



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Vander Aparecido Souza Silva

**O ESTUDO DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS REDES SEM FIO WiFi ATÉ A
GERAÇÃO 7**

CUIABÁ – MT

maio, 2023

Vander Aparecido Souza Silva

**O ESTUDO DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS REDES SEM FIO WiFi ATÉ A
GERAÇÃO 7**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Haroldo Benedito Tadeu Zattar

CUIABÁ – MT

Maio, 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S586e Silva, Vander Aparecido Souza.
O estudo da evolução tecnológica das redes sem fio wifi até a geração 7 [recurso eletrônico] / Vander Aparecido Souza Silva. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 22 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Haroldo Benedito Tadeu Zattar.
TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2023.
Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.
Inclui bibliografia.

1. Redes sem fio, WiFi 7, WiFi. I. Zattar, Haroldo Benedito Tadeu, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.041836/2023-66

Interessado: Coordenação de Ensino de Graduação em Engenharia Elétrica, Coordenador de Ensino de Graduação em Engenharia Elétrica, SAULO ROBERTO SODRE DOS REIS, JORGE LUIZ BRITO DE FARIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DO ARTIGO: O ESTUDO DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS REDES SEM FIO WiFi ATÉ A GERAÇÃO 7

ALUNO: VANDER APARECIDO SOUZA SILVA RGA 201721302035

O Trabalho de Conclusão de Curso cujo artigo **O ESTUDO DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS REDES SEM FIO WiFi ATÉ A GERAÇÃO 7** apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de junho de 2023.

Nota: 8,5 (OITO E CINCO)

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. HAROLDO BENEDITO TADEU ZATTAR - Orientador

Prof. Dr. SAULO ROBERTO SODRÉ DOS REIS - Examinador

Prof. Dr. JORGE LUIZ BRITO DE FARIA - Examinador



Documento assinado eletronicamente por **HAROLDO BENEDITO TADEU ZATTAR**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 05/06/2023, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **SAULO ROBERTO SODRE DOS REIS**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 05/06/2023, às 12:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JORGE LUIZ BRITO DE FARIA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 05/06/2023, às 12:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5853532** e o código CRC **157A773B**.

SILVA, V.A.S. O estudo da evolução tecnológica das redes sem fio WiFi até a geração 7.2023. 24f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2023.

RESUMO

Com a evolução da Internet o acesso à informação é fundamental e deve estar disponível em todos os locais inclusive nos bairros periféricos e regiões remotas. Por isso, é imprescindível que as empresas, escolas, universidades, indústrias e principalmente o governo invistam em tecnologia visando a melhoria de comunicação e acesso à informação, tanto no âmbito urbano, quanto rural, fornecendo serviços de internet. Para fornecer serviço de internet, em áreas rurais e remotas diversas tecnologias estão à disposição como: satélite, por exemplo, com a Starlink, microondas, fibra ótica, cabo coaxial, PLC (*Power Line Communication*), WiMax e WiFi. Um dos principais diferenciais notórios de uma empresa para outra é o quanto esta investe e sabe utilizar as novas tecnologias e inovações em software e hardware. Sendo assim as universidades devem estar na frente quanto a inclusão de novas tecnologias para que os alunos e futuros profissionais possam aprender e apresentar as tecnologias para a sociedade. Dito isso, para a perfeita operação de uma empresa, é necessário a utilização de uma rede para fazer a interconexão de estações de trabalho, periféricos, terminais, celulares, I pads e outros dispositivos e este artigo apresenta a evolução das redes sem fio e um estudo da arte da tecnologia WiFi, até o mais recente WiFi 7, que ainda não existe comercialmente mas com projeção, segundo a empresa Qualcomm maior fornecedora mundial de processadores para WiFi, de estar disponível no mercado para o segundo semestre de 2024. Dado esse cenário verifica-se a importância do fortalecimento dos conhecimentos acerca da evolução das tecnologias desta área e entender as melhorias de um modelo ao outro.

Palavras-chave: Redes sem fio, WiFi 7, WiFi.

ABSTRACT

With the evolution of the Internet, access to information is fundamental and must be available everywhere, including remote neighborhoods and regions. Therefore, it is essential that companies, schools, universities, industries, and especially the government invest in technology to improve communication and access to information, both in urban and rural areas, by providing internet services. To provide internet service in rural and remote areas several technologies are at hand such as: satellite, for example, with Starlink, microwave, optical fiber, coaxial cable, PLC (*Power Line Communication*), WiMax, and WiFi. One of the main notorious differentials from one company to another is how much it invests and knows how to use new technologies and innovations in software and hardware. Therefore, universities must be at the forefront in including new technologies so that students and future professionals can learn and present the technologies to society. That said, for the perfect operation of a company, it is necessary to use a network to interconnect workstations, peripherals, terminals, cell phones, iPads, and other devices. This article presents the evolution of wireless networks and a study of the art of WiFi technology, up to the most recent WiFi 7, which does not yet exist commercially but is projected, according to Qualcomm, the world's largest supplier of WiFi peer processors, to be available on the market in the second half of 2024. Given this scenario we see the importance of strengthening the knowledge about the evolution of technologies in this area and understand the improvements from one model to another.

Keywords: Wireless networks, WiFi 7, WiFi.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

<u>Fig. 1. Taxa de transmissão de dados comparado com versões anteriores (Cortesia de Li, Si-Ao & HUANG, HAO & Pan, Zhongqi & Yin, Runze & Wang, Yingning & Fang, Yuxi & Zhang, Yiwen & Bao, Changjing & Ren, Yongxiong & Li, Zhaohui & Yue, Yang).</u>	17
<u>Fig. 2. Ilustração da eficiência espectral de modulação por divisão de frequência (FDM) [11].</u>	18
<u>Fig. 3. Ilustração da eficiência espectral de modulação por divisão de frequência ortogonal (OFDM). [11]</u>	18
<u>Fig. 4. OFDM x OFDMA [12].</u>	18
<u>Fig. 5. Rede mesh em uma residência [18].</u>	20
<u>Fig. 6. Rede Repetidor WiFi em uma residência [18].</u>	20
<u>Fig. 7. WiFi 7 - Divulgação/TP-Link [7]</u>	21
<u>Fig. 8. Roteador ASUS compatível com WiFi 7: Imagem: Divulgação/ASUS [7]</u>	21
<u>Fig. 9. CANAIS OCUPADOS ASSIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (10% de ocupação e ambos os canais) [19].</u>	21
<u>Fig. 10. CANAIS OCUPADOS ASSIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (40% de ocupação em ambos os canais) [19].</u>	22
<u>Fig. 11. CANAIS OCUPADOS ASSIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (70% de ocupação e ambos os canais) [19].</u>	22
<u>Fig. 12. CANAIS OCUPADOS SIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados não simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (Primário de 10% e secundário de 40%) [19].</u>	22
<u>Fig. 13. CANAIS OCUPADOS SIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados não simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (Primário de 10% e secundário de 70%) [19].</u>	22
<u>Fig. 14. CANAIS OCUPADOS SIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados não simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (Primário de 40% e secundário de 70%) [19].</u>	23

LISTA DE TABELAS

TABELA I – Comparativo entre gerações recentes de WiFi [7]	17
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PLC	Power Line Communication
WiFi	Wireless Field
IoT	Internet das coisas
RF	Radio Frequency
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
SHF	Super High Frequency
EHF	Extremely high frequency
WLAN	Wireless Local Area Network
ISP	provedor de serviços de Internet
FH/TDD	Frequency Hopping / Time Division Duplex
SCO	Synchronous Connection-Oriented
ACL	Asynchronous Connection-Less
SIG	Bluetooth Special Interest Group
WWAN	Wireless Wide Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
EHT	Extremely High Throughput
MLO	Multi Link Operation
AR	Realidade Aumentada
VR	Realidade Virtual
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
MRU	Multiple Resource Unit
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
WEP	Wired Equivalent Privacy
WPA	WiFi Protected Access
SLO	WiFi Single Link

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MLO STR Multi-Link Operation Simultaneous Transmit and Receive Operation

MLO-NSTR Multi-Link Operation non Simultaneous Transmit and Receive Operation

SUMÁRIO

I. Introdução.....	15
II. Tipos de rede sem fio	15
III. Padrões das redes WiFi.....	16
IV. Evolução das redes WiFi.....	16
V. WiFi 7	17
VI. Medições de eficiências para WiFi7	21
A. Canais Ocupados Simetricamente	21
B. Canais Ocupados Assimetricamente	22
VII. Conclusão.....	23
VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

O ESTUDO DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DAS REDES SEM FIO WIFI ATÉ A GERAÇÃO 7

Vander Aparecido Souza Silva

Acadêmico de Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia e suas Tecnologias

Departamento de Engenharia Elétrica, Cuiabá – Mato Grosso

E-mail: vandervsilva000@gmail.com

Resumo - Com a evolução da Internet o acesso à informação é fundamental e deve estar disponível em todos os locais inclusive nos bairros periféricos e regiões remotas. Por isso, é imprescindível que as empresas, escolas, universidades, indústrias e principalmente o governo invistam em tecnologia visando a melhoria de comunicação e acesso à informação, tanto no âmbito urbano, quanto rural, fornecendo serviços de internet. Para fornecer serviço de internet, em áreas rurais e remotas diversas tecnologias estão à disposição como: satélite, por exemplo, com a Starlink, microondas, fibra ótica, cabo coaxial, PLC (*Power Line Communication*), WiMax e WiFi. Um dos principais diferenciais notórios de uma empresa para outra é o quanto esta investe e sabe utilizar as novas tecnologias e inovações em software e hardware. Sendo assim as universidades devem estar na frente quanto a inclusão de novas tecnologias para que os alunos e futuros profissionais possam aprender e apresentar as tecnologias para a sociedade. Dito isso, para a perfeita operação de uma empresa, é necessário a utilização de uma rede para fazer a interconexão de estações de trabalho, periféricos, terminais, celulares, Ipad e outros dispositivos e este artigo apresenta a evolução das redes sem fio e um estudo da arte da tecnologia WiFi, até o mais recente WiFi 7, que ainda não existe comercialmente mas com projeção, segundo a empresa Qualcomm maior fornecedora mundial de processadores para WiFi, de estar disponível no mercado para o segundo semestre de 2024. Dado esse cenário verificamos a importância do fortalecimento dos conhecimentos acerca da evolução das tecnologias desta área e entender as melhorias de um modelo ao outro.

Palavras-chave: Redes sem fio, WiFi 7, WiFi.

THE STUDY OF THE TECHNOLOGICAL EVOLUTION OF WIRELESS WIFI NETWORKS UNTIL GENERATION 7

Abstract - With the evolution of the Internet, access to information is fundamental and must be available everywhere, including remote neighborhoods and regions. Therefore, it is essential that companies, schools, universities, industries, and especially the government invest in technology to improve communication and access to information, both in urban and rural areas, by providing internet services. To provide internet service in

rural and remote areas several technologies are at hand such as: satellite, for example, with Starlink, microwave, optical fiber, coaxial cable, PLC (*Power Line Communication*), WiMax, and WiFi. One of the main notorious differentials from one company to another is how much it invests and knows how to use new technologies and innovations in software and hardware. Therefore, universities must be at the forefront in including new technologies so that students and future professionals can learn and present the technologies to society. That said, for the perfect operation of a company, it is necessary to use a network to interconnect workstations, peripherals, terminals, cell phones, iPads, and other devices. This article presents the evolution of wireless networks and a study of the art of WiFi technology, up to the most recent WiFi 7, which does not yet exist commercially but is projected, according to Qualcomm, the world's largest supplier of WiFi peer processors, to be available on the market in the second half of 2024. Given this scenario we see the importance of strengthening the knowledge about the evolution of technologies in this area and understand the improvements from one model to another.

Keywords: Wireless networks, WiFi 7, WiFi.

I. Introdução

Redes de telecomunicações conectam aparelhos e dispositivos buscando facilitar o acesso a informações que cada um destes pode disponibilizar, levando informação a um usuário em um menor tempo possível. Com isso, as pesquisas e testes deram enfoque tanto em formas de aumentar a velocidade do acesso, quanto a quantidade de dispositivos por aparelho, além da melhoria nas formas de comunicação e essa “corrida” levou a vários tipos de redes sem fio, cada uma com suas vantagens e desvantagens. De forma sucinta, as redes sem fio, se tornaram uma ferramenta vital para que se consiga rapidamente acessar a informação de forma fácil e prática. Este artigo tem por objetivo apresentar o estado da arte do que há de mais recente nesta área, que é o WiFi 7.

II. Tipos de rede sem fio

1) Introdução

A partir dessa década as redes sem fio vêm preenchendo um espaço maior, visto que os aparelhos atuais do mais simples ao mais complexo, desde dispositivos IoT,

computadores, instrumentos de medição, equipamentos médicos estão com recursos para comunicações sem fio. Os usuários em sua grande maioria, estão tendo a preferência em utilizar o sistema WiFi pela sua grande evolução tecnológica proporcionando alta taxa de transmissão, baixo delay e melhor penetração em ambientes com paredes. Entretanto a condição de segurança ainda é muito preocupante.

Com a praticidade da instalação das redes sem fio já consolidada para o usuário acessar de qualquer lugar, e a qualquer momento, com um simples smartphone ou Ipad, sem a necessidade de um computador, as tecnologias de rede sem fio vêm dominando as utilizações nas residências, comércio, empresas, shoppings, escolas, universidades, hospitais e demais locais.

Dentre os principais tipos de redes de dados sem fios, tem-se: IR, RF (Rádio Frequência), Laser, radio micro-ondas terrestre, satélite, bluetooth, celular e WiFi.

2) WiFi

WiFi é uma tecnologia de rede sem fio de alta velocidade baseada no padrão IEEE 802.11. Ela utiliza ondas de rádio para estabelecer conexões à Internet. O termo "WiFi" é uma marca registrada da WiFi Alliance, uma organização que certifica produtos que passam em testes de interoperabilidade. Comparado a outras tecnologias sem fio, o WiFi é conhecido por sua velocidade, segurança e alcance superior.

O WiFi utiliza as bandas de rádio 5 GHz SHF ISM e 2,4 GHz UHF, juntamente com pontos de acesso, para fornecer conectividade. Os pontos de acesso funcionam como "hotspots", transmitindo os sinais de rede sem fio para dispositivos próximos. Os dispositivos receptores WiFi, como laptops, smartphones e tablets, possuem cartões WiFi que captam os sinais de rádio dos pontos de acesso e estabelecem conexões à Internet para o usuário.

Em resumo, o WiFi é uma tecnologia sem fio de alta velocidade que utiliza ondas de rádio para fornecer conexões à Internet. É certificado pela WiFi Alliance e oferece maior velocidade, segurança e alcance em comparação com outras tecnologias sem fio. Os dispositivos receptores WiFi captam os sinais de rádio dos pontos de acesso para criar conexões à Internet para os usuários [1, 2].

Na seção seguinte será apresentado os padrões das redes WiFi.

III. Padrões das redes WiFi

Em meados de 1990, a IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) criou um comitê para criação do padrão que seria utilizado para a nova forma de conexão sem fio. Em 1997, criou-se o primeiro padrão: 802.11 onde já se tinha taxas de transmissão de até 1Mbps, e, em 1999, padrões 802.11a e 802.11b que trabalhavam em 2,4 GHz e 5 GHz, respectivamente, atingindo taxas de transmissões maiores que as anteriores. A partir disso, foi se criando novos padrões como: 802.11g, 802.11n, 802.11ax e por fim 802.11be, onde gradativamente os padrões nortearam o funcionamento do WiFi, chegando as taxas de transferências com valores muito altos comparados ao que se utiliza atualmente.

IV. Evolução das redes WiFi

Desde quando foi criado o primeiro protótipo, desenvolvido com os padrões IEEE 802.11, em 1997, até os dias atuais, o WiFi evoluiu desenfreadamente, melhorando a velocidade e a confiabilidade dos aparelhos e conexões. Essa ascensão, na atualidade, se deu pela necessidade cada vez maior, da melhoria das conexões e transmissões de dados via internet ou mesmo em redes locais.

1) WiFi 1

Utilizava Banda de 2,4 GHz que, até o momento, era um segmento que ainda não era usado, ou seja, tinha pouca interferência se comparado aos dispositivos posteriores que usavam padrão IEEE 802.11b. Este tipo de WiFi (WiFi 1) foi criado a partir da norma IEEE 802.11a, a primeira lançada, chegava a 54 Mbps, porém o alcance era muito curto (de 8 a 25 metros) e a internet disponível era na faixa de 2 Mbps. Nesta época, por volta de 1997, essa velocidade era tida como muito boa. Comparada com as disponíveis hoje em dia, não seria suficiente para suprir nem as redes de dados móveis [12, 13].

2) WiFi 2

Utilizando-se o padrão IEEE 802.11b, esta segunda geração, agora tinha uma velocidade de navegação maior, variando entre 5 e 11 Mbps. Pela sua velocidade e, principalmente, alcance maior que a versão anterior, foi usada em larga escala pela indústria, ocasionando na criação da WiFi Alliance, da onde saiu o nome "WiFi". Dentro da IEEE 802.11b, também se criou a compatibilidade usando o WLAN, que conecta qualquer tipo de cliente ou tipo de dispositivo com um baixo custo, porém isso trouxe consigo a baixa confiabilidade na segurança e qualidade, já que utilizava a banda de 2,4 GHz, que era mais propensa a acessos indesejados [2, 3].

3) WiFi 3

Lançado em 2003, utilizando o padrão IEEE 802.11g, com configurações parecidas com a anterior (IEEE 802.11b), porém com a velocidade chegando a 54 Mbps em 2,4 GHz [2].

4) WiFi 4

Em sua quarta geração, o WiFi 4 entrou no mercado em 2009, utilizando o padrão IEEE 802.11n, e foi a partir daqui que este tipo de conectividade passou a adotar o "Multiple-Input Multiple-Output", conhecidos como MIMO ou até mesmo por "Múltiplas entradas e Múltiplas saídas". Permitindo um aumento nas taxas de transferência de dados através da combinação de vias de transmissão, atingindo uma velocidade máxima de 100 Mbps na rede de 2,4 GHz e de 600 Mbps na de 5 GHz [2, 4].

5) WiFi 5

Lançado em 2014, utilizando-se do padrão 802.11ac chega a velocidades de até 6,9 GHz de velocidade em ambas as frequências de rede 2,4 GHz e 5 GHz. A geração 5 é o mais utilizado atualmente, pois sua alta taxa de transferência de dados facilita os vários serviços que necessitam de baixa latência [1, 2].

6) WiFi 6

Aprovado o padrão 802.11ax, em 2021, torna-se possível ter acesso ao WiFi 6 que tem um pico ainda maior que velocidade que o anterior, chegando até a 9,6 Gbps, além disso a quantidade de dispositivos (ou usuários) conectados à rede aumentou de 4 para 8, sendo a melhor opção para o futuro, no que abrange os crescentes dispositivos, como: lâmpadas e tomadas inteligentes, outros eletrônicos SMART, de várias áreas, conectados a uma mesma rede [5].

7) WiFi 6E

Com as vantagens e características da versão anterior, o WiFi 6E tem como principal diferença ser operante na frequência de 6 GHz, o que o torna menos suscetível a interferência que existe na frequência de 2,4 GHz, além de não elevar, ainda mais, a quantidade de dispositivos na frequência de 5 GHz. Com isso, as vantagens do WiFi 6 são evidentes pois conta com uma largura de banda maior, menos congestionamento na rede, mais velocidade e redução da latência [6].

8) WiFi 7

A geração 7 é um protótipo aprovado no final de 2022. Utilizando o padrão 802.11be EHT (*Extremely High Throughput*), terá acesso às três frequências 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz, porém, agora tendo picos de velocidade de até 49 Gbps, sendo maior que a versão anterior em até cinco vezes. Na tabela II abaixo é apresentado o comparativo das versões comuns no mercado junto ao WiFi 7.

Tabela II

Comparativo entre gerações recentes de WiFi [7]

	WiFi 5	WiFi 6	WiFi 6E	WiFi 7
lançamento	2013	2019	2021	2023/2024
Padrão IEEE	802.11ac	802.11ax	802.11ax	802.11be
Taxa de dados (máxima)	3,5 Gbps	9,6 Gbps	9,6 Gbps	46 Gbps
Bandas	5 GHz	2,4 GHz e 5 GHz	2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz	2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz
Tamanho do Canal	20, 40, 80, 80+80, 160 MHz	20, 40, 80, 80+80, 160 MHz	20, 40, 80, 80+80, 160 MHz	Até 320 MHz
MIMO	4x4 MIMO DL MIMO	8X8 UL/DL MU-MIMO	8X8 UL/DL MU-MIMO	16x16 UL/DL MU-MIMO
Modulação	256-QAM OFDM	1024-QAM OFDMA	1024-QAM sOFDMA	4096-QAM OFDMA
RU	-	RU	RU	Multi-RUs
MAC	-	-	-	MLO

Nesta TABELA II, o comparativo entre as gerações 5, 6, 6E e 7 do WiFi, deixa nítido as melhorias que ocorreram em dez anos de avanços desta área. Mais recentemente, nos últimos cinco anos vê-se melhoria na banda, na taxa de dados máxima, MIMO, modulação e nas Multi-RU e MLO que vem nesta próxima geração 7.

V. WiFi 7

A tecnologia WiFi 7 aborda as necessidades de pessoas do mundo inteiro, uma vez que evoluirão rapidamente nos próximos anos, conforme cada geração evolui em relação a versão anterior. É esperado que os principais benefícios do WiFi 7, incluindo latência ultrabaixa consistente e

desempenho melhorado em ambientes densos para que atenda aos seguintes usos em desenvolvimento: transmissão A/V de 8K, AR/RV, jogos em nuvem, aplicações interativas, IoT Industrial e Indústria 4.0, telediagnóstico e telecirurgia [6, 8].

Além disso, o WiFi 7 proporciona uma latência muito menor, especialmente em situações desafiadoras, com um desempenho 100 vezes melhor do que o WiFi 6. Ele também oferece um desempenho 15 vezes melhor para aplicações de realidade aumentada/virtual [8].

Para atingir uma taxa de transferência máxima de, pelo menos, 30 Gbps, o WiFi 7 planeja introduzir novos modos de largura de banda, como 240 MHz contíguos, 160 + 80 MHz não contíguos, 320 MHz contíguos e 160+160 MHz não contíguos. No entanto, ainda há discussões em andamento sobre a canalização e o plano de tonalidades desses novos modos de largura de banda. Por exemplo, está sendo debatido se os modos 240 MHz/160+80 MHz são formados por subtração de 320/160+160 MHz ou se será necessário definir um novo plano de tonalidades para 160+160 MHz/320 MHz. Além disso, o WiFi 7 está buscando maneiras eficazes de melhorar a utilização do espectro de banda larga e bandas não contínuas [8].

1) Modulação QAM 4K

A Modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) traduz pacotes digitais em sinal analógico para poder transferir dados wireless, conforme determinado no padrão 802.11. Ao variar a fase e a amplitude das ondas de rádio, a tecnologia melhora a eficiência espectral ao incorporar mais dados em cada transmissão. A modulação QAM define um tamanho do quadrante adequado para alcançar eficiências espectrais arbitrariamente elevadas.

Nas telecomunicações digitais os dados são normalmente binários, pelo que o número de pontos na rede é tipicamente uma potência de 2, correspondendo ao número de bits por símbolo. 4K-QAM (4096-QAM) é uma modulação QAM usando 4096 pontos dispostos num quadrante, onde cada símbolo transporta 12 bits. Empacotando mais dados, o 4K-QAM permite um aumento de 20% da taxa de dados em WiFi 7 (802,11be) em comparação com 1024-QAM de WiFi 6 (802,11ax). O 4K-QAM traz uma maior taxa de transmissão de dados e uma maior eficiência espectral. Na figura 1, nota-se as taxas de transmissão para cada QAM comparando com as versões anteriores [9].

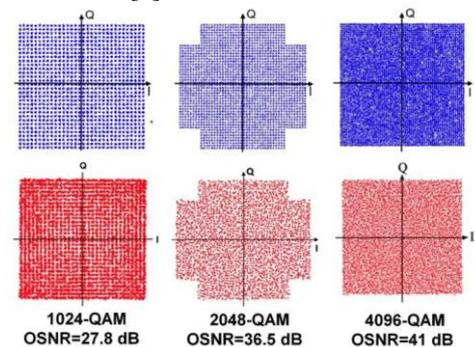


Fig. 1. Taxa de transmissão de dados comparado com versões anteriores (Cortesia de Li, Si-Ao & HUANG, HAO & Pan, Zhongqi & Yin, Runze & Wang, Yingning & Fang, Yuxi & Zhang, Yiwen & Bao, Changjing & Ren, Yongxiong & Li, Zhaohui & Yue, Yang).

2) OFDM

Antes de explicar a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que é a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal, é necessário ter conhecimento do FDM (*Frequency Division Multiplexing*) na qual é Multiplexação por divisão de Frequência, que é uma técnica de multiplexação em que diferentes sinais são combinados em um único canal de comunicação através da divisão do espectro em bandas de frequência não sobrepostas. Cada sinal é atribuído a uma faixa de frequência específica e transmitido simultaneamente. No lado receptor, esses sinais são separados por meio de filtros passa-banda para recuperar os dados originais [10].

Por outro lado, OFDM também é uma técnica de multiplexação, mas utiliza uma abordagem diferente. Em vez de alocar bandas de frequência separadas para cada sinal, o espectro total de frequência é dividido em várias subportadoras ortogonais. Cada subportadora é uma onda senoidal com uma frequência específica e todas as subportadoras são espaçadas igualmente no espectro.

A principal diferença entre OFDM e FDM é a forma como as subportadoras são espaçadas e combinadas. No OFDM, as subportadoras são espaçadas de forma tão precisa que se tornam ortogonais umas às outras, o que significa que não há interferência entre elas. Isso é possível porque a largura de banda de cada subportadora é relativamente estreita, o que permite uma boa separação entre elas. Assim, o OFDM utiliza a ortogonalidade das subportadoras para transmitir várias informações simultaneamente [10].

O OFDM é um método de transmissão utilizado em sistemas de comunicação modernos, como redes sem fio (WiFi, 4G, 5G) e transmissões de TV digital. Ele divide o espectro em subportadoras ortogonais para transmitir informações em paralelo, ao contrário do FDM, que divide o espectro em bandas de frequência não sobrepostas. O OFDM é amplamente adotado devido à sua eficiência espectral e resistência a interferências, permitindo uma transmissão robusta de dados em canais com desvanecimento e multipercurso. Isso o torna adequado para ambientes sem fio complexos. A principal vantagem do OFDM é a sua eficiência espectral, ou seja, a capacidade de transmitir uma grande quantidade de dados em um canal de comunicação limitado em largura de banda. Além disso, o OFDM é robusto contra interferências devido à sua propriedade de ortogonalidade, que minimiza a interferência entre as subportadoras. Essa técnica também é resistente à propagação multipercurso, que é comum em ambientes sem fio [10].

Na Figura 2 é apresentado um exemplo de FDM, com sinais distintos, e, na Figura 3 tem-se os sinais agora espaçados ortogonalmente, caracterizando o OFDM.

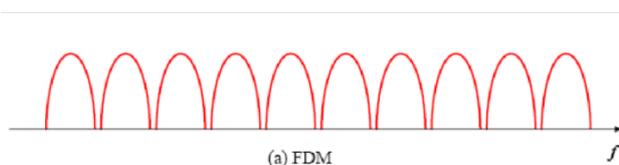


Fig. 2. Ilustração da eficiência espectral de modulação por divisão de frequência (FDM) [11].

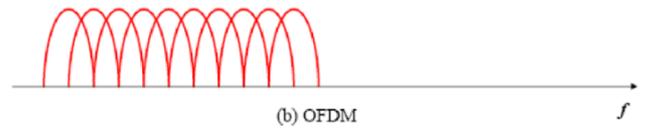


Fig. 3. Ilustração da eficiência espectral de modulação por divisão de frequência ortogonal (OFDM). [11]

3) OFDMA

É essencialmente um tipo de OFDM para vários usuários. OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), Acesso Múltiplo por Divisão Ortogonal de Frequência, é uma técnica de acesso múltiplo utilizada em sistemas de comunicação sem fio, como redes celulares e WiFi, para permitir que múltiplos usuários compartilhem eficientemente o espectro de frequência disponível.

No OFDMA, o espectro de frequência é dividido em subportadoras ortogonais, que são sinais portadores independentes que se sobrepõem entre si. Cada subportadora é atribuída a um usuário ou grupo de usuários específico, permitindo a transmissão simultânea de dados entre múltiplos usuários.

Além disso, o OFDMA também permite uma alocação dinâmica de recursos de forma flexível. Isso significa que a alocação de subportadoras e a quantidade de recursos atribuídos a cada usuário podem ser ajustadas conforme as necessidades de tráfego em tempo real. Por exemplo, se um usuário requer mais largura de banda para uma transmissão intensiva de dados, é possível atribuir mais subportadoras para atender a essa demanda [8].

O OFDMA é utilizado em diversas tecnologias de comunicação sem fio, como o LTE (*Long Term Evolution*) e o WiFi baseado no padrão IEEE 802.11ax (também conhecido como WiFi 6). Essas tecnologias aproveitam as vantagens do OFDMA para melhorar a capacidade, eficiência espectral e desempenho geral das redes sem fio. Em comparação, OFDM pode alocar apenas sequencialmente pois o OFDMA divide um canal WiFi em alocações de frequência menores, chamadas unidades de recursos (RUs). Um ponto de acesso pode se comunicar com vários clientes atribuindo-os a RUs específicas. Na figura 4, as subportadoras ou tons agora estão divididos em vários grupos, cada um denominado RU (*Unidade de Recursos*) [8].

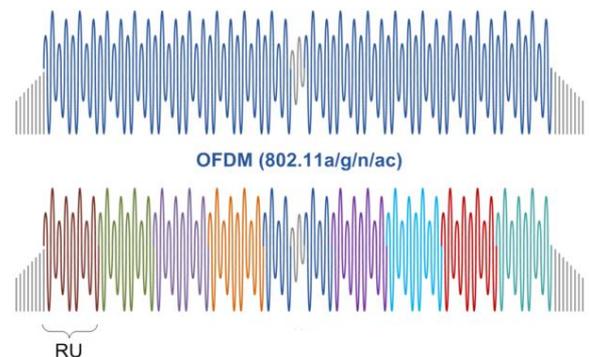


Fig. 4. OFDM x OFDMA [12].

Estes serão alocados aos dispositivos dependendo de uma série de parâmetros; condições do canal, requisitos de serviço, recursos do dispositivo, etc. Além disso, o espaçamento da

subportadora (distância entre subportadoras adjacentes) foi reduzido para 78,125 KHz para minimizar a sobrecarga do intervalo de guarda e melhorar o ganho de seleção de frequência. Novos intervalos de guarda de 1,6 μ sec e 3,2 μ sec foram adicionados ao intervalo de tempo original de 0,8 μ sec para combater o ISI (*Inter Symbol Interference*) em ambientes internos e externos [8].

4) MULTI-RU

O MRU (*Multiple Resource Unit*) é um novo recurso presente no WiFi 7, que é baseado no recurso OFDMA introduzido pela primeira vez no WiFi 6. O MRU oferece melhor mitigação de interferência e eficiência OFDMA, resultando em uma redução adicional de 25% na latência para múltiplos usuários [13].

Ao permitir a seleção seletiva de porções sobrepostas do espectro, o MRU assegura que os dados trafeguem apenas em frequências livres de interferência, o que aumenta as taxas de dados e a confiabilidade em ambientes WiFi congestionados.

As RUs, ou unidades de recursos, são grupos de subportadoras com uma largura de banda de 78,125 KHz usadas nas transmissões de DownLink e UpLink. Essa alocação de RUs possibilita uma ampla variedade de tamanhos, visando aumentar a eficiência do OFDMA [13].

5) OPERAÇÃO MULTILINK

Operação MLO (*Multi Link Operation*) é uma tecnologia WiFi que permite que dispositivos conectados a um ponto de acesso (AP) WiFi enviem e/ou recebam dados simultaneamente em diferentes bandas de frequência e canais. A tecnologia MLO é um dos muitos recursos principais adicionados ao WiFi 7 que ajudam a aprimorar a experiência do usuário ao lidar com conexões sem fio com mais eficiência [3].

A tecnologia MLO agrega vários canais em diferentes bandas de frequência ao mesmo tempo, negociando tráfego de rede contínuo mesmo se houver interferência ou congestionamento. Isso aumenta muito as velocidades, permite redes de malha mais eficazes e fornece as mais recentes técnicas de mitigação de interferência para garantir que os dispositivos sem fio estejam sempre conectados de forma rápida e confiável, mesmo em ambientes de rede densa.

O MLO do WiFi 7, tem, principalmente, dois modos:

Modo STR (Operação de Transmissão e Recepção Simultânea) - O Modo STR refere-se ao modo transceptor simultâneo ou modo assíncrono. Ou seja, dois ou mais links funcionam de forma completamente independente, e não interferem um no outro [13].

- Modo NSTR (Operação de Transmissão e Recebimento Não Simultânea) - Modo NSTR refere-se ao modo transceptor não simultâneo ou modo síncrono. Ou seja, operações simultâneas de recebimento e envio não são permitidas ao mesmo tempo. Desse modo todos os links só podem receber ou todos os links podem enviar dados.
- Isso significa que, se um dispositivo conectado na banda de 5 GHz estiver com desempenho degradado devido ao surgimento de outro

dispositivo na rede, a função MLO mudará automaticamente o primeiro dispositivo para a banda de 6 GHz.

Com o MLO, o WiFi 7 pode estabelecer vários links entre o dispositivo (como um smartphone) e o ponto de acesso WiFi (como um roteador). Conectar-se às bandas de 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz simultaneamente aumenta a taxa de transferência, reduz a latência e melhora a confiabilidade [13].

6) ANTENAS PARA WIFI – MIMO

Para atender às crescentes demandas de tráfego geradas pelo número crescente de dispositivos WiFi, os APs continuaram a aumentar o número de antenas e melhorar os recursos de multiplexação espacial. O WiFi 7 aumenta o número de fluxos espaciais de 8 para 16. Assim, a taxa de transmissão física teórica é dobrada em comparação com o WiFi 6. Com os 16 fluxos do WiFi 7, cada dispositivo tem largura de banda suficiente para funcionar sem problemas.

Quando vários dispositivos usam a rede de um roteador, eles não são conectados ao mesmo tempo, mas esperam na fila. Em outras palavras, ele permitirá a comunicação com até 16 dispositivos em cada fluxo - uma grande razão pela qual as taxas de transferência de WiFi 7 são substanciais em comparação com WiFi 6. Melhor ainda, 16 \times 16 MU-MIMO também melhorará muito a taxa de transferência de dados de dispositivos individuais enquanto também expande a cobertura WiFi [5, 14].

7) SEGURANÇA MLO PARA WIFI 7

Dispositivos WiFi tradicionais transmitem dados usando uma única conexão. Com o MLO, o WiFi 7 permitirá que os dispositivos transmitam e recebam dados em diferentes bandas de frequência e canais simultaneamente, o WiFi 7 provavelmente continuará a oferecer métodos de autenticação robustos, como o WPA3 (*WiFi Protected Access 3*), que foi introduzido no WiFi 6. O WPA3 substituiu o antigo WPA2 e fornece melhorias significativas na autenticação, dificultando a quebra de senhas.

Com relação a criptografia, WiFi 7 provavelmente continuará a oferecer criptografia avançada para proteger a comunicação sem fio. É provável que suporte algoritmos de criptografia mais fortes e modernos, como o AES (*Advanced Encryption Standard*), que é atualmente usado no WPA3 [15].

Uma consideração importante é a segurança dos dispositivos conectados à rede WiFi. É fundamental garantir que todos os dispositivos tenham medidas de segurança adequadas, como atualizações de firmware regulares e configurações adequadas de segurança, para evitar vulnerabilidades que possam ser exploradas por invasores.

A segmentação de rede é uma prática recomendada para melhorar a segurança. Com o WiFi 7, é provável que continuemos a ver suporte para redes virtuais (VLANs) e recursos de isolamento de cliente, permitindo separar o tráfego em diferentes segmentos de rede para restringir o acesso não autorizado a determinados recursos [15].

Monitoramento e detecção de ameaças: As soluções de segurança para redes sem fio devem incluir recursos de monitoramento e detecção de ameaças em tempo real. Isso pode incluir detecção de intrusões, análise de tráfego suspeito

e medidas para combater ataques de negação de serviço (DoS) [15].

8) Segurança WPA3

O WPA foi o substituto da WiFi Alliance para o WEP. Ele compartilhava semelhanças com o WEP, mas oferecia melhorias na maneira como lida com as chaves de segurança. As chaves usadas pelo WPA eram de 256 bits, um aumento significativo em relação às chaves de 64 e 128 bits usadas no sistema WEP.

O WPA3 pretende melhorar a proteção em WiFi público ao adicionar criptografia para troca de dados, mesmo em redes abertas e sem proteção por senha. Ele também adiciona uma proteção extra ao handshake para trazer mais segurança contra ataques de força bruta e tornar a conexão WiFi mais fácil para dispositivos sem tela ou com interface limitada. Além disso, o WPA3 inclui um novo tipo de criptografia mais robusto, de 192-bit, para oferecer mais segurança em entidades que lidam com informações sensíveis [16].

9) Comparativo rede mesh e repetidor WiFi

O sistema mesh de conexão é o conjunto de dispositivos que unidos criam uma rede integrada dentro da área de cobertura, utilizando dispositivos denominados de “nós”. Um dos nós, normalmente, se conecta ao roteador principal por cabo Ethernet, os demais “nós” são espalhados por toda a área que se quer fazer a cobertura. No WiFi mesh, não é necessário se desconectar manualmente da rede ao entrar na área de outro nó, o sistema faz a alteração para o ponto que estiver com o sinal mais forte.

Um repetidor de sinal WiFi é um aparelho que melhora e amplia o sinal da internet para um determinado espaço, distribuindo e retransmitindo mais uniformemente o sinal. Com ele, é possível fazer com que uma área externa da casa tenha a mesma qualidade de conexão que o cômodo onde fica o roteador principal. Na figura 5, é mostrado a atuação e cobertura da rede mesh em uma residência de porte médio, e, na figura 6, tem-se a área atuante do WiFi em conjunto ao repetidor na residência respectiva [17].



Fig. 5. Rede mesh em uma residência [18].



Fig. 6. Rede Repetidor WiFi em uma residência [18].

10) APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS COM WIFI 7

As redes de computadores cabeadas, particularmente as redes gigabit, têm velocidades de transmissão de dados superiores às redes wireless de versões anteriores. Com o WiFi 7, isso deixa de ser verdade e com ele a necessidade de ter cabos de redes quando são exigidas velocidades elevadas na rede.

A quantidade de dispositivos conectados e a qualidade/velocidade da transmissão de dados, aumenta. Em ambientes empresariais ou residenciais com um grande número de usuários, como SmartTVs e dispositivos IoT, é possível conectar todos esses dispositivos a um mesmo roteador. No entanto, aplicações baseadas em metaverso e realidade virtual geralmente exigem uma conexão de alta qualidade, o que não seria possível em uma rede sem fio de sétima geração, pois isso seria um obstáculo para o seu funcionamento adequado. Isso também se aplica a situações que requerem execução em tempo real, uso intenso de computação em nuvem, trabalho remoto e qualquer situação que demande uma grande quantidade de troca de dados com velocidade.

11) Fabricantes, Modelos, Marcas e Modelos de roteadores WiFi 7 e equipamentos e dispositivos compatíveis com WiFi 6E ou 7

No final de 2022, a fabricante TP-Link anunciou a sua primeira linha de roteadores WiFi 7 com três modelos: o Archer BE900, conforme mostrado na figura 7, com suporte a taxas de transferência de até 24 Gbps; o Archer GE800, modelo voltado para gamers; e o Deco BE95, versão Mesh com suporte a até 33 Gbps.

A fabricante ASUS também anunciou um modelo WiFi 7 durante a CES 2023: trata-se do ROG Rapture GT-BE98, ilustrado na figura 8, com suporte a taxas de transferência de até 25 Gbps. Nenhum dos modelos está disponível até agora.

O valor nominal suportado de taxa de transferência oferecido por eles ainda está quase 50% abaixo do potencial máximo da tecnologia, mas ainda assim é consideravelmente superior aos modelos atuais que chegam aos 10 Gbps [7].



Fig. 7. WiFi 7 - Divulgação/TP-Link [7]



Fig. 8. Roteador ASUS compatível com WiFi 7: Imagem: Divulgação/ASUS [7]

VI. Medições de eficiências para WiFi7

1) Introdução

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é demonstrar a importância que deve ser dada ao assunto assim como auxiliar nos processos referentes a implementação/migração de redes sem fio onde a conectividade da rede é feita de forma rápida, fácil e a custos acessíveis, com acesso seguro e altamente funcional para qualquer tamanho de empresa, escritório e residências, tanto para novos prédios como para lugares temporários. Possibilitando constantes mudanças de layout e um ambiente tecnologicamente moderno e visualmente atrativo.

2) Metodologia utilizada para a medição da eficiência – Estudo da latência para a operação multilink (MLO)

Como se trata de um roteador WiFi ainda indisponível no mercado, esse tópico apresenta resultados obtidos de estudos baseados em artigos publicados referente a medições experimentais, em especial usando o estudo de latência para operação multi-link. Essa metodologia de simulações é baseada em rastreamento para estudar o efeito da ocupação do canal na latência, particionando os rastreamentos disponíveis no conjunto de dados para canais primários e secundários em diferentes regimes médios de ocupação do canal: {10%, 20%, ..., 90%}[19].

3) Cenário para medição

Foi selecionado o regime de ocupação de interesse para os canais primário e secundário, por exemplo, 10% e 40%, respectivamente, e combinado ao acaso uma amostra de espectro para cada um dos sinais. A máquina de estado WiFi para as políticas de acesso SLO (WiFi Single Link), MLO STR (Multi-Link Operation Simultaneous Transmit and Receive Operation – Operação simultânea de Transmissão e

recebimento) e MLO-NSTR (Multi-Link Operation non Simultaneous Transmit and Receive Operation - Operação Multi-Link Operação de Transmissão e Recebimento Não Simultânea). Os mesmos tempos de chegada de pacotes são considerados em todos os casos para permitir uma comparação direta. A carga de tráfego normalizada, em cada um dos gráficos, é a quantidade de canais ou bandas utilizadas simultaneamente pelo aparelho. E, por fim, armazenou-se o atraso individual experimentado por cada pacote em todas as amostras de espectro.

4) Resultados obtidos

A. Canais Ocupados Simetricamente

Aqui o caso de ocupações simétricas de canais em que ambas as interfaces MLO possuem canais com níveis de ocupação semelhantes. Em particular, a pesquisa que foi baseada para esse artigo apresentou o desempenho do atraso com pares de canais nas faixas de 10%, 40% e 70% de ocupação. Nesses casos, o throughput médio de buffer completo no SLO foi de 37, 22 e 6,8 Mbps, respectivamente. Para esses três cenários (baixa, média e alta ocupação simétrica), a máquina de estado WiFi com tráfego de Poisson e a intensidade como uma fração dessa taxa de transferência média de buffer completo do SLO, ou seja, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 [19].

Observa-se que quando ambos os canais têm 10% de ocupação, na figura 9, os três esquemas têm escalonamento notavelmente diferente com o aumento da carga de tráfego, pois o atraso MLO não aumenta na mesma taxa que o atraso SLO.

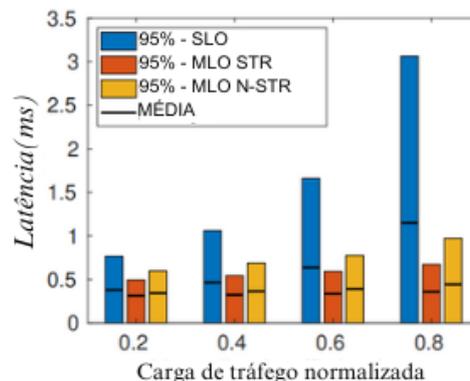


Fig. 9. CANAIS OCUPADOS SIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (10% de ocupação e ambos os canais) [19].

Por exemplo, com carga de tráfego de 20%, STR e NSTR oferecem uma diminuição modesta no atraso médio em comparação com a operação de link único de 17% e 9%, respectivamente. Em contraste, quando a carga de tráfego é de 80%, STR e NSTR reduzem o atraso médio em 69% e 62%. Esse escalonamento é ainda mais pronunciado analisando o percentil 95 de atraso, no qual o MLO atinge uma redução de atraso de até 78% [19].

Na ocupação média simétrica (40%) apresentado na figura 10, enquanto o atraso médio do SLO aumenta apenas modestamente com o tráfego (ou seja, de 2 a 18 ms), o atraso 95º percentil aumenta muito mais rapidamente, excedendo 100 ms. Em contraste, o STR pode gerar uma redução

impressionante da ordem de magnitude no atraso do 95º percentil em comparação com o SLO. A razão é que o STR aproveita o uso de dois canais e pode acessar um ou ambos. STR, portanto, obtém benefícios de atraso em comparação com SLO, a menos que ambos os canais estejam ocupados [19].

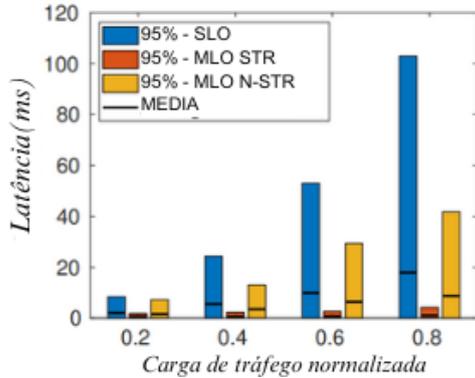


Fig. 10. CANAIS OCUPADOS SIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (40% de ocupação em ambos os canais) [19].

Quando ambos os canais têm alta (70%) ocupação, conforme mostrado na figura 11, o STR novamente tem a escala de atraso de 95º percentil mais favorável com carga de tráfego, proporcionando reduções substanciais em comparação com SLO e NSTR [19].

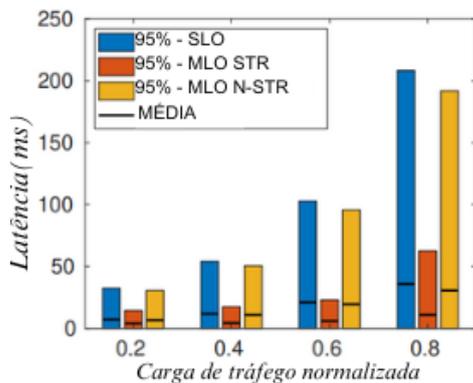


Fig. 11. CANAIS OCUPADOS SIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (70% de ocupação em ambos os canais) [19].

B. Canais Ocupados Assimetricamente

Aqui, dado as mesmas cargas de tráfego normalizadas da seção anterior, mas diferindo a ocupação do canal de nossas interfaces para que fiquem em faixas diferentes. Entre os dois canais, sempre é assumido que o primário é o menos ocupado. Observe que o caso oposto favorece ambos os modos MLO nesta comparação: SLO sempre incorreria em um atraso alto e ambos os modos MLO tirariam proveito de um canal secundário mais ocioso [19].

Na figura 12, mostra o caso de baixa (10%) ocupação do canal primário e média (40%) do canal secundário. Como esperado, o NSTR oferece atrasos deterministicamente menores do que o SLO, com os maiores benefícios ocorrendo sob cargas de tráfego mais altas.

No entanto, STR surpreendentemente incorre em uma média mais alta e atraso de 95º percentil do que SLO para a carga de tráfego mais baixa de 0,2. De fato, o STR inicia a contenção inicializando o contador de backoff assim que um canal é detectado como ocioso. Infelizmente, tal canal pode ser ocupado antes que o timer de backoff expire, pausando assim o seu contador. Se pausas ocorrerem com muita frequência (ou por longos intervalos), o pacote poderá incorrer em atrasos ainda maiores. Na figura 13 o efeito é bastante acentuado devido à ocupação ainda maior do canal secundário, pois selecionar um canal secundário ocioso incorre no risco deste último ser ocupado antes que o contador de backoff expire. Ao oposto do que pode ocorrer se o outro canal, inicialmente ocupado tiver sido selecionado [19].

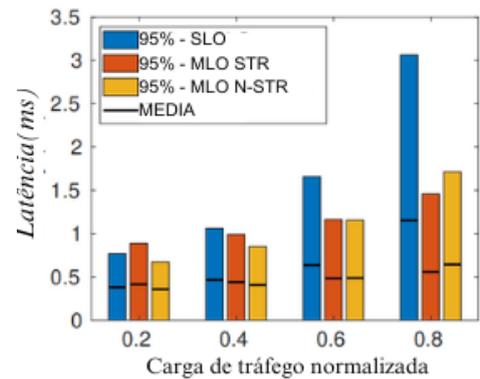


Fig. 12. CANAIS OCUPADOS ASSIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados não simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (Primário de 10% e secundário de 40%) [19].

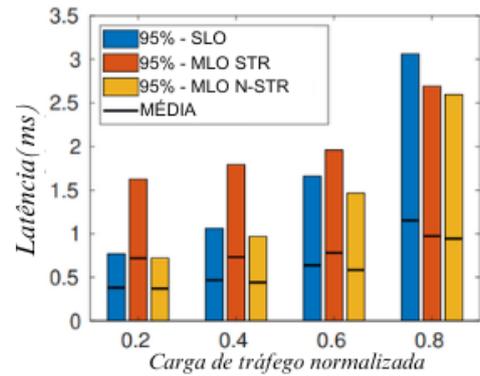


Fig. 13. CANAIS OCUPADOS ASSIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados não simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (Primário de 10% e secundário de 70%) [19].

Quando isso ocorre, o atraso do percentil 95 pode ser duas vezes maior do que com SLO, embora ainda limitado a menos de 10 ms. No entanto, os atrasos médios do STR e de 95º percentil crescem a uma taxa menor do que os do SLO à medida que a carga de tráfego aumenta. De fato, o STR ainda pode aproveitar um canal secundário (mesmo quando altamente ocupado) para reduzir o congestionamento e diminuir a latência quando ele é causado [19].

Finalmente, na figura 14, a seguir, considera o caso mais simétrico de ocupação do canal primário e secundário de 40% e 70%, respectivamente. Semelhante ao caso anterior das figuras 10 e 11, o STR escala bem com o aumento da carga de

tráfego, mantendo o atraso médio abaixo do SLO e diminuindo de 95º percentil até a sua metade.

Em comparação com a figura 13, a ocupação do canal principal cresceu levando a um aumento mais rápido no atraso do SLO em relação à carga de tráfego.

No entanto, o STR é capaz de alavancar ambos os links e, assim, atingir atrasos bem menores [19].

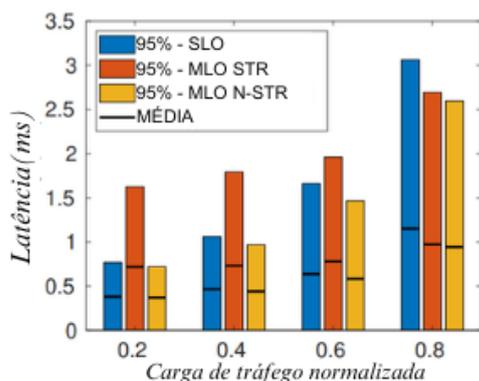


Fig. 14. CANAIS OCUPADOS ASSIMETRICAMENTE – Latência para canais ocupados não simetricamente vs. carga de tráfego variável normalizada (Primário de 40% e secundário de 70%) [19].

5) Considerações Finais

Quando ambas as ocupações de canal são simetricamente de média a alta carga, o NSTR falha em fornecer benefícios significativos de atraso de 95º percentil em comparação com o SLO. A principal razão é que o NSTR só é capaz de obter um benefício em comparação para SLO se ambos os canais estiverem simultaneamente desocupados, uma ocorrência cada vez mais improvável neste cenário. Felizmente, o STR produz benefícios significativos de latência de percentil 95 (em comparação com SLO e NSTR), mesmo no regime desafiador de aumento de ocupações e tráfego. Isso ocorre porque o STR pode utilizar qualquer um dos canais disponíveis e reduzir o tempo de espera dos pacotes, mesmo que não possa utilizar simultaneamente os dois canais disponíveis [19].

Se tratando de canais assimétricos, a ocupação do canal é um fator crucial a ser considerado ao selecionar um canal secundário no modo MLO. Para STR, especificamente, usar um canal secundário muito mais ocupado que o primário pode levar a atrasos ainda maiores do que usar SLO. Isso se deve ao fato de os pacotes serem atribuídos de forma não otimizada a uma interface antes de executar o backoff, com o último provavelmente sendo interrompido no canal mais ocupado. Este efeito é exacerbado quando a diferença entre as ocupações do canal aumenta.

Foi fornecido um estudo experimental de latência para IEEE 802.11be MLO. Usando o conjunto de dados da WACA (*Wakely ACA Database*) que contém medições de ocupação de canal do mundo real no espectro de 5 GHz, observa-se luz sobre o desempenho de latência de dois modos de acesso de canal MLO, a saber MLO-STR, onde duas interfaces de rádio são operadas independentemente e MLO-NSTR, onde uma interface atua como primária e a outra como secundária.

Dito isso, mostra-se que quando ambos os canais estão em média igualmente ocupados, ambos os modos MLO podem reduzir a latência do 95º percentil em quase uma ordem de magnitude, pois contam com uma segunda interface de rádio. Em contraste, em canais assimétricos ocupados, surpreendentemente descobrimos que o uso de MLO-STR é prejudicial e causa valores de latência ainda maiores do que SLO. Com isso, pode-se definir MLO-STR+ para mostrar que esse problema pode ser superado atrasando a atribuição do pacote até a expiração do backoff, que também atinge menor latência geral.

VII. Conclusão

Este artigo teve por objetivo apresentar o estado da arte referente a evolução do WiFi até a geração 7. O motivo que levou a realização desse trabalho foi apresentar a grande evolução do WiFi 7 na qual fornece as seguintes vantagens como maior eficiência espectral com o QAM-4096, latência menor, maior capacidade da rede decorrente das antenas MU-MIMO, que suportam até 16 fluxos simultâneos, aumentando, também a taxa de transferência.

Como o WiFi 7 ainda não existe comercialmente foi apresentado medições experimentais obtidas de pesquisas científicas já realizadas disponibilizadas pela universidade de Rice, localizada em Houston, no Estados Unidos, onde demonstra o estudo da latência para operação multilink.

Consequentemente, espera-se que este artigo possa fomentar e ajudar pesquisadores para o WiFi 7 e, assim, promover o desenvolvimento de futuras WLANs. Além disso, as universidades devem se manter alinhadas as inovações do ramo para que seja desenvolvido profissionais capacitados desta área.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bungart, José Wagner. *Redes de computadores: fundamentos e protocolos* / José Wagner Bungart – São Paulo: SENAI-SP Editora, 2017.
- [2] STEFANUTO, Iago Muriel; DOS SANTOS, José Aluizio Melquiades; TORRES, Claudines Taveira. *Evolução das Redes Sem Fio: Comparativo Entre WiFi e Bluetooth*. [S. l.], 2014. Acedido em: 9 maio 2023, em: <http://www.fatecbauru.edu.br/assets/upload/revista/645ba-226-721-2-pb.pdf>.
- [3] REIS, Gustavo Henrique da Rocha. *Redes Sem Fio. Redes de Computadores*, [s. l.], 2012. Acedido em: 8 abr. 2023., em: <https://pt.scribd.com/document/403241045/Redes-Sem-Fio-Ifmg>.
- [4] WIFI CERTIFIED n. [S. l.], 2008. Acedido em: 9 maio 2023, em: <https://www.WiFi.org/discover-WiFi/WiFi-certified-n>.
- [5] WIFI CERTIFIED 6: Advanced performance WiFi. [S. l.], dez 2021. Acedido em: 9 maio 2023, em: https://www.WiFi.org/download.php?file=/sites/default/files/private/WiFi_CERTIFIED_6_paper_20211223.pdf.
- [6] J. S. Sánchez-Mahecha, S. Céspedes and J. Bustos-Jiménez, "QoS Evaluation of the Future High-Efficiency IEEE 802.11ax WLAN Standard," 2018 IEEE Colombian

- Conference on Communications and Computing (COLCOM), Medellin, Colombia, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ColComCon.2018.8466723. Acedido em: 8 maio 2023.
- [7] LANDIM, Wikerson. WiFi 7: o que é, como funciona, quais as vantagens?. [S. l.], 7 mar. 2023. Acedido em: 8 maio 2023, em: <https://mundoconectado.com.br/artigos/v/32112/WiFi-7-o-que-e-como-funciona-vantagens>.
- [8] RODRIGUEZ, Adrian Garcia; PÉREZ, David López; GIORDANO, Lorenzo Galati; GERACI, Giovanni. IEEE 802.11be: WiFi 7 Strikes Back. MOBILE COMMUNICATIONS AND NETWORKS, IEEE Communications Magazine, p. 102-104, 1 abr. 2021. Ebook.
- [9] BRAGA, Newton C. Curso de Eletrônica - Volume 5 - Telecom - 1 - Radiocomunicações. [S. l.: s. n.], JAN 2017. E-book.
- [10] L. Hanzo, T. H. Liew, and B. L. Yeap, "Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications," CRC Press, 2010.
- [11] Adaptive Optical OFDM for Local and Access Networks - Scientific Figure on ResearchGate, em: https://www.researchgate.net/figure/Spectra-of-a-FDM-and-b-OFDM_fig12_307964144. Acedido em: 28 de maio de 2023.
- [12] WIFI 6 and OFDMA. [S. l.], 26 jun. 2019. em: <https://www.mpirical.com/blog/WiFi-6-and-ofdma>. Acedido em: 28 maio 2023.
- [13] C. Deng *et al.*, "IEEE 802.11be WiFi 7: New Challenges and Opportunities," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2136-2166, Fourthquarter 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.3012715.
- [14] MULTI-USER MIMO in WiFi 6. Arista Networks, Inc, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://www.arista.com/assets/data/pdf/Whitepapers/MU-MIMO-Whitepaper.pdf>. Acesso em: 16 maio 2023.
- [15] Vilela, Douglas Willer Ferrari Luz. Segurança em redes sem fio: estudo sobre o desenvolvimento de conjuntos de dados para comparação de IDS / Douglas Willer Ferrari Luz Vilela. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014 83 f. : il.
- [16] NETO, JOÃO ALVES DA SILVA. SEGURANÇA EM REDES WIRELESS IEEE 802.11 E SUAS VULNERABILIDADES. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel) - Universidade Católica de Goiás, [S. l.], 2021.
- [17] SANTOS, RAFAEL RAMON. Implementação de uma rede sem fio Mesh com autenticação centralizada utilizando um servidor RADIUS. 2012. Monografia de TCC (Curso de Tecnologia em Sistema para Internet). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012
- [18] O QUE é rede mesh e quais suas vantagens?. [S. l.], 26 out. 2020. Acesso em: 25 maio 2023, em: <https://blog.intelbras.com.br/o-que-e-rede-mesh-e-quais-suas-vantagens/>.
- [19] CARRASCOSA, Marc; GERACI, Giovanni; KNIGHTLY, Edward; BELLALTA, Boris. An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation. Dept. Information and Communication Technologies, Universitat Pompeu Fabra, Barcelona bDept. Electrical and Computer Engineering and Computer Science, Rice University, Houston, TX, [S. l.], p. 2507-2512, 11 ago. 2022.