada atende de forma satisfatória às necessidades dos usuários, promovendo conectividade estável e de boa qualidade.

Para representar graficamente o padrão de instalação em residências, foram uti-

lizados dois modelos:

- Residência térrea (um andar): o roteador é instalado no centro da residência.
- Residência de dois andares: o roteador é instalado preferencialmente no centro do segundo andar, visando melhor distribuição do sinal tanto horizontal quanto verticalmente.



Figura 3.1: Cobertura de sinal em ambiente de 1 andar.

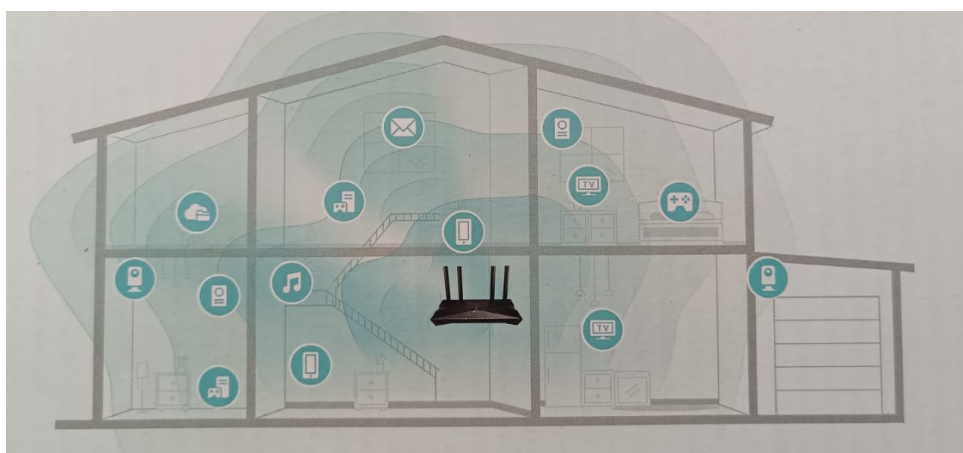


Figura 3.2: Cobertura de sinal em ambiente de 2 andares.

Esses ambientes são ilustrações de orientações sobre o processo de instalação a ser realizado em mais dos diversos locais, mesmo com as orientações base conforme as figuras, cabe ao responsável pela instalação e manutenção procurar o melhor local seguindo as recomendações dos fabricantes.

Ambiente 2

Galpão de testes de alcance dos equipamentos.

Para fins de comparação e aprofundamento da análise, os testes também foram realizados em um ambiente controlado pertencente a uma empresa do setor de tecnologia. Este ambiente consiste em um galpão de aproximadamente 30x30m, onde foram simuladas diferentes situações de uso, buscando analisar a propagação do sinal *Wi-Fi* em distâncias maiores e com diferentes obstáculos, para melhores coletas desse teste foram feitos as capturas dos sinais através de um rádiofrequência situados nos pontos A, B, C e D, alternando o posicionamento do aparelho roteador também nos pontos periféricos e central extraíndo os dados da maior e a média da distância do alcance obtido nesses testes, seguindo o processo interno de padronização que não foram disponibilizados pela empresa. dois cenários foram estabelecidos nesse ambiente:

- Cenário 1 – Instalação periférica: o roteador foi posicionado em um dos cantos do galpão e a medição do sinal foi realizada no extremo oposto. Este cenário teve como objetivo avaliar o desempenho da rede em condições de maior distância e presença de barreiras físicas (paredes de concreto).

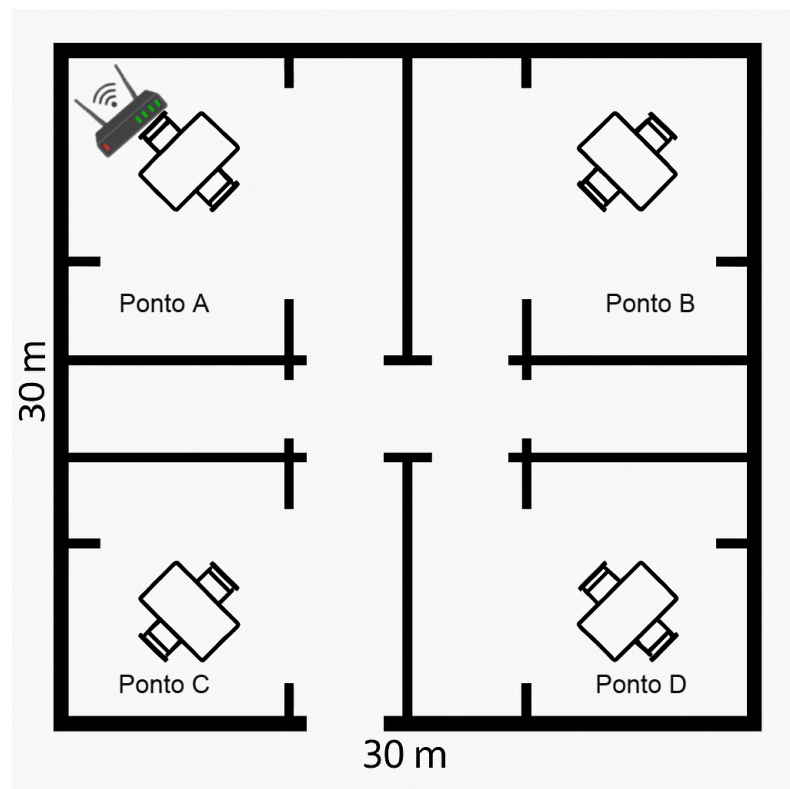


Figura 3.3: Cobertura de sinal no ambiente controlado 1.

- Cenário 2 – Instalação centralizada: o roteador foi reposicionado para o centro do

galpão. Nessa configuração, analisou-se a capacidade do equipamento de cobrir toda a extensão do espaço, simulando um ambiente com topologia semelhante à de uma residência ampla.

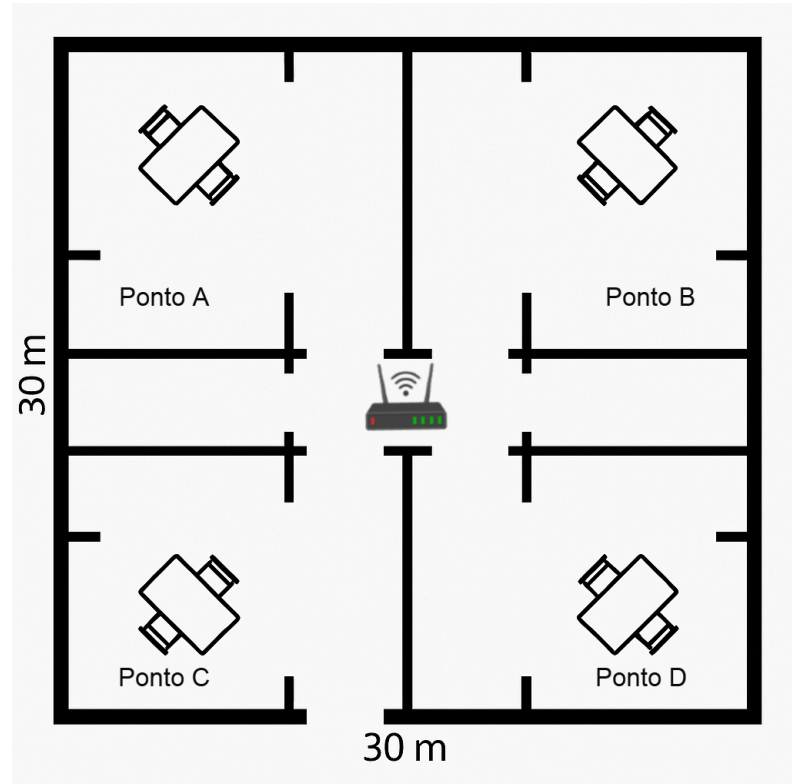


Figura 3.4: Cobertura de sinal no ambiente controlado 2.

Durante os testes no ambiente controlado o especialista responsável pelos testes, observou que as redes operando na frequência de 5 GHz (principalmente associadas ao padrão *Wi-Fi* 5) apresentaram desempenho limitado em termos de alcance, especialmente quando submetidas a barreiras físicas. Diante disso, os testes com essa frequência foram desconsiderados para esse ambiente, priorizando-se as redes que operam em 2,4 GHz, relacionadas aos padrões *Wi-Fi* 4 e *Wi-Fi* 6.

Segundo o analista, o ambiente de testes não permite que as redes de 5 GHz, que já possuem menor capacidade de penetração e cobertura, embora ofereçam maior velocidade, extraiam resultados significativos para seu uso nesse cenário. Para ambientes amplos ou com grande número de obstáculos, recomendam-se tecnologias complementares como repetidores, access points ou sistemas mesh, a fim de assegurar cobertura adequada.

Essa decisão metodológica está de acordo com os princípios técnicos da pesquisa, considerando que o objetivo principal é comparar o desempenho das diferentes gerações

Wi-Fi (802.11n, 802.11ac e 802.11ax) em contextos reais de uso através das redes FTTH e, com isso, propor a melhor alternativa de tecnologia para cada tipo de cenário.

3.2 Equipamentos Utilizados

Roteadores compatíveis com os padrões ZTE (ZTE6600P, ZTE6600), Zyxel (PX3321-t1), TP-Link (XX230V e XX530V), Intelbras (AX1800V), Huawei(EG8145X6-10) para *Wi-Fi* 6, ZTE (670L), Fiberhome (HG6143D), Huawei (HG8145V5,) para *Wi-Fi* 5 e (roteadores particulares dos clientes no sistema) para *Wi-Fi* 4.

3.3 Procedimentos de Teste Complementares

A configuração foi realizada de forma isolada por um especialista no local. O teste base foi efetuado em um único dispositivo e conduzido automaticamente pelo sistema controlador de acesso. Os dados técnicos complementares foram preenchidos manualmente por profissionais, utilizando as ferramentas previamente listadas, com o auxílio de notebook ou smartphone compatível com *Wi-Fi*, além da execução dos testes padrão, tais informações são posteriormente cruzadas pela empresa listada a fim de comparar os testes internos com os testes complementares.

Ferramentas Empregadas

Para a realização dos testes, foram utilizados dois aplicativos principais:

- *WiFiman* (Ubiquiti): utilizado para o mapeamento técnico das redes *Wi-Fi* disponíveis. Fornece informações como intensidade de sinal (em dBm), canal de operação, largura do canal, tipo de modulação, padrão de rede (IEEE 802.11 b/g/n/ac/ax) e taxa teórica máxima de transmissão (PHY Rate), além de dados sobre interferência e ocupação de canais.
- *Speedtest by Ookla*: responsável pela medição das velocidades reais de download e upload, bem como dos valores de latência e *jitter*. Essa ferramenta simula o desempenho percebido pelo usuário em diferentes cenários de uso.

Avaliação técnica dos ambientes

Foram realizadas medições em locais residenciais, comerciais e urbanos situados em diversas cidades do estado de Minas Gerais. Em cada ponto de medição, coletaram-se simultaneamente os seguintes dados:

- Intensidade do sinal (dBm);
- Velocidade *download* e *upload* em *Megabytes*;
- Largura de canal configurada (20 MHz, 40 MHz, 80 MHz ou 160 MHz);
- Canal e faixa de frequência utilizados (2,4 GHz ou 5 GHz);
- Número de redes que compartilham o mesmo canal;
- Tipo de padrão *Wi-Fi* detectado (n, ac, ax);
- Taxa máxima teórica de transmissão (PHY rate).
- Alcance dos dispositivos;

Esses dados permitem avaliar as condições técnicas do vários ambiente e seus impactos sobre o desempenho da rede, porém foi nos disponibilizados para esse estudos apenas alguns itens dessa coleta que foram:

- Velocidade download e upload em Megabytes;
- Tipo de padrão *Wi-Fi* detectado (n, ac, ax);
- Alcance dos dispositivos;

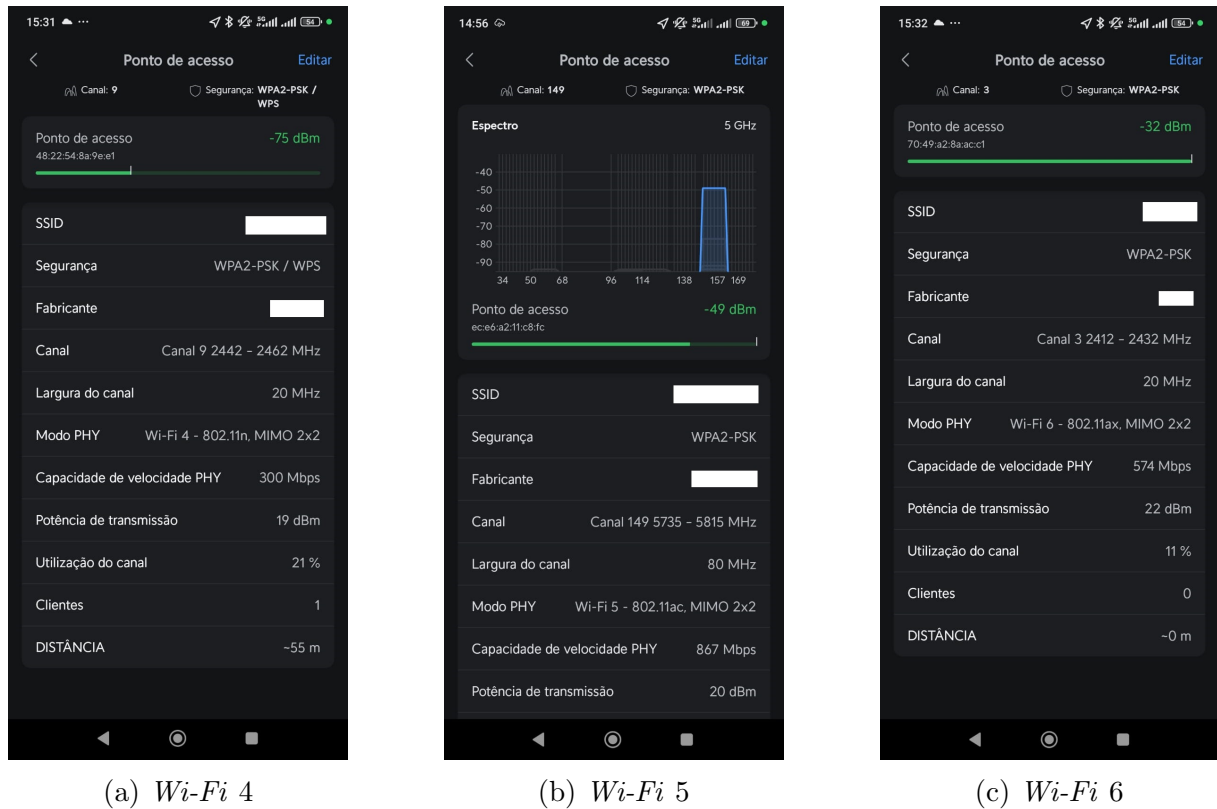


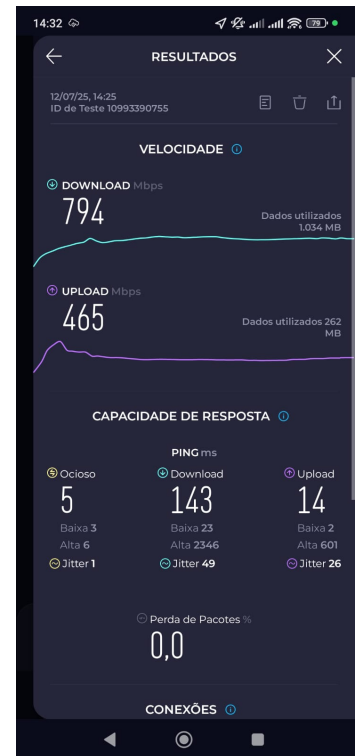
Figura 3.5: Comparação entre as tecnologias *Wi-Fi* 4, 5 e 6

Testes de Velocidade e Desempenho

Logo após cada levantamento técnico, foi executado um teste de desempenho utilizando o *Speedtest*, com o registro dos seguintes indicadores:

- Velocidade de *download* (Mbps);
- Velocidade de *upload* (Mbps);
- Latência média e *jitter*.

As informações obtidas foram posteriormente analisadas em conjunto com os dados do ambiente, com o intuito de identificar possíveis relações entre a qualidade do sinal e o desempenho real da conexão.

(a) Velocidade na rede *Wi-Fi* 4(b) Velocidade na rede *Wi-Fi* 5(c) Velocidade na rede *Wi-Fi* 6Figura 3.6: Demonstração da velocidade das tecnologias *Wi-Fi* 4, 5 e 6

3.4 Limitações da Metodologia

Os ambientes analisados apresentam variabilidade, pois não há padrão uniforme entre residências. Fatores como interferência, tipo de construção, limitações dos dispositivos e o não atingimento da velocidade máxima teórica podem afetar os resultados. Assim, qualquer avaliação futura deve considerar cuidadosamente as capacidades físicas e os dados técnicos dos equipamentos, garantindo que a análise sirva como uma base sólida para conhecimento estratégico.

4 Resultados

4.1 Análise dos Estudos

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos testes realizados com os padrões *Wi-Fi* 802.11b/g/n, 802.11ac e 802.11ax. Tais especificações serão exibidas mostrando a capacidade de nominal de cada padrão com base no recolhimento dos dados obtivos pelo sistema empírico de cada local abordado.

O sistema empírico consiste na coleta de informações realizada no último ponto da instalação ou na conclusão do serviço. Nesse processo, são registrados dados de manutenção, velocidade, latência e medições de jitter, permitindo comparar o desempenho entre o ponto de acesso em fibra e o equipamento localizado no ambiente. Posteriormente, esses dados são confrontados com os resultados obtidos pela análise técnica realizada no local, possibilitando uma avaliação mais completa do desempenho da rede.

Nas cidades de Alfredo Vasconcelos, Antônio Carlos (representada como ANTONIO CARLOS nos dados seguintes), Barbacena, Barroso e Belo Horizonte, a infraestrutura de rede utilizada é baseada no padrão GPON, permitindo velocidades de *download* de até 2,5 Gbps e *upload* de até 1,25 Gbps.

No recorte específico da cidade de Antônio Carlos — incluído neste estudo — observa-se a adoção da tecnologia XG-PON, que possibilita velocidades de até 10 Gbps para *download* e 2,5 Gbps para *upload*. Embora ainda em fase de testes para futuras implantações em outras localidades, essa rede foi considerada no presente estudo por representar um avanço significativo no desempenho das conexões ópticas. Tais conexões utilizam fibra óptica para transmitir dados na forma de luz, oferecendo altas velocidades, maior alcance e menor interferência em comparação às conexões convencionais de cobre ou *Wi-Fi*. Tecnologias como GPON e XG-PON empregam essa infraestrutura para fornecer internet de alta capacidade e confiabilidade a residências e empresas.

4.1.1 Tabelas de Resultados

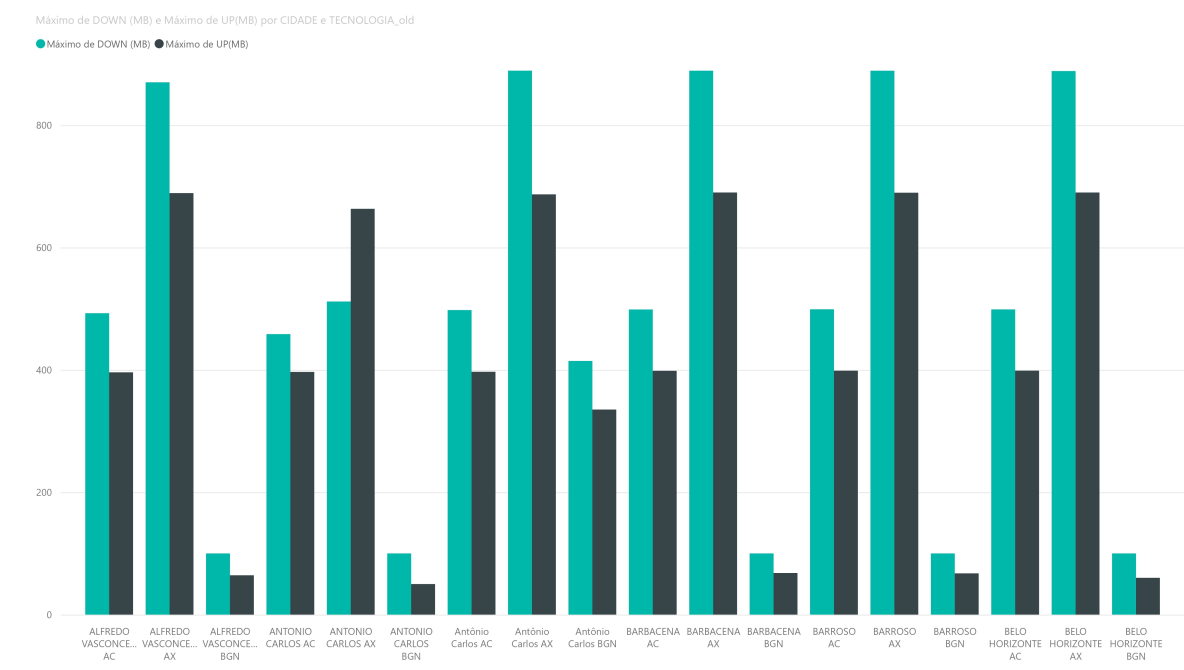


Figura 4.1: Desempenho máximo de *download* e *upload* por tecnologia, cidade

A Figura 4.1 apresenta o desempenho máximo de *download* e *upload* no eixo y e no eixo x o registro das diferentes tecnologias *Wi-Fi* analisadas em diversas cidades. Notamos que tecnologias mais recentes, como *Wi-Fi* 6, alcançam taxas significativamente superiores em comparação com padrões anteriores. Contudo, ao considerar a infraestrutura de rede física, nota-se que a tecnologia XG-PON, implementada na cidade de Antônio Carlos, apresenta desempenho ainda superior, nos máximos alcançados pelos dispositivos de *Wi-Fi*.

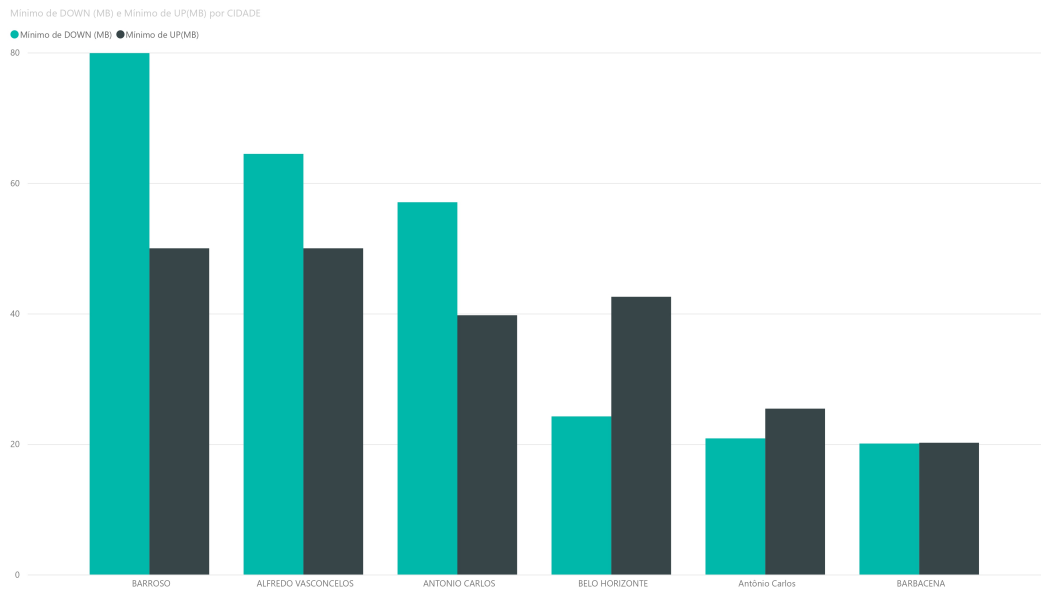


Figura 4.2: Mínimo registrado de *download* e *upload* pelas cidades listadas

A Figura 4.2 apresenta o desempenho mínimo de *download* e *upload* via *Wi-Fi* no eixo y e no eixo x o registo das cidades incluídas neste estudo, evidenciando variações significativas entre os municípios. Observa-se que Barroso e Alfredo Vasconcelos apresentam os melhores valores, seguidos por Antonio Carlos (representada na figura como **ANTONIO CARLOS**), Belo Horizonte e, finalmente, Barbacena, que apresenta o desempenho mínimo mais baixo.

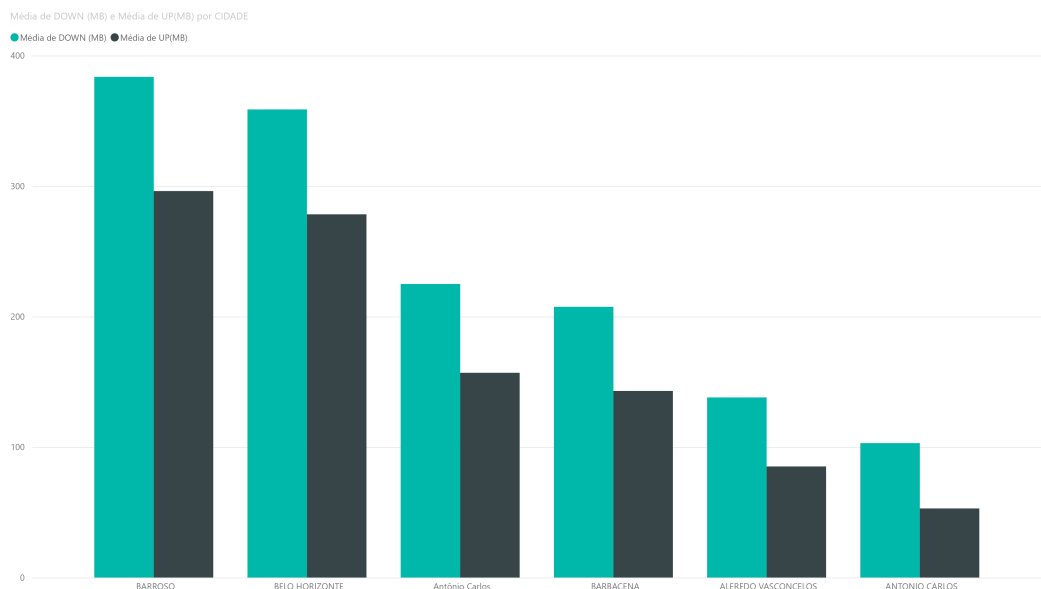


Figura 4.3: Média de *download* e *upload* por cidade

A Figura 4.3 apresenta a média de velocidades de *download* e *upload* no eixo y

e no eixo x o registo das cidades analisadas via *Wi-Fi*. Observa-se uma clara diferença entre os municípios, sendo Barroso e Belo Horizonte os que apresentam os maiores valores médios, seguidos por Barbacena e Antônio Carlos. As cidades de Alfredo Vasconcelos e Antonio Carlos (representada na figura como **ANTONIO CARLOS**) apresentam os menores valores médios, indicando menor desempenho das redes locais.

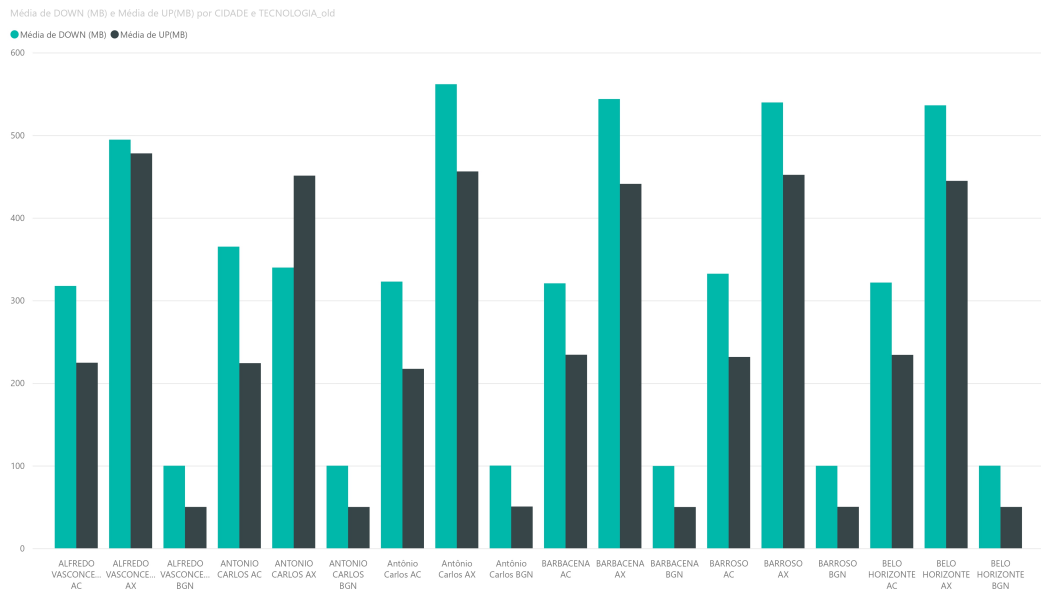


Figura 4.4: Média de *download* e *upload* por cidade e tecnologia

A Figura 4.4 apresenta as médias de *download* e *upload* no eixo y e no eixo x o registo obtido em cada cidade e tecnologia avaliada, evidenciando o impacto direto do padrão *Wi-Fi* no desempenho. Nota-se que, de forma consistente, o *Wi-Fi* 6 (802.11ax) apresenta as maiores taxas médias tanto para *download* quanto para *upload* em todos os municípios analisados, seguido pelo *Wi-Fi* 5 (802.11ac) e, por último, o *Wi-Fi* 4 (802.11b/g/n). Entre as localidades, Barbacena e Barroso destacam-se com os maiores valores registrados no padrão 802.11ax, enquanto Alfredo Vasconcelos e Antônio Carlos demonstram resultados mais equilibrados entre as tecnologias. Já Belo Horizonte apresenta desempenho elevado no *Wi-Fi* 6, mas com queda mais acentuada no *Wi-Fi* 4, evidenciando a diferença de eficiência entre gerações. Essa variação entre cidades e padrões reforça a importância de considerar, além da tecnologia, a infraestrutura de rede disponível em cada contexto urbano.

A análise reforça que a atualização da infraestrutura de redes de cobre ou fibra

são essenciais para a rede em geral, como também na entrega de melhores conexões para o uso de *Wi-Fi*, afim de garantir qualidade de serviço especialmente em cidades com maior demanda digital.

4.1.2 Análises Complementares

Esta seção apresenta estudos complementares realizados com o propósito de validar e aprofundar os dados obtidos nos testes de desempenho das redes *Wi-Fi*. A análise considerou tanto a infraestrutura disponível quanto as condições reais de utilização dos ambientes citados, porém os dados mais precisos disponibilizados pela empresa nesse teste foram as do ambiente controlado que consiste em um galpão de aproximadamente 30x30m, onde foram simuladas diferentes situações de uso, buscando analisar a propagação do sinal *Wi-Fi* em distâncias maiores e com diferentes obstáculos, buscando estabelecer relações entre parâmetros técnicos e a experiência prática dos usuários.

Para isso, foram utilizadas ferramentas específicas capazes de realizar medições detalhadas sobre o funcionamento e as características do ambiente de rede sem fio.

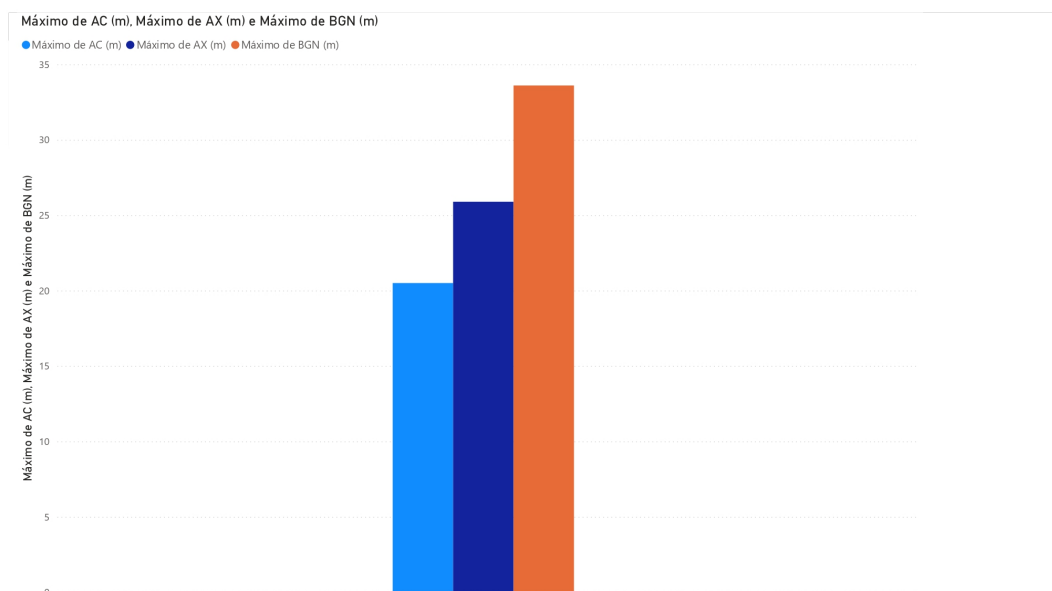


Figura 4.5: Distância máxima relatada pela coleta de dados

A Figura 4.5 apresenta os valores máximos de alcance obtidos para cada tecnologia *Wi-Fi*, no eixo y a distância em metros e no eixo x qual tipo de tecnologia avaliada. Observa-se que a tecnologia BGN apresenta o maior alcance máximo, superando 33 me-

tros, seguida pela AX, com cerca de 26 metros, e pela AC, com aproximadamente 20 metros. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de o padrão BGN operar predominantemente na faixa de 2,4 GHz, que possui melhor penetração em obstáculos e maior cobertura, em contrapartida às frequências mais altas utilizadas pelas tecnologias AC e AX, que, embora proporcionem maior largura de banda, têm alcance reduzido.

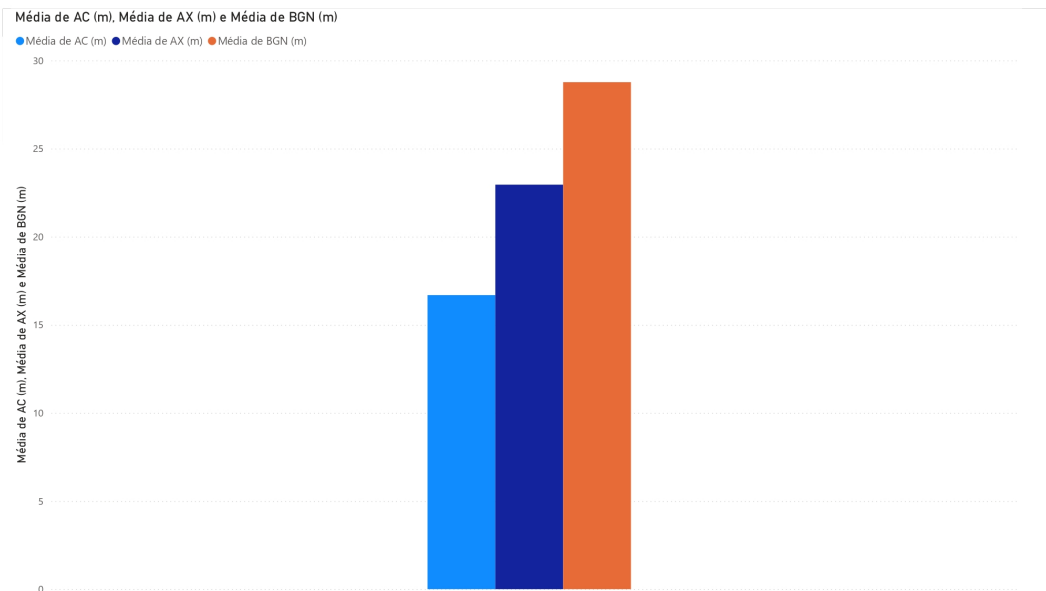


Figura 4.6: Distância média relatada pela coleta de dados

A Figura 4.6 mostra a comparação das médias de alcance entre as mesmas tecnologias no eixo y e a distância em metros e no eixo x qual tipo de tecnologia avaliada. O comportamento observado é semelhante ao dos valores máximos: a tecnologia BGN mantém a maior média de alcance, próxima a 29 metros, enquanto AX e AC apresentam médias menores, com 23 e 17 metros, respectivamente. Esse padrão reforça a relação inversa entre alcance e capacidade de transmissão de dados, evidenciando que tecnologias mais modernas e rápidas tendem a sacrificar distância para maximizar qualidade.

As informações obtidas por meio dos aplicativos *WiFiman* e *Speedtest* foram integradas ao sistema, com o objetivo de confrontar os resultados reais com os valores estimados (mínimos, médios e máximos) por cidade. A comparação teve como finalidade verificar a consistência dos dados obtidos, considerando aspectos técnicos como:

- Intensidade do sinal (dBm);
- Velocidade *download* e *upload* em *Megabytes*;

- Largura de canal configurada (20 MHz, 40 MHz, 80 MHz ou 160 MHz);
- Canal e faixa de frequência utilizados (2,4 GHz ou 5 GHz);
- Número de redes que compartilham o mesmo canal;
- Tipo de padrão *Wi-Fi* detectado (n, ac, ax);
- Taxa máxima teórica de transmissão (PHY rate).
- Alcance dos dispositivos;

Essa abordagem comparativa possibilitou avaliar com maior precisão a confiabilidade e o desempenho das redes sem fio nos diferentes cenários regionais analisados.

4.1.3 Análise dos Resultados

Os testes demonstraram que o padrão de equipamentos em *Wi-Fi* 6 apresentou o melhor desempenho geral, com altas velocidades mesmo em distâncias maiores e baixa latência. Os roteadores *Wi-Fi* 5 manteve desempenho elevado em curtas e médias distâncias, porém sofreu degradação mais acentuada em longas distâncias devido à menor penetração da frequência de 5 GHz. Já o 802.11b/g/n apresentou desempenho estável, mas com velocidades significativamente inferiores, especialmente em distâncias maiores.

Além disso, notou-se que o *Wi-Fi* 6 ofereceu maior estabilidade de conexão aos dados complementares fornecidos por utilizar ambas as frequências para fortalecer a conexão gerando uma menor variação entre medições, indicando melhor gerenciamento de canal e controle de múltiplos dispositivos. Em ambientes com interferência elevada, as tecnologias mais modernas também mostraram melhor resiliência.

5 Conclusão

A análise comparativa entre os padrões *Wi-Fi* 802.11b/g/n, 802.11ac e 802.11ax permitiu observar, na prática, os ganhos evolutivos proporcionados pelas novas tecnologias. O padrão *Wi-Fi* 6 demonstrou desempenho superior em praticamente todos os aspectos avaliados, especialmente em ambientes com múltiplos dispositivos conectados e presença de interferência.

A tecnologia 802.11ac, embora limitada à frequência de 5 GHz, ainda representa uma solução viável e eficiente para aplicações que exigem alta largura de banda em ambientes de curta ou média distância.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação dos testes em ambientes externos, a inclusão de dispositivos de expansão de rede como redes mesh, repetidores, antenas de maior potência em decibéis (dB), além disso verificar a disponibilidade e eficiência de novas redes como o “LiFi (*Light Fidelity*) é uma tecnologia de comunicação sem fio que utiliza luz visível, infravermelha ou ultravioleta para transmitir dados, ao invés de ondas de rádio, como o *Wi-Fi*.” (HAAS et al., 2016) . A contribuição deste estudo está em oferecer subsídios práticos para a escolha mais adequada de tecnologia *Wi-Fi* conforme o contexto de uso.

Por fim, em última análise, a evolução constante dessas tecnologias e o advento das novas aplicações continuarão a moldar o cenário da conectividade sem fio. O entendimento abrangente das características e trade-offs entre redes *Wi-Fi* permitirá que consumidores, empresas de tecnologias faça as escolhas informadas, adaptando-se às demandas dinâmicas de um mundo cada vez mais conectado e com uma tecnologia mais avançada e sustentável, tornando assim a escolha de qual usar sendo única de cada usuário.

Bibliografia

CISCO SYSTEMS. *Wi-Fi 6 (802.11ax): Technical Overview*. 2020. White Paper.

GAST, M. *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*. 2. ed. [S.l.]: O'Reilly Media, 2013.

HAAS, H. et al. What is lifi? *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 34, n. 6, p. 1533–1544, 2016.

IEEE. *IEEE Std 802.11 – Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. 2021. Norma técnica.

INTEL CORPORATION. *Understanding Wi-Fi 6: How the New Standard Improves Wireless Connectivity*. 2021.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Redes de computadores e a internet: Uma abordagem top-down*. [S.l.]: s.n., 2013.

Ministério da Educação. *Diretrizes curriculares nacionais para o curso de graduação em computação*. 2025. (<https://www.gov.br/mec/>). Acesso em: 25 mai. 2025.

PETERSON, L. L.; DAVIE, B. S. Computer networks: A systems approach. In: . [S.l.: s.n.], 2011.

PINTRICH, P. A motivational science perspective on the role of student motivation in learning and teaching contexts. *Journal of Educational Psychology*, v. 95, p. 667–686, 2003.

RUBINSTEIN, D. L. de Lima e M. G. Coexistência wi-fi x lte: uma análise comparativa de desempenho entre o laa e olte-u. In: . Fortaleza: [s.n.], 2021.

SILVA, G.; SEABRA, R. D. Rea-aed: Recurso educacional aberto para o ensino de algoritmos e estruturas de dados. In: SBC. *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*. Porto Alegre, RS, Brasil, 2018. p. 1–7.

SILVA, J. P.; ALMEIDA, M. V. Evolução dos padrões ieee 802.11 e seu impacto no desempenho das redes wi-fi. *Revista de Engenharia e Tecnologia Aplicada*, v. 9, n. 2, p. 34–45, 2021.

STALLINGS, W. Redes e sistemas de comunicação de dados. In: . [S.l.: s.n.], 2017.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. *Redes de computadores*. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. Redes de computadores. In: . [S.l.: s.n.], 2012.