



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

DIOGO MACHADO ZAMPAR

**WI-FI 6: ESTUDO DO PADRÃO E ANÁLISE DE
DESEMPENHO**

LONDRINA

2022

DIOGO MACHADO ZAMPAR

**WI-FI 6: ESTUDO DO PADRÃO E ANÁLISE DE
DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Elieser Botelho Manhas Júnior

LONDRINA

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Zampar, Diogo Machado.

Wi-Fi 6: Estudo do padrão e análise de desempenho / Diogo Machado Zampar. - Londrina, 2022.
77 f. : il.

Orientador: Elieser Botelho Manhas Júnior.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Graduação em Ciência da Computação, 2022.

Inclui bibliografia.

1. Wi-Fi 6 - TCC. 2. IEEE 802.11ax - TCC. 3. IEEE 802.11ac - TCC. 4. Simulação - TCC. I. Botelho Manhas Júnior, Elieser. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Graduação em Ciência da Computação. III. Título.

CDU 519

DIOGO MACHADO ZAMPAR

**WI-FI 6: ESTUDO DO PADRÃO E ANÁLISE DE
DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Elieser Botelho
Manhas Júnior
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Mario Lemes Proença Júnior
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Ms. Fábio Cezar Martins
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 1º de junho de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a minha família pelas oportunidades concedidas e pelo apoio ao longo do curso.

Agradeço à Universidade Estadual de Londrina e aos professores do Departamento de Computação, em especial ao Prof. Dr. Elieser, cujo direcionamento foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo, mas transformai-vos pela renovação da mente, a fim de distinguir qual é a vontade de Deus: o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2))*

ZAMPAR, D. M.. **WI-FI 6: ESTUDO DO PADRÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO**. 2022. 79f. Dissertação (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2022.

RESUMO

A emergência de cenários de redes densas levou o IEEE 802 a iniciar um *task group* responsável pela criação da próxima emenda Wi-Fi: o Wi-Fi 6, destinado a lidar com os problemas decorrentes destes cenários. A emenda 802.11ax, como foi chamada, de maio de 2014, foi proposta para ser a sucessora do 802.11ac. A implementação de novas funcionalidades como o OFDMA, BSS Coloring, Target Wake Time assim como o aprimoramento do MU-MIMO e da QAM possibilitaram a adaptação do novo padrão aos novos cenários de redes densas e ao mundo da Internet das Coisas. Resultados obtidos nos simuladores NS-3 e Komondor demonstram as vantagens do novo padrão tanto em cenários simples como em cenários de redes densas.

Palavras-chave: Wi-Fi 6. IEEE 802.11ax. IEEE 802.11ac. Simulação.

ZAMPAR, D. M.. **Wi-Fi 6: Simulation and Performance Analysis**. 2022. 79p. Graduation's Thesis (Bachelor of Science in Computer Science) – State University of Londrina, Londrina, 2022.

ABSTRACT

The emergence of dense networks scenarios led IEEE 802 to start a new task group aimed at creating a new Wi-Fi amendment: Wi-Fi 6, intended to deal with the problems emerged from such scenarios. The 802.11ax amendment, started in May 2014, was proposed to succeed 802.11ac. The implementation on new features such as OFDMA, BSS Coloring, Target Wake Time as well as the continued improvement of MU-MIMO and QAM led to a new standard much more adapted to a world of dense networks and Internet of Things. The results from NS-3 and Komondor simulations have shown the benefits of the new standard both in simple and dense network scenarios.

Keywords: Wi-Fi 6. IEEE 802.11ax. IEEE 802.11ac. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Paralelização de dados em OFDM	29
Figura 2 – Estrutura de um <i>frame</i> A-MSDU	33
Figura 3 – Estrutura de um <i>frame</i> A-MPDU	34
Figura 4 – Comparação entre OFDM e OFDMA	41
Figura 5 – Alocações possíveis de RUs em um canal de 40MHz	43
Figura 6 – Componentes de um Trigger Frame OFDMA	44
Figura 7 – Acesso simultâneo por MU-MIMO	47
Figura 8 – BSS Coloring	49
Figura 9 – Diagrama de constelação para 256-QAM e 1024-QAM	52
Figura 10 – Estrutura de um Frame 802.11ax	53
Figura 11 – Repetição de preâmbulos em um <i>frame</i> 802.11ax	53
Figura 12 – Taxa de dados comparada em canal de 20 MHz	60
Figura 13 – Taxa de dados comparada em canal de 40 MHz	62
Figura 14 – Taxa de dados comparada em canal de 80 MHz	64
Figura 15 – Taxa de dados comparada em canal de 160 MHz	66
Figura 16 – Configuração de simulação com 6 BSSs	68
Figura 17 – Configuração de um BSS	69
Figura 18 – Taxa de dados em cenário de 2 BSSs	70
Figura 19 – Taxa de dados em cenário de 4 BSSs	71
Figura 20 – Taxa de dados em cenário de 6 BSSs	72
Figura 21 – Taxa de dados total por cenário	73
Figura 22 – Taxa de dados média por BSS por cenário	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – MCS em 802.11a	30
Tabela 2 – MCS em 802.11b	31
Tabela 3 – MCS em 802.11g	32
Tabela 4 – MCS em 802.11n	35
Tabela 5 – Taxas de dados (em Mbps) por MCS	37
Tabela 6 – Número máximo de RUs por largura de canal	42
Tabela 7 – Taxas de transmissão (em Mbps) por MCS e tamanho de RU	43
Tabela 8 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ax por MCS e GI para um canal de 20 MHz	61
Tabela 9 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ac por MCS e GI para um canal de 20 MHz	61
Tabela 10 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ax por MCS e GI para um canal de 40 MHz	63
Tabela 11 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ac por MCS e GI para um canal de 40 MHz	63
Tabela 12 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ax por MCS e GI para um canal de 80 MHz	65
Tabela 13 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ac por MCS e GI para um canal de 80 MHz	65
Tabela 14 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ax por MCS e GI para um canal de 160 MHz	67
Tabela 15 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ac por MCS e GI para um canal de 160 MHz	67
Tabela 16 – Simulação de 2 BSSs em canal de 20 MHz com e sem uso de BSS Coloring	70
Tabela 17 – Simulação de 4 BSSs em de 20 MHz com e sem uso de BSS Coloring .	71
Tabela 18 – Simulação de 6 BSSs em canal de 20 MHz com e sem uso de BSS Coloring	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	<i>Access Point</i>
BACK	<i>Block Acknowledgement</i>
BSR	<i>Buffer Status Report</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CCK	<i>Complementary Code Keying</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i>
CW	<i>Contention Window</i>
DAB	<i>Digital Audio Broadcasting</i>
DCF	<i>Distributed Coordinated Function</i>
DIFS	<i>Distributed Inter-Frame Space</i>
DHSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
DL	<i>Downlink</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>
EHT	<i>Extremely High Throughput</i>
EIFS	<i>Extended Inter-Frame Space</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
HE	<i>High Efficiency</i>
HT	<i>High Throughput</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>

MAC	<i>Media Access Control</i>
MCM	<i>Multicarrier Modulation</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
MMF	<i>Multimode Fiber</i>
NOMA	<i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>
OBSS	<i>Overlapping Basic Service Set</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PBCC	<i>Packet Binary Convolutional Code</i>
PCF	<i>Point Coordination Function</i>
PIFS	<i>Point Coordinate Inter-Frame Space</i>
PPDU	<i>Physical Protocol Data Unit</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RA	<i>Random Access</i>
RTS/CLS	<i>Request to Send/Clear to Send</i>
SA	<i>Scheduled Access</i>
SDM	<i>Space Division Multiplexing</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
STA	<i>Station</i>
STBC	<i>Space-Time Block Codes</i>
STTC	<i>Space-Time Trellis Codes</i>
TB	<i>Trigger-Based</i>

TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TF	<i>Trigger Frame</i>
TWT	<i>Target Wake Time</i>
UL	<i>Uplink</i>
UORA	<i>Uplink OFDMA-based Random Access</i>
UWB	<i>Ultra Wideband</i>
V-BLAST	<i>Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time</i>
VHT	<i>Very High Throughput</i>
WECA	<i>Wireless Ethernet Compatibility Alliance</i>
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i>
WFA	<i>Wi-Fi Alliance</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	EVOLUÇÃO DO WI-FI	25
2.1	Projeto IEEE 802.11	25
2.1.1	Medium Access Control (MAC)	26
2.1.1.1	CSMA/CA	27
2.1.1.2	DCF	27
2.1.1.3	RTS/CLS	28
2.2	Wi-Fi 1: IEEE 802.11a	29
2.3	Wi-Fi 2: IEEE 802.11b	30
2.4	Wi-Fi 3: IEEE 802.11g	31
2.5	Wi-Fi 4: IEEE 802.11n	32
2.6	Wi-Fi 5: IEEE 802.11ac	34
3	WI-FI 6: IEEE 802.11AX	39
3.1	OFDMA	39
3.1.1	OFDM	39
3.1.2	OFDMA	40
3.1.2.1	Resource Units (RUs)	42
3.1.2.2	Trigger Frame (TF)	44
3.1.2.3	Buffer Status Report (BSR)	45
3.2	MIMO	45
3.2.1	<i>Uplink</i> MU-MIMO	47
3.2.2	<i>Downlink</i> MU-MIMO	48
3.3	Reutilização espacial	48
3.3.1	<i>BSS Coloring</i>	49
3.4	<i>Target Wake Time</i>	50
3.5	Modulação 1024-QAM	51
3.6	<i>Frames</i> PHY	52
3.7	Wi-Fi 6E	53
3.8	Perspectivas para o Wi-Fi 7	55
3.8.1	Inovações aprovadas	55
3.8.1.1	EHT PHY	55
3.8.1.2	Melhorias ao OFDMA	56
3.8.1.3	Operação <i>Multi-Link</i>	56
3.8.1.4	Otimização de <i>Channel Sounding</i>	56

3.8.1.5	Técnicas PHY para eficiência espectral	56
3.8.1.6	Cooperação Multi-AP	57
3.8.2	Inovações candidatas	57
3.8.2.1	4K-QAM	57
3.8.2.2	Canais de 320 MHz	57
3.8.2.3	MU-MIMO	57
3.8.2.4	Formato de <i>frames</i> PHY	58
4	SIMULAÇÕES DE REDE	59
4.1	Comparação de taxa de dados: Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6	59
4.1.1	Canal de 20 MHz	60
4.1.2	Canal de 40 MHz	62
4.1.3	Canal de 80 MHz	64
4.1.4	Canal de 160 MHz	66
4.1.5	Análise dos Resultados	67
4.2	Reutilização espacial	68
4.2.1	2 <i>Basic Service Sets</i>	70
4.2.2	4 <i>Basic Service Sets</i>	71
4.2.3	6 <i>Basic Service Sets</i>	72
4.2.4	Análise dos Resultados	73
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Desde sua introdução em 1997 como simples alternativa às redes cabeadas, as redes Wi-Fi vêm crescendo e se tornaram um padrão de adoção mundial, usadas em bilhões de dispositivos, com velocidades evoluindo dos 2 Mbps do padrão *legacy* de 1997 até os 14 Gbps possíveis com o Wi-Fi 6.

Em parte por estar na condição de competidora das redes cabeadas, os padrões anteriores das redes Wi-Fi focavam em aumento da taxa de dados de uma transmissão, por vezes deixando de lado funcionalidades alternativas que poderiam ser implementadas para satisfazer outras necessidades dos cenários para os quais foram desenvolvidas.

Colocando um fim ao paradigma do aumento do *throughput* acima de tudo, o Wi-Fi 6 traz diversas características e inovações que o adaptam aos cenários das redes atuais, cenários que podem envolver alta densidade de dispositivos e redes, assim como a introdução de dispositivos da Internet das Coisas com suas necessidades específicas.

O trabalho foi organizado da seguinte forma: no Capítulo 2, encontra-se a evolução histórica da Wi-Fi *Alliance* e uma descrição básica das diferenças e características de cada um dos padrões anteriores, do *legacy* inicial de 1997 até o Wi-Fi 5.

No Capítulo 3 são descritas as inovações e características específicas do Wi-Fi 6, assim como o funcionamento dos principais sistemas e protocolos implementados, como o OFDMA, BSS Coloring, Target Wake Time e MU-MIMO.

No Capítulo 4 são descritos os cenários criados em simulações, seus objetivos e os resultados obtidos, assim como uma análise dos mesmos.

No Capítulo 3.8 são apresentadas as inovações e mudanças esperadas para o padrão futuro em desenvolvimento, o Wi-Fi 7.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e possibilidades de trabalhos futuros.

2 EVOLUÇÃO DO WI-FI

Redes de dados sem fio foram criadas para competir com as já bem estabelecidas e difundidas redes cabeadas e redes celulares, podendo ser divididas nos seguintes tipos:

- WLANs: *Wireless Area Networks* são redes focadas em ambientes pequenos, como casas e escritórios, e geralmente possuem um raio de área de até 100m. Em geral, possuem velocidades maiores do que redes celulares e outros tipos de redes sem fio que abrangem áreas maiores. Por ser a categoria na qual as redes Wi-Fi se encaixam, será o foco do presente estudo.
- WMANs: *Wireless Metropolitan Area Network* são redes que podem cobrir áreas de cidades inteiras, como sugere o nome.
- WWANs: *Wireless Wide Area Network* são redes que podem cobrir áreas com um raio de até 50km, podendo ser maiores do que a área de cidades inteiras.

Uma rede WLAN 802.11 consiste de um grupo de dispositivos pertencentes a uma das duas seguintes categorias: ponto de acesso (do Inglês, *Access Point* - AP) e estações (do Inglês, *Stations* - STA). As estações de uma rede devem se conectar a um ponto de acesso central, que é então responsável por reencaminhar os pacotes de dados transmitidos pelas estações [1].

O modo de comunicação entre estações diferentes de uma mesma rede pode ocorrer de forma centralizada, em que os dados enviados de uma estação devem passar pelo ponto de acesso e então ser reencaminhado à outra estação; ou descentralizada, onde estações podem se comunicar de forma direta, sem a necessidade de um ponto de acesso central. Uma rede sem ponto de acesso é chamada de *ad hoc* [1].

2.1 Projeto IEEE 802.11

Com o surgimento das redes WLAN e o início do projeto 802 do IEEE, vários padrões com desenvolvimento focados no *Physical Layer* (PHY) e no *Medium Access Control* (MAC) foram considerados candidatos a representá-las. O primeiro deles, 802.3, talvez fosse considerado o mais promissor. No entanto, com o tempo, descobriu-se que o meio sem fio era muito diferente do meio das redes cabeadas, com atenuação mesmo a distâncias curtas, o que dificultava a detecção de colisões (competição de estações pela comunicação com o ponto de acesso, em um determinado instante). Como o *carrier sense multiple access with collision detection* (CSMA/CD), mecanismo de resolução de conflitos

utilizado no projeto 802.3, não foi suficiente para a resolução do problema, o projeto precisou ser abandonado [1].

Em seguida, o padrão 802.4 foi considerado, com seu sistema de barramento por *tokens* que aparentava ser superior ao sistema de detecção de contenção do 802.3, e deu início às redes WLAN, com o título de 802.4L. Em 1990, no entanto, a manipulação de *tokens* em redes de rádio começou a ser questionada. Um padrão de comunicação sem fio se tornou necessário, com seu próprio MAC, o que levou à aprovação do padrão 802.11 em 21 de março de 1991 [1].

O padrão 802.11, também intitulado simplesmente Wi-Fi (do Inglês, *Wireless Fidelity*), se tornou a principal e mais difundida rede WLAN do mundo, com mais de 22 bilhões de dispositivos conectados no ano de 2021[2].

O primeiro padrão 802.11, também chamado de IEEE 802.11-1997, foi publicado em 1997, com três soluções para a camada física: *frequency hopping* (FHSS) e *direct sequence spread spectrum* (DHSS) para a banda de 2.4Ghz, assim como um PHY infravermelho para 316–353 THz. Os três oferecem uma taxa de dados de 1Mb/s, assim como um modo adicional de 2Mb/s, mas implementações comerciais do PHY infravermelho não são oferecidas [3]. Com o tempo, o padrão inicial se tornou obsoleto, sendo substituído pelo padrão IEEE 802.11b.

Com a publicação do primeiro padrão, o *feedback* dos consumidores foi de que a compatibilidade dos produtos não estava em um nível satisfatório, com frequentes problemas no funcionamento do esquema de criptografia utilizado, o *Wired Equivalent Privacy* (WEP), quando usado com produtos de diferentes fabricantes. A necessidade de um programa de certificação levou à formação da *Wireless Ethernet Compatibility Alliance* (WECA), em 1999, cujo nome foi alterado para *Wi-Fi Alliance* (WFA) em 2003. O programa de certificação Wi-Fi se popularizou e teve grande impacto no mercado [3].

Além do sucesso da certificação Wi-Fi, as falhas percebidas e expectativas não atendidas relacionadas ao IEEE 802.11 forneceram a base para um programa de melhorias e extensões, dando origem a um grande número de emendas e revisões do padrão inicial de 1997 [3].

2.1.1 Medium Access Control (MAC)

A técnica fundamental do *medium access control* (MAC) do Wi-Fi é a *Distributed Coordinated Function* (DCF), na qual uma estação deve escanear a interface, verificando se está livre ou não. Caso esteja livre, pode transmitir ao ponto de acesso, caso não esteja livre (ou caso mais de uma estação esteja tentando se comunicar com o ponto de acesso no momento), ocorrerá conflito [1].

O 802.11 utiliza o *Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance* (CSMA/CA),

assim como o *Point Coordination Function* (PCF) como mecanismos para contornar colisões [1].

2.1.1.1 CSMA/CA

O CSMA/CA funciona em um esquema de "escutar antes de falar", no qual uma estação deve analisar o meio sem fio para determinar se outra estação não está transmitindo no momento. No sistema, quando uma estação recebe um pacote de dados, deve reconhecer o fato de ter recebido enviando um pacote de reconhecimento pouco tempo depois, geralmente referenciado pela sigla ACK (do Inglês, *acknowledgment*). Caso a estação que enviou o pacote não receba o pacote de reconhecimento, uma retransmissão do pacote perdido é agendada [4]. Outra possibilidade é que o pacote chegue corrompido à estação destino, o que a levará ao envio de um pacote de reconhecimento negativo (do Inglês, *negative acknowledgment* - NAK), requisitando o reenvio do pacote original [1].

2.1.1.2 DCF

O DCF (do inglês, *Distributed Coordinated Function*) do protocolo MAC do 802.11 é baseado no mecanismo CSMA/CA. Antes de enviar um pacote, a estação detecta um período de tempo mínimo, chamado de DIFS (do inglês, "Distributed Inter-Frame Space") para checar se uma outra transmissão está ocorrendo no meio físico. Após o DIFS, ao identificar o momento em que o meio se encontra livre, a estação continua analisando o meio de acordo com o CW (do inglês, "Contention Window"), verificando por quanto tempo continua livre. Caso o tempo em que o meio se encontre livre exceda o CW, a transmissão pode ser iniciada [5].

Caso uma transmissão iniciada após a espera de um CW específico falhe, ou seja, uma outra transmissão seja iniciada durante a transmissão original, o processo de contagem de tempo e comparação com o CW deve ser reiniciado, geralmente com um acréscimo no tempo do CW [6].

O uso de um CW de curta duração em um cenário com várias estações pode resultar em várias tentativas de transmissão simultâneas, resultando em conflitos e diminuindo o desempenho da rede. Por outro lado, um CW de longa duração também pode atrapalhar o desempenho de uma rede, principalmente em um cenário com poucas estações competindo pelo meio, no qual cada uma delas precisaria esperar um tempo maior para iniciar sua transmissão. De tal forma, a duração do CW é determinada de maneira dinâmica e cresce de forma exponencial, começando com um valor inicial (CWmin) de 31 *slots* (31 para o Wi-Fi 1 e 15 para os padrões seguintes), dobrando a cada colisão, podendo chegar a um valor máximo (CWmax) de 1023 *slots*. No Wi-Fi 1, cada *slot* representa um intervalo de tempo de 20 microssegundos, o que significa que a janela de contenção pode variar entre 620 e 20.460 microssegundos [6].

O uso do sistema descrito, chamado de sistema de *backoff* exponencial, é necessário para prevenir que uma única estação tentando transmitir grandes quantidades de dados ocupe de forma exclusiva o meio físico, impedindo todas as outras estações de realizarem suas transmissões. O algoritmo do esquema é executado em três casos distintos: anteriormente a uma retransmissão, após uma transmissão de sucesso e quando uma estação deseja iniciar uma transmissão mas detecta que o meio físico está ocupado [6].

A perda de *performance* resultante do uso do sistema de *backoff* exponencial varia de acordo com o tamanho de pacote utilizado e com a taxa de dados, mas costuma representar uma proporção de 30% nos primeiros padrões Wi-Fi [6].

Com o objetivo de possibilitar a administração de prioridades diferentes para *frames*, outros espaçamentos *inter-frame* além do DIFS são definidos para o mecanismo CSMA/CA [6], sendo eles:

- SIFS: O *Short Inter-Frame Spacing* é utilizado como forma de separar transmissões diferentes pertencentes a um mesmo diálogo e é o menos espaçamento entre *frames* disponível. A duração é fixa e dependente da camada física, sendo igual a 10 microsegundos no DSSS 802.11, por exemplo. O objetivo é garantir prioridade a uma estação específica, possibilitando até mesmo que mude do modo de transmissão para o modo de recepção e receber um pacote em sequência [6];
- PIFS: O *Point Coordinate Inter-Frame Space* é utilizado pelo AP para ganhar acesso ao meio antes de uma estação. Consiste no intervalo de tempo de um SIFS adicionado à duração de um *slot*.
- DIFS: O *Distributed Inter-Frame Space* é utilizado por uma estação que deseja iniciar uma nova transmissão. Consiste no intervalo de tempo de um PIFS adicionado à duração de um *slot*.
- EIFS: O *Extended Inter-Frame Space* é o espaçamento de maior duração, utilizado por uma estação que recebeu um pacote que não foi compreendido. É necessário para evitar que a estação, incapaz de determinar a duração sobre o CSMA/CA informada no pacote recebido, não cause conflitos com pacotes pertencentes ao diálogo atual.

2.1.1.3 RTS/CLS

Em alguns casos, quando duas estações tentem escanear o meio ao mesmo tempo, pode ocorrer que o CSMA/CA identifique que o meio sem fio esteja livre mesmo não estando, o que é chamado de *Hidden Node Problem*. Quando duas estações não conseguem se comunicar, o AP, opcionalmente, invoca o mecanismo *Request to Send/Clear to Send* (RTS/CLS), limitando a transmissão a uma única estação e evitando o conflito. Para cada transmissão, a estação fonte envia uma mensagem RTS, que é então respondida por uma

mensagem CTS enviada pela estação destino. Quando a estação fonte recebe a mensagem CTS, a transmissão pode ser iniciada. Em PCF, o uso de RTS/CLS diminui a taxa de transmissão da rede [4].

2.2 Wi-Fi 1: IEEE 802.11a

O primeiro projeto de extensão do IEEE 802.11-1997, o IEEE 802.11a, hoje chamado de Wi-Fi 1, teve início em 1997, mesmo ano da criação do padrão inicial, sendo lançado oficialmente em setembro de 1999. A emenda incluía a implementação na camada física da multiplexação por divisão de frequências ortogonais (do inglês, "*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*" (OFDM)), possibilitando taxas de dados de até 54Mb/s na frequência de 5 Ghz [3].

A frequência de 5 GHz foi aberta em muitos países em resposta ao número crescente de dispositivos (WLAN ou não) a utilizarem a frequência de 2,4GHz, funcionando no intervalo delimitado por 5,725 e 5,875 GHz, um total de 150 MHz de banda. Cada canal do Wi-Fi 1 utilizava 20 MHz de banda e utilizava um intervalo de guarda (do inglês, "*guard interval*") de 800 ns. As técnicas de modulação digital implementadas foram o BPSK, QPSK e a Modulação de Amplitude de Quadratura (do inglês, "*Quadrature Amplitude Modulation*" (QAM)) de ordem 16 (QAM-16) e 64 (QAM-64) [7].

O OFDM, resumidamente, é responsável por converter *streams* compostas por símbolos de dados seriais em dados paralelos, como demonstrado pela figura 1. Uma descrição mais detalhada do funcionamento do sistema OFDM, assim como de seu sucessor, o OFDMA, pode ser encontrada na seção 3.1.1.

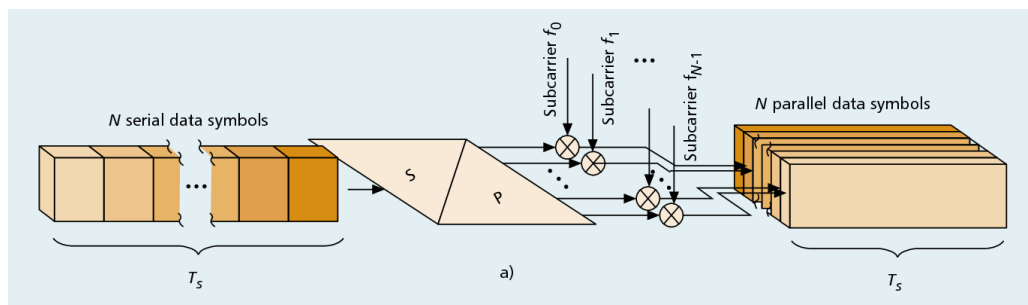


Figura 1 – Paralelização de dados em OFDM. Adaptado de: [8]

Como a Transformada Rápida de Fourier é utilizada, 64 tons são possíveis, mas 12 deles (6 de cada lado, ou seja, os de maior e menor frequência) são deixados como banda de guarda. Em sua implementação no Wi-Fi 1, o OFDM possui 52 tons de informação, sendo 48 responsáveis pela transmissão de dados ativos e 4 responsáveis pelo *overhead* de sinal. Como cada *carrier* ocupa um espaçamento de 312,5 KHz, a banda total ocupada

para transmissão de informação é de 16,25 MHz, deixando 1,875 MHz de banda de guarda de cada lado [7].

A combinação das técnicas de codificação e modulação utilizadas nas transmissões de um meio sem fio são chamadas de esquemas de modulação e codificação (do inglês, "*Modulation and Coding Schemes*"(MCS)). As características e taxas de dados nominais para cada um dos 8 MCS disponíveis para o Wi-Fi 1 estão descritos na tabela 1.

Tabela 1 – MCS em 802.11a. Adaptado de: [7]

MCS	Mod scheme	Coded bits per carrier	Coding rate	FFT size	Active data carriers	Subcarrier spacing (MHz)	Data period (microsec)	Data rate (Mbps)
0	BPSK	1	0.50	64	48	0.3125	3.20	6
1	BPSK	1	0.75	64	48	0.3125	3.20	9
2	QPSK	2	0.50	64	48	0.3125	3.20	12
3	QPSK	2	0.75	64	48	0.3125	3.20	18
4	16-QAM	4	0.50	64	48	0.3125	3.20	24
5	16-QAM	4	0.75	64	48	0.3125	3.20	36
6	64-QAM	6	0.67	64	48	0.3125	3.20	48
7	64-QAM	6	0.75	64	48	0.3125	3.20	54

A emenda utilizava a tecnologia Single "*Single Input Single Output*"(SISO), possibilitando distâncias máximas internas e externas de 35 e 125m, respectivamente. Como em alguns países a frequência de 5Ghz ainda não estava regulamentada, um modo de funcionamento na frequência de 3,7Ghz também era oferecido [9].

Como a produção de equipamentos para o Wi-Fi 1 era mais complexa do que para o Wi-Fi 2 (devido a fatores como a implementação do OFDM e da utilização da frequência de 5 GHz, por exemplo), sua popularidade não foi tão grande e produtos comerciais só chegaram ao mercado em 2001 [7]. Paralelamente, os dispositivos do Wi-Fi 1, funcionando nas bandas de 5Ghz e 3,7Ghz, não possibilitavam a interoperação com dispositivos Wi-Fi 2, o que deu origem à necessidade da criação de uma nova emenda, o IEEE 802.11g.

2.3 Wi-Fi 2: IEEE 802.11b

O projeto IEEE 802.11b, também intitulado de emenda *high rate* e futuramente de Wi-Fi 2, teve início em dezembro de 1997 e tinha como objetivo aumentar a taxa de dados da camada física DSSS para 11 Mbps. Foi lançado oficialmente em setembro de 1999 e, com o abandono do padrão inicial (IEEE 802.11-1997), se tornou seu sucessor natural. Além da taxa de dados de 11Mb/s, também oferecia taxas de 5,5 Mbps, 2 Mbps e 1 Mbps na banda de 2.4 GHz. As distâncias internas e externas máximas suportadas pelo padrão eram de, respectivamente, 35 e 140m [9].

Para garantir compatibilidade com os dispositivos do projeto inicial 802.11-1997, a codificação DSSS continuou a ser utilizada, enquanto o FHSS pôde ser abandonado. Como o DSSS foi selecionado como única técnica da camada física, o Wi-Fi 2 possibilitava

interoperação com os sistemas DSSS de 1 e 2 Mbps do padrão legado, mas não para os sistemas FHSS das mesmas taxas de dados [6].

O aumento no *throughput* foi possível graças à implementação do *Complementary Code Keying* (CCK), responsável pela codificação de dados, que eram formatados em uma sequência de 8 *chips*, utilizando um número igual a 4 ou 8 bits, respectivamente referentes às taxas de dados de 5,5 Mbps e 11 Mbps [7].

Para garantir suporte a distâncias maiores ou a meios com altos níveis de ruído, o padrão possibilitava *dynamic rate shifting*, ou seja, permitia o ajuste das taxas de dados de acordo com as condições variáveis do meio sem fio. Idealmente, todo dispositivo usaria a taxa de 11 Mbps mas, caso se afaste além da distância máxima de operação de tal taxa de dados, as outras taxas de 5,5, 2 e 1 Mbps poderiam ser utilizadas. Da mesma forma, quando um dispositivo utilizando uma das taxas de dados menores se aproxima do AP, a taxa de 11 Mbps pode voltar a ser utilizada [6].

As características e taxas de dados nominais para cada um dos 6 MCS disponíveis para o Wi-Fi 2 estão descritos na tabela 2.

Tabela 2 – MCS em 802.11b. Adaptado de: [7]

MCS	Mod Scheme	Chip rate	Chips per symbol	Symbol rate	Bits per symbol	Code rate	Data rate (Mbps)
0	DBPSK, DSSS	11	11	1	1	–	1
1	DQPSK, DSSS	11	11	1	2	–	2
2	CCK, DQPSK	11	8	1.375	4	–	5.5
3	CCK, DQPSK	11	8	1.375	8	–	11
4	PBCC, BPSK	–	–	11	1	1/2	5.5
5	PBCC, QPSK	–	–	11	2	1/2	11

2.4 Wi-Fi 3: IEEE 802.11g

O padrão IEEE 802.11g, hoje chamado de Wi-Fi 3, trouxe os benefícios do OFDM, introduzidos no Wi-Fi 1 somente para a banda de 5GHz, também agora para a frequência de 2,4GHz, utilizando uma largura de banda de 20Mhz. Como sua camada física é compatível com a modulação DSSS, utilizada no Wi-Fi 1, a migração de dispositivos entre as versões 1 e 3 dos padrões foi facilitada. Com seu PBCC (do inglês, "*Packet Binary Convolutional Code*") patentado, também foi possível oferecer suporte às taxas de dados de 22 Mb/s e 33Mb/s, além da taxa de 54 Mb/s já oferecida pelo Wi-Fi 1 [3]. Apesar de também utilizar o OFDM, para se comunicar com dispositivos Wi-Fi 1, o novo padrão fazia uso do DSSS [9].

As características e taxas de dados nominais para cada um dos 16 MCS disponíveis para o Wi-Fi 3 estão descritos na tabela 3.

Tabela 3 – MCS em 802.11g. Adaptado de: [7]

MCS	Mod scheme	Chip rate (MHz)	Chips per symbol	Symbol rate (MHz)	Bits per symbol	Code rate	Active carriers	Data rate (Mbps)
0	DBPSK, DSSS	11	11	1	1	–	–	1
1	DQPSK, DSSS	11	11	1	2	–	–	2
2	CCK, DQPSK	11	8	1.375	4	–	–	5.5
3	CCK, DQPSK	11	8	1.375	8	–	–	11
4	PBCC, BPSK	–	–	11	1	1/2	–	5.5
5	PBCC, QPSK	–	–	11	2	1/2	–	11
6	PBCC, 8PSK	–	–	11	3	2/3	–	22
7	PBCC, 8PSK	–	–	16.5	3	2/3	–	33
8	OFDM, BPSK	–	–	0.25	1	1/2	48	6
9	OFDM, BPSK	–	–	0.25	1	3/4	48	9
10	OFDM, QPSK	–	–	0.25	2	1/2	48	12
11	OFDM, QPSK	–	–	0.25	2	3/4	48	18
12	OFDM, 16-QAM	–	–	0.25	4	1/2	48	24
13	OFDM, 16-QAM	–	–	0.25	4	3/4	48	36
14	OFDM, 64-QAM	–	–	0.25	6	2/3	48	48
15	OFDM, 64-QAM	–	–	0.25	6	3/4	48	54

2.5 Wi-Fi 4: IEEE 802.11n

O padrão IEEE 802.11n, hoje chamado de Wi-Fi 4, foi o primeiro a adotar a tecnologia *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), utilizando até 4 antenas diferentes no mesmo ponto de acesso e possibilitando a multiplexação espacial e formação de *beams*. Proporcionava uma experiência comparável ao famoso Fast Ethernet (802.3u), mas sua taxa de dados máxima ultrapassava em muito os 100Mb/s oferecidos pelo concorrente, chegando a um máximo teórico de 600Mb/s [3].

A reutilização de sistemas e técnicas como o QAM, FEC e OFDM ocorreu não por ser a melhor opção em termos de desempenho ou por representar uma tecnologia mais recente, mas como forma de aumentar a compatibilidade com padrões anteriores e de diminuir os custos de produção [6].

Sua inovação mais questionada foi o uso da largura de banda de 40Mhz na frequência de 2,4GHz, apesar de ser uma possibilidade de extensão já existente para o Wi-Fi 1 e 3. A preocupação era de que a largura de banda de 40MHz pudesse prejudicar severamente a performance de redes Wi-Fi anteriores já existentes, assim como de redes Bluetooth (802.15.1), ZigBee (802.15.4) e de outros dispositivos utilizando a frequência de 2,4GHz e funcionando com largura de banda de 20MHz. Tais questionamentos atrasaram a ratificação do padrão, sendo realizado somente em setembro de 2009, e somente para dispositivos que conseguissem detectar dispositivos vizinhos utilizando a largura de banda de 20MHz [3].

Diferentemente do Wi-Fi 1 e 3, a implementação do OFDM no Wi-Fi 4 possui 52 tons de informação ativa em canais de 20 MHz, um pequeno acréscimo comparado aos 48 tons dos padrões anteriores. Para canais com largura de banda de 40 MHz, 108

tons de informação ativa são utilizados, o que deu origem à necessidade de utilização da Transformada Rápida de Fourier agora com 128 pontos. Além das alterações nas configurações relacionadas à largura de banda dos canais, também foi criada a possibilidade de uso de um intervalo de guarda menor (chamado de *short guard interval*), de 400 ns, o que equivale a metade do intervalo de guarda utilizado nos dois padrões anteriores [7]. Apesar da nova adição, a duração padrão para o intervalo de guarda continua a ser de 800 ns [10].

O desenvolvimento da emenda foi baseada na tecnologia MIMO, geralmente referenciada pelo uso do termo "MIMO NxM", no qual "N" indica o número de transmissores e "M" o número de receptores utilizados em um mesmo dispositivo. Basicamente, a tecnologia faz uso de uma técnica chamada multiplexação espacial, que possibilita a transmissão de dados em duas ou mais *streams* paralelas em um canal de mesma frequência. Uma explicação mais detalhada da tecnologia MIMO pode ser encontrada na seção 3.2. A emenda obrigava dispositivos Wi-Fi 4 a darem suporte ao, no mínimo, 2x2 MIMO, ou seja, a possuírem 2 receptores e 2 transmissores capazes de trabalhar com *streams* paralelas, deixando o suporte ao 3x3 MIMO e ao 4x4 MIMO como opcionais aos fabricantes [10].

Adicionalmente, o 802.11n utiliza dois mecanismos novos de agregação de *frames*: A-MSDU e A-MPDU, responsáveis pela diminuição do *overhead* dos pacotes. O A-MSDU, mais eficiente dentre os dois, é baseado na ideia de combinar diversos *frames* PHY e MAC em um único *frame* cujo tamanho seria relativamente menor do que o tamanho combinado dos *headers* dos *frames* originais. Com a integração do A-MSDU, os *frames* PHY puderam ser estendidos de 2,3 KB para 64 KB, assim como os *frames* MAC, que tiveram seu tamanho máximo de 2,3 KB alterados para 8 KB graças à integração do A-MPDU. As estruturas dos *frames* A-MSDU e A-MPDU estão ilustradas, respectivamente, nas figuras 2 e 3.

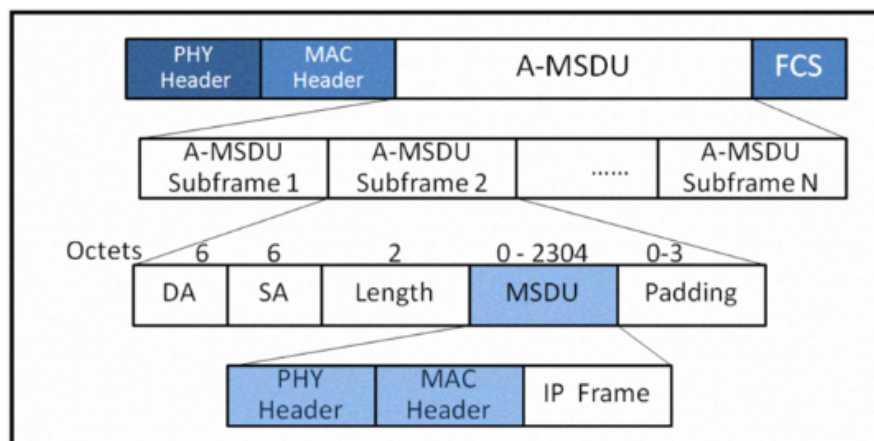


Figura 2 – Estrutura de um *frame* A-MSDU. Adaptado de: [10]

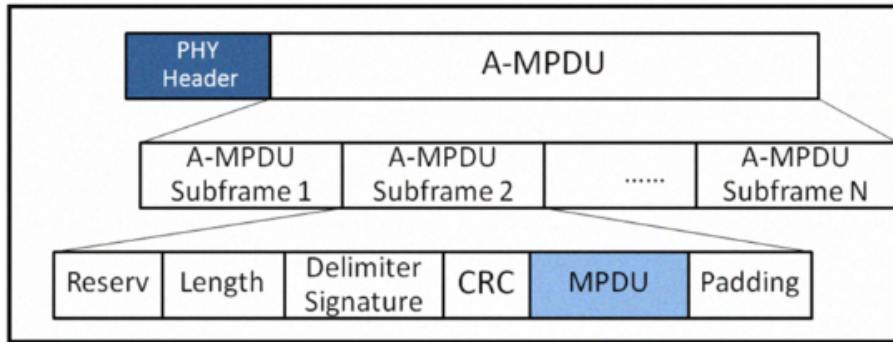


Figura 3 – Estrutura de um *frame* A-MPDU. Adaptado de: [10]

Nas versões anteriores do Wi-Fi, para todo recebimento de pacote, um *acknowledgement frame* deveria ser enviado como confirmação de recebimento. Tal mecanismo podia ser tão ineficiente na camada MAC que, em alguns casos, o *throughput* real chegava a ser equivalente a metade do valor esperado quando estimado analisando somente a camada PHY. A fim de atenuar tal ineficiência, o Wi-Fi 4 permite que dispositivos reconheçam o recebimento de vários pacotes simultaneamente pelo envio de um único pacote: o *Block Acknowledgement*, compondo vários ACKs em um único *frame*. Ao receber o *Block Acknowledgement*, o transmissor pode fazer o reenvio apenas dos *frames* cujo recebimento não foi confirmado [10].

Como consequência da operação em 20 e 40 MHz, assim como das diversas configurações diferentes possíveis de antenas, o Wi-Fi 4 gerava um total de 76 esquemas de modulações diferentes possíveis. Como muitos deles possuíam taxas de dados semelhantes, o programa de certificação da WFA foi determinante em escolher quais MCS chegariam ao mercado [3]. A tabela 4 ilustra as variações possíveis para um único canal de acordo com o MCS e o *guard interval*, assim como a taxa de dados nominal associada.

As taxas de dados nominais representadas em cada uma das configurações da tabela 4 podem ser multiplicadas por 2, 3 ou até 4 vezes, a depender da quantidade de *streams* espaciais utilizadas. Ou seja, com 4 *streams* utilizando o esquema MCS 7, duração de 400ns para o GI e 40MHz de banda, a taxa de dados de 600 Mbps pode ser atingida. Inicialmente, a grande maioria dos produtos comerciais Wi-Fi 4 não eram capazes de atingir tal taxa de dados, pois não eram capazes de transmitir todas as 4 *streams* simultaneamente [7].

2.6 Wi-Fi 5: IEEE 802.11ac

O padrão IEEE 802.11ac, hoje chamado de Wi-Fi 5, foi lançado em janeiro de 2014 com o foco de oferecer altas taxas de dados, motivo pelo qual o projeto também era chamado de *Very High Throughput* (VHT), e buscava suprir a demanda de serviços

Tabela 4 – MCS em 802.11n. Adaptado de: [7]

B (MHz)	FFT Size	NAC	Guard Interval time (microsecs)	Symbol time (microsecs)	MCS Index	Mod Scheme	Nbps	R	Data rate (Mbps)
20	64	52	0.8	4	0	BPSK	1	1/2	6.5
20	64	52	0.8	4	1	QPSK	2	1/2	13
20	64	52	0.8	4	2	QPSK	2	3/4	19.5
20	64	52	0.8	4	3	16-QAM	4	1/2	26
20	64	52	0.8	4	4	16-QAM	4	3/4	39
20	64	52	0.8	4	5	64-QAM	6	2/3	52
20	64	52	0.8	4	6	64-QAM	6	3/4	58.5
20	64	52	0.8	4	7	64-QAM	6	5/6	65
20	64	52	0.4	3.6	0	BPSK	1	1/2	7.2
20	64	52	0.4	3.6	1	QPSK	2	1/2	14.4
20	64	52	0.4	3.6	2	QPSK	2	3/4	21.7
20	64	52	0.4	3.6	3	16-QAM	4	1/2	28.9
20	64	52	0.4	3.6	4	16-QAM	4	3/4	43.3
20	64	52	0.4	3.6	5	64-QAM	6	2/3	57.8
20	64	52	0.4	3.6	6	64-QAM	6	3/4	65
20	64	52	0.4	3.6	7	64-QAM	6	5/6	72.2
40	128	108	0.8	4	0	BPSK	1	1/2	13.5
40	128	108	0.8	4	1	QPSK	2	1/2	27
40	128	108	0.8	4	2	QPSK	2	3/4	40.5
40	128	108	0.8	4	3	16-QAM	4	1/2	54
40	128	108	0.8	4	4	16-QAM	4	3/4	81
40	128	108	0.8	4	5	64-QAM	6	2/3	108
40	128	108	0.8	4	6	64-QAM	6	3/4	121.5
40	128	108	0.8	4	7	64-QAM	6	5/6	135
40	128	108	0.4	3.6	0	BPSK	1	1/2	15
40	128	108	0.4	3.6	1	QPSK	2	1/2	30
40	128	108	0.4	3.6	2	QPSK	2	3/4	45
40	128	108	0.4	3.6	3	16-QAM	4	1/2	60
40	128	108	0.4	3.6	4	16-QAM	4	3/4	90
40	128	108	0.4	3.6	5	64-QAM	6	2/3	120
40	128	108	0.4	3.6	6	64-QAM	6	3/4	135
40	128	108	0.4	3.6	7	64-QAM	6	5/6	150

como a televisão, *streaming* e interfaces multimídia de alta definição. Foi considerado uma expansão lateral do Wi-Fi 4, mantendo e ampliando o uso do MIMO [11].

Devido ao fato do foco de desenvolvimento ser a melhoria nas taxas de dados, assim como as vantagens por possuir um nível de interferência de sinal menor e um maior número de canais cujas frequências não se sobrepõem (24 na frequência de 5 GHz, contra apenas 3 em 2,4GHz), a frequência de 5 GHz foi escolhida, deixando de lado o suporte à frequência tradicional de 2,4 GHz da maioria dos padrões anteriores [12].

O novo padrão manteve o uso de canais de largura de banda de 20 MHz e 40 MHz para canais e deu início ao suporte das bandas de 80 MHz (de forma obrigatória) e de 160 MHz (de forma opcional). Os canais de 80 e de 40 MHz são compostos, respectivamente, por canais de 40 e de 20 MHz. O suporte aos canais de 160 MHz compostos por dois canais de 80 MHz (chamados de canais "80 + 80") também era uma funcionalidade con-

siderada opcional para o padrão [12]. Para se adaptar às duas novas larguras de banda, a Transformada Rápida de Fourier também poderia ser calculada utilizando 256 ou 512 pontos, e não apenas 64 ou 128 pontos, como no Wi-Fi 4 [13].

A continuação do desenvolvimento do MIMO foi um dos métodos para o aumento das taxas de dados do Wi-Fi 5, possibilitando o uso de até 8 *streams* de dados simultâneas, em comparação a apenas 4 *streams* máximas suportadas pelo Wi-Fi 4, primeiro padrão a implementar a técnica [12]. Ao contrário dos padrões anteriores, o Wi-Fi 5 foi o primeiro a prometer aumentos de taxas de dados não só para *links* únicos, mas também para a rede como um todo [14].

Além de ser capaz de transmitir diversas *streams* diferentes ao mesmo dispositivo, técnica conhecida como *single-user* MIMO (SU-MIMO) e que era utilizada pelo padrão anterior, o Wi-Fi 5 introduziu o *multiple-user* MIMO (MU-MIMO) para cenários de *downlink*, pelo qual também seria possível transmitir diversas *streams* simultaneamente e a estações diferentes. Até 4 estações diferentes podem ser destinatários de até 4 *streams* de dados, desde que o número total de *streams* transmitidas não exceda o máximo de 8 [12].

Em padrões anteriores, a implementação das técnicas de *beamforming* (ou seja, da criação de *streams* espaciais direcionadas a um usuário específico a fim de melhorar a qualidade e alcance do sinal) não era obrigatória ou detalhada pelo padrão, o que levou a diversos problemas de interoperação em dispositivos de fabricantes diferentes utilizando o MIMO. Já no Wi-Fi 5, um protocolo único de controle de *feedback* é proposto, possibilitando a utilização da técnica de *beamforming* em SU-MIMO e também em MU-MIMO [14].

Quanto ao esquemas de modulação e codificação no Wi-Fi 5, são utilizados o BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM, sendo o último uma novidade do padrão. A correção de erros pelo *Forward Error Correction* (FEC) utiliza as taxas de 1/2, 2/3, 3/4 e 5/6 [12]. O padrão também manteve o uso do PBCC, os MCSs de 0 a 7 (assim como adicionou os MCSs 8 e 9) e o intervalo de guarda padrão de 800 ns. As configurações possíveis e suas taxas de dados nominais respectivas para o GI padrão estão listadas na tabela 5.

Tabela 5 – Taxas de dados (em Mbps) por MCS. Adaptado de: [12]

Modulation	Code Rate	20 MHz channel	40 MHz channel	80 MHz channel	160 MHz channel	Spatial streams	Standard
BPSK	1/2	6.5	13.5	—	—	1	802.11n
QPSK	3/4	19.5	40.5	—	—	1	802.11n
16-QAM	3/4	26	81	—	—	1	802.11n
64-QAM	5/6	65	135	—	—	1	802.11n
64-QAM	5/6	260	540	—	—	4	802.11n
BPSK	1/2	6.5	13.5	29.3	58.5	1	802.11ac
QPSK	3/4	19.5	40.5	87.8	175.5	1	802.11ac
16-QAM	3/4	39	81	175.5	351	1	802.11ac
64-QAM	5/6	65	135	292.5	585	1	802.11ac
256-QAM	5/6	78	180	390	780	1	802.11ac
256-QAM	5/6	312	720	1560	3120	4	802.11ac
256-QAM	5/6	624	1440	3120	6240	8	802.11ac

3 WI-FI 6: IEEE 802.11AX

O principal motivador do desenvolvimento do Wi-Fi 6, também chamado de *High Efficiency* (HE) ou 802.11ax, foi o reconhecimento de que houve um aumento da demanda atual do uso de dispositivos WLAN em locais como estádios, apartamentos, *shopping centers*, aeroportos e escritórios corporativos, por exemplo, nos quais a densidade de dispositivos é altíssima e cuja cobertura satisfatória exige o uso de um grande número de APs. Em tais cenários, devido à alta concentração de redes em um espaço físico, surge a necessidade de operação em canais com sobreposição (parcial ou integral) de frequências, criando problemas de interferência. Assim, a métrica fundamental para julgamento do desempenho deixa de ser o *throughput* total esperado de uma rede e passa a ser a média esperada de uma área envolvendo várias redes diferentes [15].

A diminuição da assimetria nos padrões de tráfego na rede, ou seja, o aumento dos cenários de *upload* realizados por estações proporcionalmente ao aumento de *download*, foi causada por fatores como a emergência das redes sociais, gerando conteúdo multimídia, e de aplicativos utilizando armazenamento em nuvem, frequentemente se comunicando com seus servidores. Como o custo para acesso ao canal é fixo, o aumento da necessidade de transmissão de pacotes pequenos aumentou significativamente a proporção de tempo perdido por conta de *overhead* em um canal [15].

Por conta dos desafios citados acima, assim como outros tais como a preocupação com o consumo de energia para dispositivos operando por baterias motivada pelos avanços e adoção das aplicações da Internet das Coisas, foi formado em maio de 2013 *HEW Study Group*, que foi em seguida convertido para *Task Group AX* (TGax). A primeira proposta para o *draft* 1.0 do projeto 802.11ax foi lançada em 1º de dezembro de 2016 e a segunda no ano seguinte [15].

3.1 OFDMA

3.1.1 OFDM

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é um tipo de modulação multiportadora (do Inglês, *multicarrier modulation* - MCM), que consiste em transmitir dados dividindo o fluxo em tons, que também são chamados de portadoras (do inglês, "*carriers*") ou então de subportadoras (do inglês, "*subcarriers*") [16]. Apesar de já existir na década de 50 e começo da década de 60 em *links* de rádios militares de alta frequência, o conceito foi oficialmente introduzido por R. W. Chang em um trabalho publicado no meio da década de 60 [17].

O método de transmissão desenvolvido por Chang é capaz de transmitir mensagens simultaneamente por um canal linear limitado por bandas sem interferência intercanal (do Inglês, *interchannel interference* - ICI) e interferência intersimbólica (do Inglês, *intersymbol interference* - ISI), desde que os tons fossem ortogonais, ao contrário dos sistemas MCM anteriores [16].

Inicialmente, a modularização dos dados transmitidos em OFDM era realizada pela Transformada Discreta de Fourier, como idealizado por Weinstein e Ebert [18], mas hoje a Transformada Rápida de Fourier é mais utilizada devido à sua maior eficiência. Ainda assim, a necessidade da utilização das transformações e a complexidade introduzida pela execução das mesmas em tempo real é um dos aspectos mais criticados do sistema OFDM.

A principal ineficiência do OFDM, inicialmente, era o problema com seu ICI característico, mas a falha foi corrigida por Peled e Ruiz em 1980, implementando o uso de um *cyclic prefix* (CP) que consistia em um intervalo de guarda criado pela extensão do símbolo OFDM, em vez de utilizar um intervalo de guarda vazio, como era o padrão anteriormente [19].

O CP consiste em uma cópia da última parte do símbolo OFDM, ou seja, é uma informação redundante, com o único propósito de combater a interferência ISI e ICI. O uso da extensão do símbolo OFDM como intervalo de guarda diminui a energia do sinal proporcionalmente ao comprimento da extensão (quanto maior a extensão, menor a energia do sinal), mas os benefícios de diminuição de interferência são, em geral, maiores que a diminuição da energia do sinal [16]. Assim, o tamanho do CP é geralmente limitado em até 25% do tamanho do símbolo [20].

O sistema OFDM é utilizado, hoje, em diversos padrões capazes de altas taxas de transmissão de dados, tais como o *Digital Audio Broadcasting* (DAB) e *Digital Video Broadcasting - Terrestrial* (DVB-T) na Europa. No padrão Wi-Fi, o OFDM começou a ser utilizado a partir da versão IEEE 802.11a, de setembro de 1999. No caso do DAB, o OFDM já foi adotado como padrão europeu em 1995.

3.1.2 OFDMA

No sistema OFDM, todas os K tons são reservados a um único usuário ao mesmo tempo, bloqueando outros usuários no mesmo intervalo de tempo. Enquanto o OFDM trabalha com a divisão de blocos por usuário (divisão por tempo), o OFDMA (do Inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Multiple Access*) define grupos diferentes de tons a usuários diferentes (divisão por frequência). Dessa forma, o novo método é capaz de permitir que mais de um usuário possa acessar a interface ao mesmo tempo, sem esperar por sua faixa de tempo reservada, como ilustrado pela figura 4, na qual cada cor representa uma estação diferente [21].

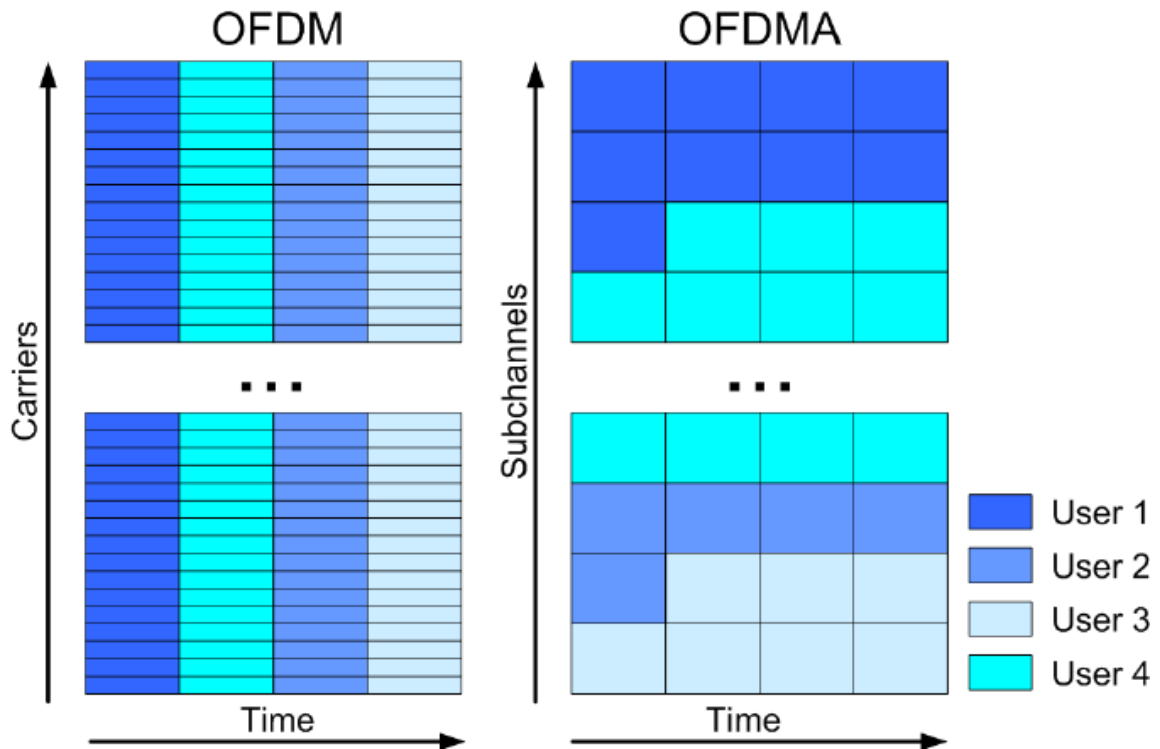


Figura 4 – Comparação entre OFDM e OFDMA. Fonte: [22]

A divisão de tons por usuário pode ser feita de duas maneiras, em geral: pseudo-aleatória ou contígua. Na forma contígua, tons designados a um usuário específico serão sempre vizinhos em um conjunto, enquanto na forma pseudo-aleatória, como o nome sugere, não existe lógica a ser obedecida na designação [21].

Além de possuir a baixa complexidade de modulação e melhor eficiência espectral característicos do OFDM, o OFDMA pode fazer uso da diversidade de frequência, gerada pela distribuição de tons por usuários, assim como da diversidade multiusuário, possibilitando designar um número maior ou menor de tons, ou que estejam em melhores condições, a um usuário cujo *link* não esteja satisfatório [21].

Com a divisão de tons por frequência, o problema de ICI se torna ainda mais importante, já que qualquer alteração na frequência de um tom poderia acabar com a ortogonalidade com os tons vizinhos [23].

Ao contrário dos sistemas competidores TDMA (do inglês, "*Time Division Multiple Access*") e CDMA (do inglês, "*Code Division Multiple Access*"), o OFDMA tem a vantagem de escalabilidade por possuir uma estrutura que pode ser implementada ajustando o comprimento da Transformada de Fourier (FFT) à banda do canal e fixando o espaçamento de frequências dos tons a 10,94kHz. Tal característica possibilita que, com o ajuste da duração de símbolo e espaçamento dos tons, a unidade básica de recurso físico se mantenha fixa, minimizando o impacto causado às camadas superiores da rede [23].

A escalabilidade do sistema gera maior flexibilidade de implantação: com poucas alterações na interface aérea, o OFDMA pode ser utilizado em várias bandas de frequência diferentes, a depender das necessidades dos usuários da rede e de sua alocação de espectro [23].

3.1.2.1 Resource Units (RUs)

Como parte de seu funcionamento básico, o OFDMA divide uma transmissão em vários subcanais, também chamados de *Resource Units* (RUs). Os RUs de um canal, cujos tamanhos podem ser diferentes, são distribuídos a usuários diferentes de acordo com a necessidade de taxa de dados, possibilitando o acesso simultâneo ao canal de forma eficiente. Especificamente para o Wi-Fi 6, que é o primeiro padrão WiFi a implementar o OFDMA, os canais de 20, 40, 80 e 160 MHz podem ser divididos em até 9, 18, 37 e 74 RUs, respectivamente [24].

Tabela 6 – Número máximo de RUs por largura de canal. Adaptado de: [25]

RU	20 MHz (242 tons)	40 MHz (484 tons)	80 MHz (996 tons)	160 MHz (1 992 tons)
26 tons	9	18	37	74
52 tons	4	8	16	32
106 tons	2	4	8	16
242 tons	1	2	4	8
484 tons	–	1	2	4
996 tons	–	–	1	2
2×996 tons	–	–	–	1

Além da divisão do canal em RUs, cada RU também é, por sua vez, composto por partes menores: os tons. Um RU pode ser dividido em dois RUs menores, de aproximadamente metade do tamanho do RU original. Tal divisão pode ser feita de forma independente de outros RUs, ou seja, um canal pode ser composto por um RU de tamanho original, como foi definido inicialmente, e de RUs resultantes da divisão de um dos RUs originais [25]. A divisão do maior número possível de RUs de um mesmo tamanho para cada largura de canal pode ser vista na Tabela 6.

A definição do conjunto de RUs de um canal depende de sua largura, sendo que um canal com frequência de 40MHz corresponde a um único RU de 484 tons, enquanto um canal de 160MHz comporta dois RUs de 996 tons. Independente de seu tamanho, cada RU só pode ser atribuído a uma única estação [26]. Algumas distribuições possíveis de RUs são ilustradas na Figura 5, a seguir.

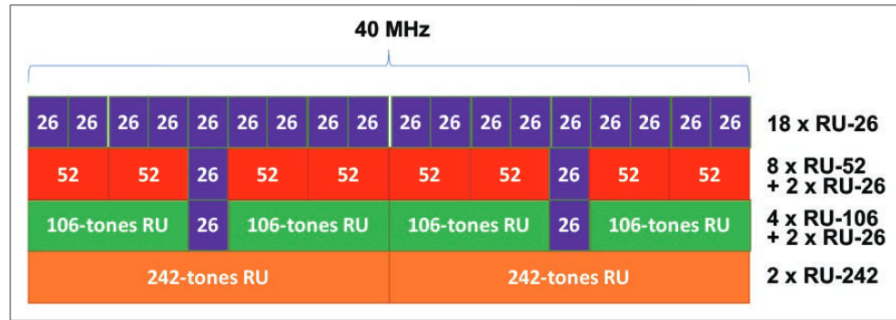


Figura 5 – Alocações possíveis de RUs em um canal de 40MHz. Adaptado de: [27]

A taxa de transferência de uma conexão é dependente do tamanho definido do RU alocado para a estação. No caso de utilização do sistema MIMO, a taxa de transferência é multiplicada pela quantidade de *streams* espaciais estabelecidas [26]. A Tabela 7, a seguir, ilustra a taxa de transferência nominal de acordo com o tamanho do RU alocado a uma estação e o MCS utilizado.

Tabela 7 – Taxas de transmissão (em Mbps) por MCS e tamanho de RU. Adaptado de: [26]

	MCS	26 tons	52 tons	106 tons	242 tons	484 tons	996 tons
0	BPSK, 1/2	0.8	1.7	3.5	8.1	16.3	34
1	QPSK, 1/2	1.7	3.3	7.1	16.3	32.5	68.1
2	QPSK, 3/4	2.5	5	10.6	24.4	48.8	102.1
3	16-QAM, 1/2	3.3	6.7	14.2	32.5	65	136.1
4	16-QAM, 3/4	5	10	21.3	48.8	97.5	204.2
5	64-QAM, 2/3	6.7	13.3	28.3	65	130	272.2
6	64-QAM, 3/4	7.5	15	31.9	73.1	146.3	306.3
7	64-QAM, 5/6	8.3	16.7	35.4	81.3	162.5	340.3
8	256-QAM, 3/4	10	20	42.5	97.5	195	408.3
9	256-QAM, 5/6	11.1	22.2	47.2	108.3	216.7	453.7
10	1024-QAM, 3/4	–	–	–	121.9	243.8	510.4
11	1024-QAM, 5/6	–	–	–	135.4	270.8	576.1

Como visto na Tabela 7, o uso do MCS 1024-QAM, descrito em maiores detalhes na subseção 3.5, não é permitido para RUs pequenos de acordo com as regulações do novo padrão. A seleção de MCS a ser utilizado depende, de modo geral, das condições do canal, como a relação sinal-ruído (do inglês, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR)). Em um cenário ideal, tanto o AP como as estações não aumentariam sua potência de transmissão (por meio do aumento do MCS) por conta de restrições regulatórias [26].

Para as estações, como geralmente situam-se em locais diferentes, podem transmitir à potência total, mesmo no caso de utilizarem RUs pequenos, sem quebrar as regulações do padrão. Tal cenário resultaria em um aumento de densidade de potência do espectro e, logo, do MCS. Para várias transmissões simultâneas em *uplink*, o cenário descrito pode

ser um meio de aumentar a taxa de transferência da rede, ficando limitado apenas à capacidade do AP em receber o sinal de todas as estações [26].

3.1.2.2 Trigger Frame (TF)

Diferente de outras implementações do OFDMA ao padrão Wi-Fi imaginadas anteriormente, a implementação realizada no padrão 802.11ax coloca o AP como coordenador das transmissões de ambos *uplink* e *downlink*. Anteriormente, transmissões de *uplink* costumavam ser controladas pelos usuários.

Agora responsável pelo controle das transmissões em *uplink*, o AP é capaz de invocar e sincronizar transmissões com um usuário pela transmissão de um *trigger frame* (TF). Além disso, também carrega informações fundamentais para o funcionamento de uma transmissão OFDMA, como sua duração e quais RUs deverão ser utilizados. A estrutura de um TF é ilustrada na Figura 6, a seguir.

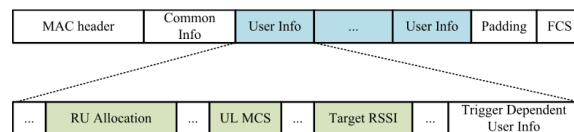


Figura 6 – Componentes de um Trigger Frame OFDMA. Adaptado de: [24]

Quando surge a necessidade de uma estação enviar novos dados ao AP, nos padrões anteriores, poderia fazer uso do CSMA/CA e iniciar a comunicação por iniciativa própria, sem que houvesse a necessidade do AP alocar recursos para tal comunicação específica de forma prévia [26]. No novo padrão, no entanto, como o AP é responsável tanto por *downlink* como por *uplink*, como é o caso do cenário descrito, a estação não tem tal opção no modo *Scheduled Access*(SA), mas tal capacidade ainda é mantida para cenários de *uplink* como o descrito no subcapítulo 3.1.2.3.

Assim, no novo padrão, o AP fica encarregado de enviar TFs periódicos, nos casos em que sabe que pelo menos uma estação terá a necessidade de transmissão, programando RUs para as estações necessárias [26]. Ao receber o TF, a estação responde pelo envio de um HE TB PDU (do inglês, *High-Efficiency Trigger-Based Physical Protocol Data Unit*) e, ao recebê-lo, o AP faz o reconhecimento pelo envio de múltiplos *frames* BACK (do inglês, *Block Acknowledgement*) transmitidos em RUs diferentes (para as estações diferentes), ou então pelo envio de um único Multi-STA BACK, capaz de cobrir toda a largura do canal [25].

3.1.2.3 Buffer Status Report (BSR)

Para poder gerar um TF e programar o acesso das estações de forma adequada, com RUs de tamanhos proporcionais aos fluxos de dados esperados, o AP deve ter conhecimento prévio das condições de tráfego nas estações associadas. Assim, em um cenário de *uplink*, as estações devem comunicar suas necessidades de tráfego por meio do envio de um *Buffer Status Report* (BSR) [28].

A geração e envio de BSRs pode ser dada tanto por iniciativa própria da estação, como por requisição do AP. Para que um BSR possa ser requisitado pelo AP, é necessário que o padrão 802.11ax também provisione um modo de acesso randômico (do inglês, *random access* (RA)), que é chamado de *Uplink OFDMA-based Random Access* (UORA). Assim, paralelamente ao modo de acesso em que RUs são alocados para estações específicas, chamado de modo de acesso programado (do inglês, *Scheduled Access* (SA)), o padrão, além de alocar uma fração dos RUs para o modo SA, também aloca os RUs remanescentes para o modo RA [28].

3.2 MIMO

O uso de várias antenas por um transmissor e por um receptor é chamado de sistema *multiple-input and multiple-output* (MIMO). Um sistema de múltiplas antenas tem vantagens em relação à diversidade espacial obtida pelo distanciamento físico das antenas de um mesmo dispositivo, especialmente em um ambiente denso de espalhamento de vários caminhos [29]. Tradicionalmente, sistemas de múltiplas antenas eram utilizados para cancelamento de interferência e ganhos de *array* por combinação coerente.

O sistema abre uma nova dimensão disponível para a exploração no desenvolvimento de sistemas de redes sem-fio, o espaço, e já foi implementado com sucesso em versões anteriores do padrão, como o Wi-Fi 4 (IEEE 802.11n) e o Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac).

Sistemas MIMO podem ser implementados de formas diferentes para obter vantagens diversas: combater o desvanecimento de sinal ou obter ganhos de capacidade. Em geral são divididos em três categorias:

- focadas em melhorias de eficiência energética pela maximização da diversidade espacial, utilizando diversidade de *delays*, *space-time block codes* (STBC) e *space-time trellis codes* (STTC).
- focadas em aumento de capacidade, como a arquitetura *vertical-Bell Laboratories layered space-time* (V-BLAST), capaz de transmitir sinais diferentes em cada antena, aumentando a capacidade total de transmissão em troca da maximização da diversidade espacial.

- focadas na capacidade do transmissor de distinguir entre canais, obtendo aumento da capacidade decompondo a matriz de canais e utilizando *singular value decomposition* (SVD).

A multiplexação espacial fornece um aumento linear de capacidade, se comparada a sistemas de antena única a um dos lados (transmissor ou receptor), sem acréscimos em gastos energéticos ou de banda. Assim, o aumento de capacidade é possível graças à capacidade do receptor de diferenciar o fluxo de dados em sinais diferentes pelas diferenças de assinaturas espaciais do canal MIMO [20].

O ganho de diversidade se deve à possibilidade de transmitir os dados por múltiplas dimensões onde ocorre atenuação (*fading*), seja por tempo, frequência ou espaço, e realizar a recombinação adequada no receptor. A diversidade espacial é interessante se comparada às alternativas pois não resulta em aumento do tempo de transmissão (como acontece com a diversidade de tempo) ou de banda necessária (como acontece com a diversidade de frequência). O *space-time coding* consegue aumentos de ganho de diversidade espacial em sistemas de múltiplas antenas mesmo sem conhecimento dos canais do transmissor [20].

O ganho de *array* pode ser realizado tanto pelo transmissor quanto pelo receptor. No entanto, ao contrário do aumento de ganho por diversidade espacial, requer conhecimento do canal de transmissão para possibilitar combinação coerente, que resulta em um perfil superior de *signal-to-noise ratio* (SNR) [20].

No projeto 802.11, o MIMO foi implementado de forma a desenvolver a interface física OFDM já implementada no Wi-Fi 2 e 3. O MIMO faz uso da diversidade espacial por meio de uma técnica chamada *Space Division Multiplexing* (SDM), no qual um dispositivo WLAN divide o fluxo de dados a ser transmitido em *streams* espaciais diversas, para que sejam transmitidas por antenas diferentes de forma simultânea, como ilustrado na figura 7. O aumento no número de *streams*, nesse caso, resulta em um aumento diretamente proporcional da capacidade de transmissão de dados, mas também aumenta o custo de produção dos dispositivos e, principalmente, o custo energético da transmissão devido ao aumento do número de antenas. Já disponível obrigatoriamente no Wi-Fi 4, um modo de economia de energia foi implementado, no qual uma transmissão só utiliza mais de uma antena nos casos em que resulte efetivamente em maior desempenho na transmissão [6].

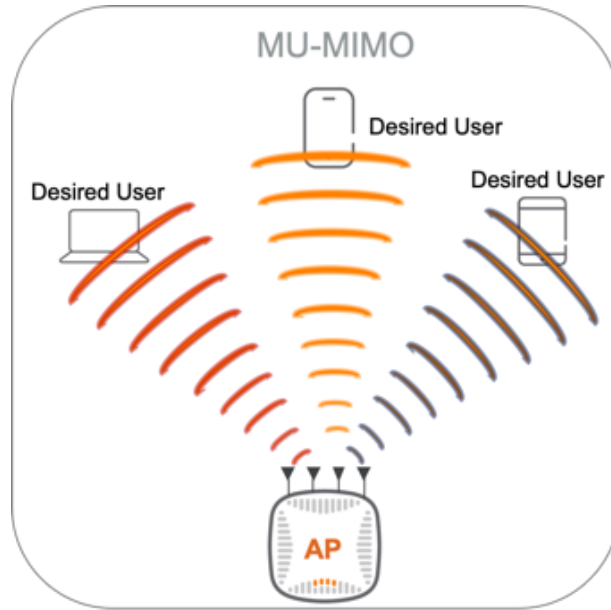


Figura 7 – Acesso simultâneo por MU-MIMO. Fonte: [30]

A união dos sistemas MIMO e OFDM foi capaz de aumentar a capacidade e de, simultaneamente, diminuir a complexidade para o receptor. Sendo extremamente sensível à matriz de canais, tais sistemas têm grande foco na modelagem de canais para avaliação da performance. As seguintes características são levadas em conta para o *design* da interface de canais: seletividade de tempo, seletividade de frequência, seletividade espacial e fator-k [29].

No caso, a multiplexação espacial é realizada pela transmissão independente de fluxos de dados em um esquema tom-por-tom, dividindo o poder de transmissão de forma uniforme entre antenas e tons transmitidos. Apesar do sistema OFDM quase eliminar ISI, a complexidade computacional para os receptores da multiplexação espacial ainda pode ser alta, o que se deve ao fato de que o número de tons pode variar de 48 até 1728 tons e a separação espacial deve ser realizada para cada um deles [20].

3.2.1 *Uplink* MU-MIMO

Além do OFDMA, uma novidade importante do Wi-Fi 6 é a implementação do MU-MIMO para cenários de *uplink* (ou simplesmente UL MU-MIMO), ou seja, quando estações diferentes transmitem para o AP de forma simultânea. A técnica permite que várias estações transmitam ao AP ao mesmo tempo, sem utilizar canais diferentes e sem a necessidade do uso do *beamforming*. O início da transmissão ainda deve ocorrer por meio de um TF transmitido pelo AP, e as estações devem obedecer o formato HE TP PDU [25].

A transmissão pode ocorrer utilizando a banda de forma integral ou sendo limitada

a um RU específico, desde que seja maior ou igual a 106 tons. O UL MU-MIMO só é possível para cenários com acesso programado, ou seja, para o modo SA mas não para o modo RA, no qual estações transmitindo simultaneamente resultaria em colisões [25].

3.2.2 *Downlink* MU-MIMO

O uso do MU-MIMO para cenários de *downlink* (ou simplesmente DL MU-MIMO) já era uma implementação opcional do Wi-Fi 5 (especificamente, do 802.11ac Wave 2), e no Wi-Fi 6 permite que 8 *streams* espaciais simultâneas, servindo até 4 estações por RU sejam transmitidas. Seu funcionamento depende das técnicas de *beamforming* e de *channel sounding* [25].

A técnica de *beamforming* é o que possibilita que o AP transmita *streams* espaciais simultâneas direcionadas a estações específicas, utilizando o mesmo canal e sem causar interferência entre elas. Especificamente para o cenário do DL MU-MIMO, o AP, que é o transmissor, é chamado de "*beamformer*", enquanto as estações, receptoras, são chamadas de "*beamformees*" [25].

Channel sounding é a técnica que possibilita que o AP *beamformer* transmita suas *streams* direcionais de forma precisa para evitar interferências, fornecendo relatórios a respeito da localidade de cada uma das estações *beamformees*. O procedimento de *channel sounding* é realizado não somente no início da transmissão, mas de forma periódica a fim de garantir que as informações de posição de cada estação estejam atualizadas. A duração do intervalo entre cada procedimento pode variar de 40ms a 10ms, em alguns casos sendo até mesmo menor. Os relatórios de *channel sounding* podem ser transmitidos pelas estações fazendo uso do UL MU-MIMO, aumentando a eficiência do DL MU-MIMO [25].

3.3 Reutilização espacial

A transmissão de frequência de rádio utilizada pelo Wi-Fi é *half-duplex*, ou seja, em um determinado momento, um dos dispositivos atua como o transmissor e o outro como receptor, nunca tendo um dispositivo atuando como ambos simultaneamente. Assim, uma das limitações do Wi-Fi é o seu número de canais disponíveis, especialmente em cenários de redes densas e a reutilização do espaço (dos canais disponíveis) se torna uma solução interessante [31].

Tradicionalmente, a reutilização espacial em uma rede Wi-Fi era feita por meio de técnicas de distribuição de canais, seguindo a lógica de manter redes próximas em canais díspares, enquanto redes mais distantes (em que não deve ocorrer interferência significativa) poderiam utilizar o mesmo canal. A vantagem do Wi-Fi 6, no entanto, consiste em conseguir fazer a reutilização do espaço mesmo quando duas redes próximas estejam no mesmo canal.

3.3.1 BSS Coloring

Para implementar a reutilização espacial nos sistemas Wi-Fi, foi integrado ao padrão 802.11ah e expandido no Wi-Fi 6 o sistema de coloração de BSSs (do Inglês, "*Basic Service Set*"), ilustrado na figura 8.

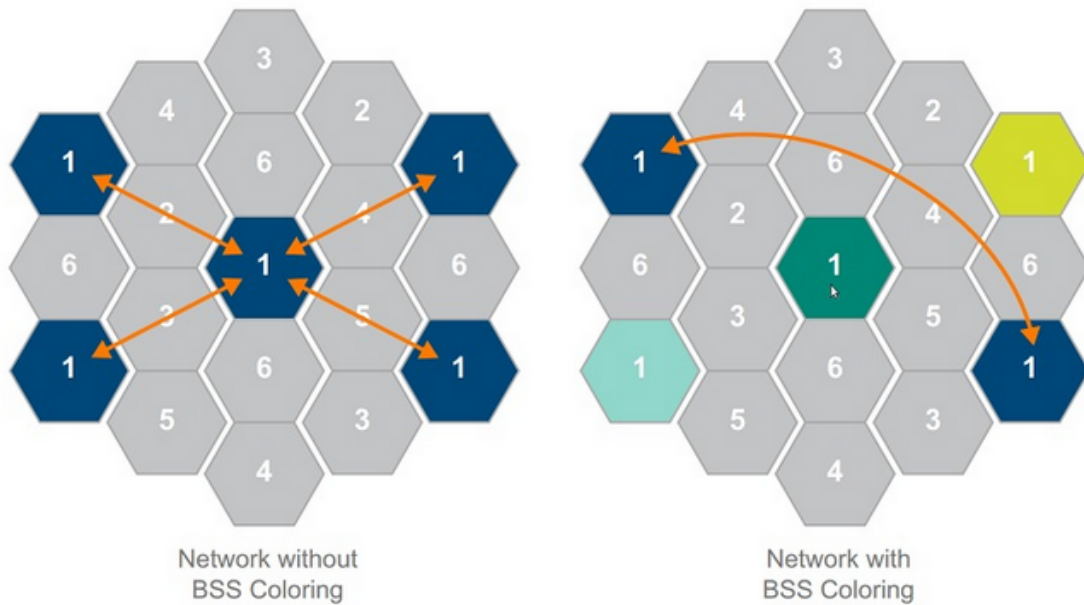


Figura 8 – BSS Coloring. Fonte: [32]

Para criar um conjunto de serviço básico de sobreposição (do Inglês, *Overlapping Basic Service Set - OBSS*), o sistema de reutilização espacial faz uso de dois parâmetros essenciais: o limite de sensibilidade *OBSS Packet Detect (OBSS/PD)* e a potência de transmissão *TX_PWR*. *TX_PWR* se refere à medida da potência do sinal transmitido, medido em decibéis por miliwatt (dBm), e pode variar de 1 a 21 dBm. O limite de sensibilidade *OBSS/PD*, por sua vez, também é medido em dBm e pode variar de -82dBm a -62dBm. Os valores definidos para os parâmetros são aceitáveis desde que obedeçam à equação 3.1 [33].

$$OBSS/PD \leq \max(-82, \min(-62, -82 + (20 - TX_PWR))) \quad (3.1)$$

Tais parâmetros são, no Wi-Fi 6, configuráveis, podendo ser diferentes para cada dispositivo. A configuração ideal para cada rede Wi-Fi deve depender da sua topologia (distância e número de dispositivos) e do número de redes Wi-Fi vizinhas, ou seja, não pode ser determinada *a priori*. Além de tais parâmetros não serem definidos de antemão, também não foi definido um algoritmo ou método padrão para calculá-los, deixando aos produtores de controladores WLAN definirem que resposta darão ao problema [33].

Cada estação e AP de uma rede são representados, em um OBSS, por um nó. Quando os valores dos dois parâmetros não se encaixam na equação 1, indicando um cenário de interferência, diz-se que os nós entram em conflito, e um dos nós não poderá transmitir. Como a maioria do tráfego de uma rede ocorre em *downstream*, ou seja, do AP para as estações, é comum não representar os nodos das estações na análise de interferência de uma rede [33].

Para identificar a que WLAN pertence um pacote recebido, é inserido em seu cabeçalho MAC um identificador que representa a cor da rede pertencente a um OBSS. Caso seja detectada colisão de cores entre redes, ou seja, caso um pacote de uma rede de determinada cor seja recebido por outra rede da mesma cor, a rede afetada deve alterar sua coloração [34].

3.4 *Target Wake Time*

Além dos mecanismos básicos de economia de energia já presentes em versões anteriores, o Wi-Fi 6 deu continuidade aos esforços de desenvolvimento do *Target Wake Time* (TWT), iniciados no 802.11 ah. Com o TWT, estações com baixos requerimentos de tráfego e ou transmissões de dados periódicas podem funcionar em um modo de baixo consumo energético, ideal para dispositivos relacionados à Internet das Coisas (do Inglês, *Internet of Things* - IoT) [35].

Em uma rede utilizando o TWT com múltiplas estações, cada uma deve negociar um *awake period*, ou seja, um período no qual pode receber e transmitir pacotes de dados para o AP, podendo permanecer em modo de economia energética no resto do tempo. Como cada estação terá um *awake period* diferente, além da economia de energia, também ocorre uma diminuição de contenção na rede, possibilitando uma operação determinística e sem colisões [35].

Comparado às soluções anteriores, o TWT oferece maior flexibilidade, permitindo tanto o envio como o recebimento de pacotes durante o *awake period*, além de não requerer que cada estação escute a todos os *beacons* (economizando a energia necessária para tal), mas apenas ao AP, com o qual precisará apenas negociar o período com o qual pode se comunicar [35].

O *awake period* também pode ser chamado de sessão TWT ou de *session period* (SP). Além do SP, outro conceito fundamental ao funcionamento do TWT é o *TWT Agreement*. Um *TWT Agreement* é o resultado de uma negociação de SPs entre um AP e uma estação, podendo incluir mais de um SP para uma mesma estação. Além disso, o acordo pode permitir somente envio, somente recebimento ou então ambas as formas de transferência durante o SP. Apesar do acordo determinar SPs específicos, uma estação ainda pode, em casos de urgência, iniciar uma nova transmissão e se comunicar com o AP

fora dos períodos estabelecidos, fazendo uso do *Distributed Coordination Function* (DCF) [35].

Outros conceitos fundamentais ao funcionamento do TWT são:

- *Target Wake Time*: tempo em microsegundos até o próximo SP.
- *TWT Wake Interval*: tempo entre cada SP de uma estação, ou seja, tempo em que a estação fica em modo de espera.
- *TWT Channel*: o canal que uma estação pode utilizar como primário durante seu SP.
- *Minimum TWT Wake Duration*: tempo mínimo que uma estação deve ficar ativa em uma sessão, durante o qual pode receber pacotes de outras estações.

Assim como para os parâmetros fundamentais do BSS Coloring, a implementação dos critérios de definição de SPs do TWT não está definida na emenda do Wi-Fi 6, deixando aos fabricantes de controladores WLAN o papel de determiná-los [35].

3.5 Modulação 1024-QAM

A modulação de amplitude em quadratura (do inglês, "*Quadrature Amplitude Modulation*" (QAM)) é o nome de um conjunto de métodos de modulação, tanto analógicos como digitais, muito utilizado em sistemas de telecomunicações. No Wi-Fi, o QAM usa dois pulsos ortogonais de transformação básica para transformar o fluxo de bits em forma de símbolos [31].

A modulação 1024-QAM é integrante do Wi-Fi 6, na qual um símbolo comporta 25% mais bits do que o 256-QAM, 10 bits comparados aos 8 bits anteriores. Com a adição de dois novos bits aos símbolos, a capacidade de dados é 4 vezes maior no 1024-QAM [31].

Assim como em outros métodos de modulação, o diagrama de constelação de pontos costuma ser utilizado para representar o QAM. Uma comparação de tais diagramas para o 256-QAM e 1024-QAM pode ser visualizada na figura 9.

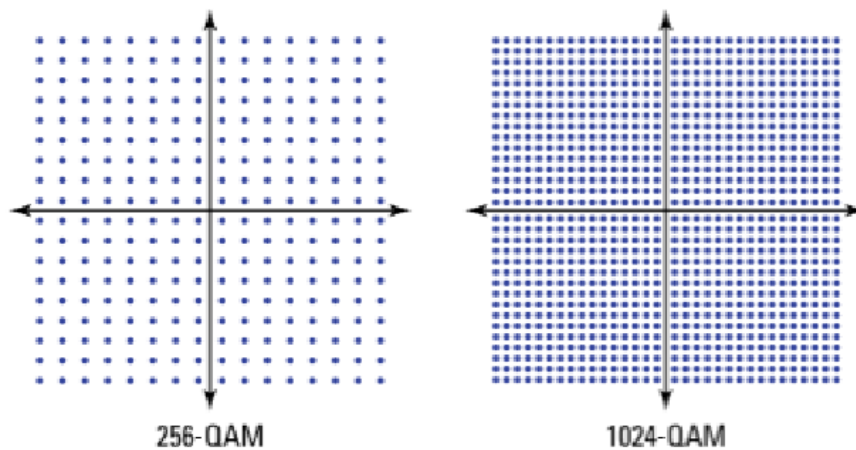


Figura 9 – Diagrama de constelação para 256-QAM e 1024-QAM. Fonte: [31]

3.6 *Frames* PHY

A fim de possibilitarem as transmissões de rádio *High Efficiency*, quatro novos *headers* dos *frames* PHY foram implementados no padrão:

- HE SU: *High Efficiency Single-User*, usado para transmissões *single-user*.
- HE MU: *High Efficiency Multi-User*, usado para transmissões que utilizam apenas o MU-MIMO, apenas o OFDMA ou o MU-MIMO e o OFDMA simultaneamente.
- HE ER SU: *High Efficiency Extended-Range Single-User*, também utilizado para transmissões *single-user*, mas com um *boost* de 3db para o *header* a fim de melhorar comunicações ao ar livre.
- HE TB: *High Efficiency Trigger-Based*, usado para transmissões em resposta a um TF.

No Wi-Fi 6, para todos os tipos de *frames*, o preâmbulo é duplicado a cada subcanal de 20 MHz [15], como ilustrado na figura 11. Os preâmbulos podem ser dividido em duas partes: um deles direcionados aos dispositivos *legacy*, ou seja, de padrões anteriores e que podem ser decodificados pelos mesmos, e o outro direcionado especificamente às informações sobre as configurações de características do novo padrão, como o OFDMA, MU-MIMO e BSS Coloring [31]. A estrutura de um *frame* do Wi-Fi 6 pode ser visualizada na imagem 10.

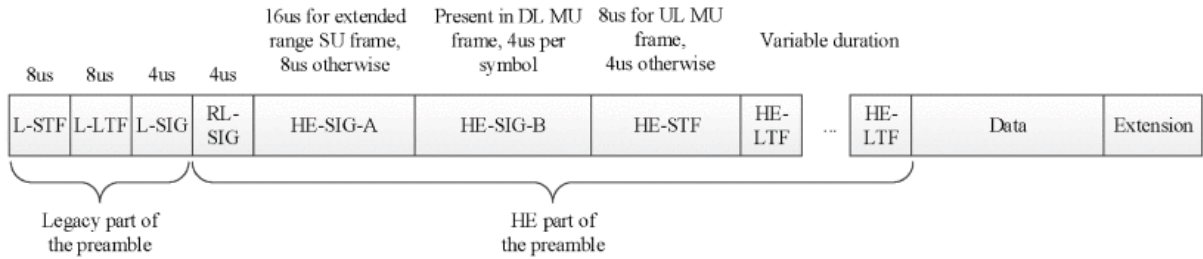


Figura 10 – Estrutura de um Frame 802.11ax. Fonte: [15]

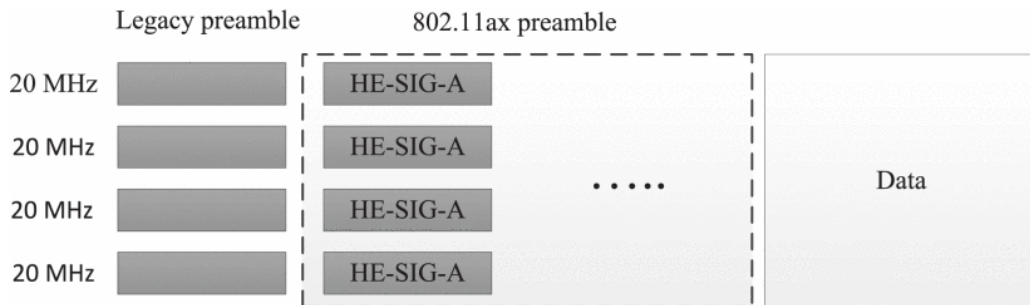


Figura 11 – Repetição de preâmbulos em um *frame* 802.11ax. Fonte: [15]

3.7 Wi-Fi 6E

Com a recente liberação da banda não licenciada de 6 GHz por diversos países para o uso pelo Wi-Fi, uma extensão foi criada para permitir a operação em tal frequência por dispositivos Wi-Fi 6. Dispositivos Wi-Fi 6 que oferecem suporte à frequência de 6 GHz são chamados de dispositivos Wi-Fi 6E [36].

Com a grande capacidade de banda liberada, igual a 1.200 MHz no caso da aprovação do *U. S. Federal Communications Commission (FCC)* dos Estados Unidos [37], o suporte a canais adicionais de 160 MHz permite oferecer suporte a um número ainda maior de aplicações que exigem altas taxas de dados e baixas latências. A nova banda é maior do que o dobro das bandas das frequências de 2,4 e 5 GHz, dobrando a banda total disponível para uso pelo Wi-Fi. A banda liberada da frequência de 6 GHz poderá compor até 59 novos canais de 20 MHz, 29 canais de 40 MHz ou até 14 novos canais de 80 MHz. [37].

Como o número de canais da frequência de 6 GHz é tão maior que o das outras duas frequências utilizadas pelo Wi-Fi, o método de descoberta de dispositivos por *probing* não é mais uma opção. Para que uma estação escutasse *beacon frames* de um AP em todos os 59 canais possíveis de 20 MHz levaria 6 segundos, o que é um intervalo de tempo extremamente grande para o Wi-Fi. Uma das soluções possíveis e esperadas para o problema é manter o uso do *probing* mas nas frequências de 2,4 e 5 GHz, já que a maioria

dos dispositivos Wi-Fi 6E deverá ser *triband*, ou seja, capaz de operar nas três frequências do Wi-Fi.

Uma das maiores vantagens da operação na frequência de 6 GHz é o fato de não ser necessária compatibilidade com padrões anteriores, já que todos eles trabalhavam em 2,4 ou 5 GHz, permitindo manter a nova frequência puramente para o uso do Wi-Fi 6. Diversos dispositivos Wi-Fi 6 são vendidos funcionando nas frequências de 2,4, 5 e 6 GHz, com os quais apenas dispositivos Wi-Fi 6E conseguem se comunicar na frequência de 6 GHz[37].

Mesmo que os dispositivos de padrões anteriores do Wi-Fi não sejam capazes de comunicação na frequência de 6 GHz ou de usarem mecanismos novos como o OFDMA, a implementação de APs Wi-Fi 6E deverá levar a benefícios aos dispositivos antigos por três motivos: os novos dispositivos não competirão por tempo de acesso ao meio sem fio das frequências de 2,4 e 5 GHz, serão equipados com *hardware* superior (como CPU e memória) e poderão beneficiar indiretamente os dispositivos antigos pela transmissão de seus dados em um *link* de retorno de malha [37].

Com o uso de uma frequência ainda maior, pode parecer que o problema do aumento da atenuação de sinal seja tão sério quanto foi no caso da comparação entre as frequências de 2,4 e 5 GHz, no qual a última possuía uma atenuação 5x maior do que a primeira. Apesar das primeiras impressões, o fato da atenuação de sinal seguir uma escala logarítmica significa que o aumento de atenuação pelo aumento das frequência dos 5 aos 6 GHz será muito menor do que a diferença de aumento de atenuação de sinal existente entre os 2,4 e 5 GHz. Logo, o alcance estimado para a frequência dos 6 GHz é menor, mas muito próximo do alcance da frequência de 5 GHz, o que significa que o replanejamento de posicionamento de dispositivos de redes não será necessário em muitos casos [37].

Em relação à segurança, a certificação de segurança WPA3 será utilizada nos dispositivos Wi-Fi 6E para a frequência de 6 GHz, sem a necessidade de oferecer retrocompatibilidade ao WPA2, já que os padrões anteriores não são capazes de transmitir em tal frequência. Apesar da mudança na frequência de 6 GHz, é provável que o WPA2 continue sendo usado nas frequências de 2,4 e 5 GHz por muito tempo devido ao problema de retrocompatibilidade [37].

Apesar de ser considerada uma grande conquista para a indústria sem fio, a extensão pode representar uma ameaça séria aos sistemas baseados em UWB ("*Ultra Wideband*"), utilizados em aplicações de Internet das Coisas e que também operam na frequência de 6 GHz, mas com menor potência de transmissão. Como solução possível, métodos utilizando o princípio de transmissões simultâneas estão sendo estudados [36].

3.8 Perspectivas para o Wi-Fi 7

O sucesso das redes Wi-Fi é demonstrado não só pela sua imensa adoção, responsável por mais da metade do tráfego de dados, mas também pelo interesse que levou à criação de um grande número de projetos paralelos às emendas principais. Mesmo quando um projeto de emenda não se torna uma das emendas principais representantes da rede, suas contribuições podem e, historicamente, foram integradas às versões principais [38].

Além do Wi-Fi 6, projetos recentes como o Wi-Fi HaLow (802.11ah), que busca levar o Wi-Fi para a Internet das Coisas, o Milimeter-Wave Wi-Fi (802.11ad/ay), que suporta taxas de dados de até 275 Gbps a distâncias muito pequenas e as redes *Extremely High-Throughput* (EHT) buscam suprir as necessidades de conexão impostas por aplicações como a realidade virtual e aumentada, vídeos em 8K, assim como *Remote Office*, *Gaming* e *Cloud Computing* [38].

Em maio de 2019, o *Task Group BE* (TGbe) começou a trabalhar em uma nova emenda que promete possibilitar taxas de dados de até 40 Gbps em canais de frequência menor ou igual a 7 Ghz, dando suporte a *real-time applications*. Apesar de relativamente recente, o projeto já conta com 500 missões referentes a características a serem implementadas no Wi-Fi 7, o 802.11be, como a cooperação *Multi Access Point*, o sistema *Distributed MIMO* e a implementação do modo *full duplex* [38].

Dentre as centenas de inovações e características a serem implementadas no Wi-Fi 7, algumas já foram aprovadas e confirmadas como parte do novo padrão, enquanto outras ainda estão sujeitas à aprovação do TGbe [38]. Algumas das inovações de maior interesse estão descritas nas seções 3.8.1 e 3.8.2.

3.8.1 Inovações aprovadas

3.8.1.1 EHT PHY

A taxa de dados nominal máxima esperada para o Wi-Fi 7 é de 46 Gbps, 4,8 vezes maior do que a taxa de 9,6 Gbps do Wi-Fi 6. Tal avanço é esperado graças a dois fatores: a implementação do MU-MIMO com o dobro de banda e o dobro de *streams* espaciais, assim como o aumento da taxa de dados de 20% esperado pela implementação do 4K-QAM [38].

Além do aumento da taxa de dados, uma mudança no protocolo PHY relacionada a generalizar os *headers* PHY dos padrões anteriores, assim como criar um formato de compatibilidade para os padrões futuros, é esperada [38].

3.8.1.2 Melhorias ao OFDMA

Com a introdução do OFDMA no Wi-Fi 6 e a possibilidade de otimização de alocação de recursos, algumas restrições em sua implementação são questionadas. Exemplos de tais restrições são: o fato de um RU, já com tamanho predefinido, só poder ser atribuído a uma única estação, assim como o fato do OFDMA não suportar transmissões em *link* direto, fatores que acabam diminuindo a eficiência espectral. O TGbe tem como meta dar uma resposta a tais desafios [38].

3.8.1.3 Operação *Multi-Link*

A aprovação do suporte ao modo de operação *multi-link* no Wi-Fi 7 é uma das mudanças mais importantes, pois favorece tanto taxas de dados extremamente altas, assim como transmissões de baixíssima latência. A utilização de múltiplos *links* possibilita alternar entre canais diferentes de frequências diferentes, como um canal da frequência de 5 GHz e um canal da frequência de 6 GHz, por exemplo, para evitar interferência ou até mesmo utilizá-los simultaneamente para obter taxas de dados maiores [38].

Apesar do uso de múltiplos *links* já ser uma realidade em *chipsets* modernos, a sincronização de *links* e o uso eficiente dos canais sem causar interferência são promissores [38].

3.8.1.4 Otimização de *Channel Sounding*

O uso simultâneo do MU-MIMO e do OFDMA em canais mais largos requer uma quantidade de informações muito grande a ser transmitida a respeito das configurações e do estado do canal. Logo, a melhoria na eficiência na comunicação de tais informações, especialmente quando se trata do procedimento de *channel sounding*, podem ser meios de melhorar a qualidade da rede [38].

3.8.1.5 Técnicas PHY para eficiência espectral

O *Working Group* responsável pelo 802.11 discutia, mesmo antes do início do TGbe, diversas técnicas avançadas para a melhoria da eficiência espectral em caso de retransmissões e de transmissões simultâneas, seja na mesma direção ou em direções opostas. Enquanto trabalha pelo lançamento da *Release 1* do padrão be, o TGbe continua analisando os avanços e benefícios decorrentes de técnicas como o *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ), operação FD e *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA), a fim de determinar se são suficientes para compensar as mudanças necessárias decorrentes de sua implementação [38].

3.8.1.6 Cooperação Multi-AP

Até o momento, o 802.11 trabalhou em técnicas de coordenação de APs próximos limitada à seleção de canais ou a parâmetros de longo prazo, por exemplo, e cujos controladores centralizados diferiam a depender do fabricante. Para o Wi-Fi 7, o TGbe discute formas avançadas de cooperação entre APs, de forma a permitir *scheduling* e *beamforming* coordenados e possivelmente até sistemas de MIMO distribuído [38].

3.8.2 Inovações candidatas

3.8.2.1 4K-QAM

A integração do 256-QAM no Wi-Fi 5 resultou em um aumento na taxa de dados de 33% se comparado ao uso do 64-QAM do Wi-Fi 4. A integração do 1024-QAM, por sua vez, aumentou a taxa de dados em 25% em relação ao 256-QAM do Wi-Fi 5. Por sua vez, a integração do 4K-QAM no Wi-Fi 7 deve resultar em um aumento da taxa de dados de apenas 20%. Mesmo não sendo uma melhoria irrelevante, o custo do aumento de pontos da constelação da modulação de quadratura em amplitude fica cada vez maior, fazendo com que sua implementação, em alguns casos, não seja justificável [38].

Para um receptor em um cenário típico de Wi-Fi, seria necessário um SNR de 40 dB para a aceitação de um MCS fazendo uso do 4K-QAM. Tal valor de SNR, considerado alto, pode ser atingido em um cenário de *beamforming*. Em uma situação na qual um AP de muitas antenas transmite a uma estação de poucas antenas, como o MU não é uma solução possível devido ao baixo número de *streams* espaciais possíveis, o uso do 4K-QAM pode ser uma solução viável para obter o aumento de *throughput* desejado, fazendo com que o suporte ao mesmo seja opcional no padrão futuro [38].

3.8.2.2 Canais de 320 MHz

Com a liberação da frequência de 6 GHz para uso como banda não licenciada, sua exploração agora disponível com os canais de 320 MHz é uma excelente opção para o ganho de *throughput*. A taxa de dados nominal de um canal de 320 MHz é 2 vezes maior do que a de um canal de 160 MHz utilizado no Wi-Fi 6. Analisando sua taxa de dados em cenários reais com distâncias moderadas, no entanto, canais de 320 MHz são ainda mais promissores, pois o aumento da taxa de dados escala linearmente com o aumento da banda, enquanto o efeito de um SNR 2 vezes menor é logarítmico [38].

3.8.2.3 MU-MIMO

Dada a importância do sistema MIMO nos últimos padrões, tanto em relação ao aumento da taxa de dados como para a eficiência espectral, seu desenvolvimento continua um dos focos do Wi-Fi 7. Logo, como forma de dobrar a taxa de dados, 16 *streams*

especiais deverão ser usadas para o sistema MIMO no novo padrão, todas usando a mesma modulação, de forma a reduzir a complexidade e facilitar sua implementação [38].

3.8.2.4 Formato de *frames* PHY

Para dar suporte às novas inovações do Wi-Fi 7, o formato dos *frames* PHY deverá sofrer algumas mudanças. Para garantir a compatibilidade com os padrões anteriores, os *frames* da frequência de 5 e 6 GHz devem começar com o preâmbulo *legacy* do padrão 802.11a [38].

4 SIMULAÇÕES DE REDE

Para comparar os valores de taxas de dados nominais a um cenário mais próximo do mundo real, assim como para investigar os benefícios da reutilização espacial em cenários de redes densas, simulações foram definidas e executadas nos simuladores NS-3 e Komondor, respectivamente, cujos resultados estão registrados e analisados nas seções 4.1 e 4.2.

4.1 Comparação de taxa de dados: Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6

A fim de comparar a taxa de dados média dos dois padrões em simulações de configurações diferentes, o simulador NS-3 (v. 3.35) foi utilizado. As simulações buscavam simular um cenário ideal para atingir o maior *real-world throughput* possível: uma única estação foi utilizada, em posição fixa a um metro do AP, em um ambiente aberto e sem interferências de outras redes.

As simulações foram definidas pela combinação das seguintes configurações:

- MCS: todos os MCS possíveis foram testados para cada padrão: do 0 ao 9 para o Wi-Fi 5 e do 0 ao 11 para o Wi-Fi 6.
- Largura de canal: canais de 20, 40, 80 e 160 MHz foram utilizados em ambos os padrões.
- GI: $3,2\mu\text{s}$, $1,6\mu\text{s}$ e $0,8\mu\text{s}$ para o Wi-Fi 6; *short* e *long* (400ns e 800ns) para o Wi-Fi 5.

As simulações consistiam em um cenário de *uplink* na frequência de 5 GHz, no qual a estação foi configurada para que executasse uma aplicação *PacketSink* do NS-3, transmitindo de modo a saturar a banda do canal utilizado. O protocolo UDP foi utilizado, com pacotes de 1500 *bytes* (1472 *bytes* em UDP) para que não houvesse a possibilidade de fragmentação de pacotes.

Devido ao grande número de configurações para os dois padrões, algumas configurações iguais de simulações foram executadas com durações de 1, 10 e 60 segundos, e seus resultados foram comparados. Como os resultados não variaram em mais de 1%, o tempo de 1 segundo foi utilizado para as simulações finais, cujos resultados foram registrados. Para que os resultados pudessem ser comparáveis entre os padrões, o MU-MIMO não foi utilizado em ambos os padrões e o OFDMA não foi utilizado no Wi-Fi 6, mantendo os parâmetros do NS-3 similares sempre que possível.

4.1.1 Canal de 20 MHz

Os valores de *throughput* obtidos pelas simulações do Wi-Fi 6 utilizando um GI de $3,2\mu\text{s}$ e do Wi-Fi 5 utilizando um GI de 800ns em um canal de 20 MHz podem ser verificados na figura 12. A combinação de 800ns de GI com o MCS de índice 9 em um canal de 20 MHz não é permitida pelo padrão, razão pela qual tal valor não foi incluído no gráfico.

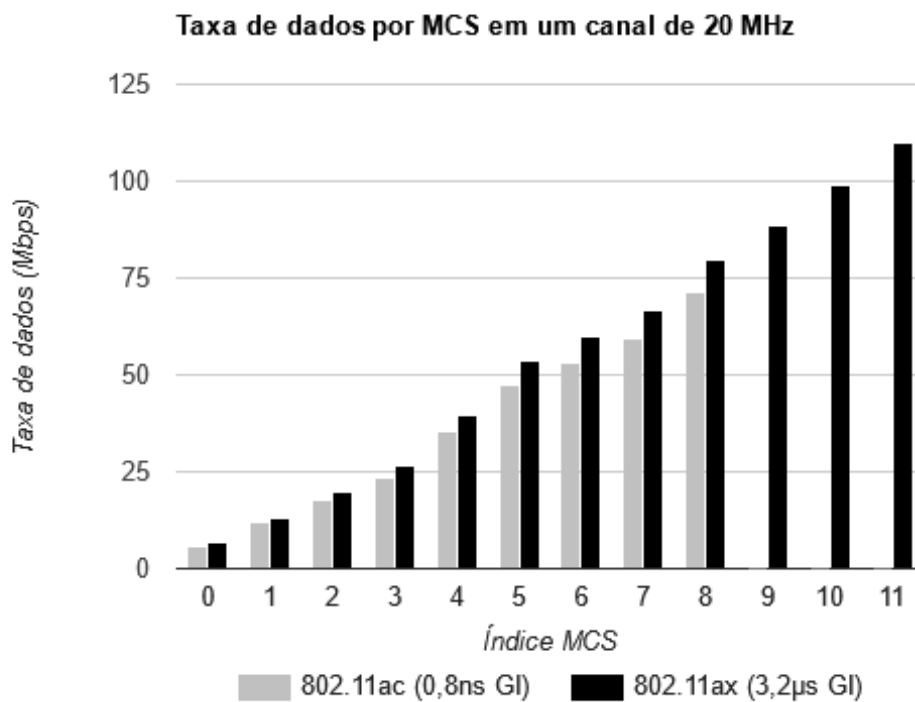


Figura 12 – Taxa de dados comparada em canal de 20 MHz. Fonte: do autor.

Os resultados obtidos, assim como os resultados de outras configurações de parâmetros podem ser verificados nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ax por MCS e GI para um canal de 20 MHz.
Fonte: do autor.

Índice MCS	MCS, <i>Coding Rate</i>	GI = 3,2 μ s	GI = 1,6 μ s	GI = 0,8 μ s
0	BPSK, 1/2	6.57101	7.26579	7.7015
1	QPSK, 1/2	13.2127	14.7789	15.5796
2	QPSK, 3/4	19.8426	22.1036	23.2812
3	16-QAM, 1/2	26.496	29.5342	31.4772
4	16-QAM, 3/4	39.8264	44.1836	46.8567
5	64-QAM, 2/3	53.4277	58.8447	62.401
6	64-QAM, 3/4	60.0105	66.2282	70.8562
7	64-QAM, 5/6	66.6404	74.0122	78.0631
8	256-QAM, 3/4	79.488	88.9088	93.631
9	256-QAM, 5/6	88.532	98.4827	103.499
10	1024-QAM, 3/4	99.1657	110.27	116.088
11	1024-QAM, 5/6	109.905	120.881	127.617

Tabela 9 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ac por MCS e GI para um canal de 20 MHz.
Fonte: do autor.

Índice MCS	MCS, <i>Coding Rate</i>	GI = 800ns	GI = 400ns
0	BPSK, 1/2	5.75846	6.51213
1	QPSK, 1/2	11.7524	13.1067
2	QPSK, 3/4	17.6404	19.6541
3	16-QAM, 1/2	23.6344	26.3076
4	16-QAM, 3/4	35.4458	39.7322
5	64-QAM, 2/3	47.5397	52.8271
6	64-QAM, 3/4	53.2275	59.0802
7	64-QAM, 5/6	59.198	65.6276
8	256-QAM, 3/4	71.1153	78.7932
9	256-QAM, 5/6	-	-

4.1.2 Canal de 40 MHz

Os valores de *throughput* obtidos pelas simulações do Wi-Fi 6 utilizando um GI de $3,2\mu\text{s}$ e do Wi-Fi 5 utilizando um GI de 800ns em um canal de 40 MHz podem ser verificados na figura 13.

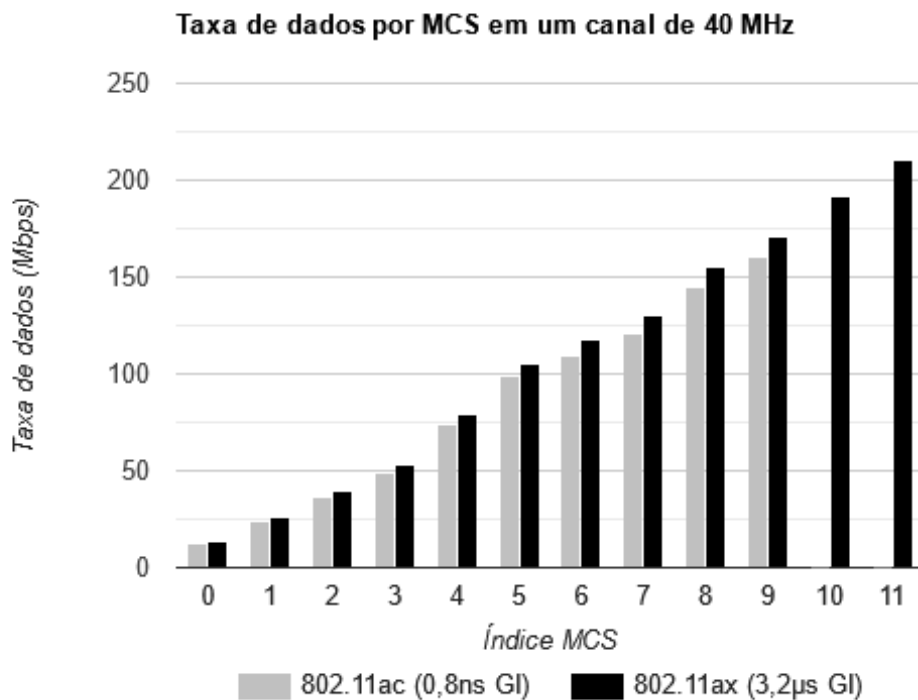


Figura 13 – Taxa de dados comparada em canal de 40 MHz. Fonte: do autor.

Os resultados obtidos, assim como os resultados de outras configurações de parâmetros podem ser verificados nas tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ax por MCS e GI para um canal de 40 MHz.
Fonte: do autor.

Índice MCS	MCS, <i>Coding Rate</i>	GI = 3,2 μ s	GI = 1,6 μ s	GI = 0,8 μ s
0	BPSK, 1/2	13.1656	14.72	15.5443
1	QPSK, 1/2	26.5431	29.3811	31.23
2	QPSK, 3/4	39.6969	44.1718	46.8567
3	16-QAM, 1/2	53.1686	59.3275	62.8485
4	16-QAM, 3/4	79.488	89.0737	93.737
5	64-QAM, 2/3	105.219	116.712	122.671
6	64-QAM, 3/4	117.678	130.148	137.238
7	64-QAM, 5/6	130.714	144.656	151.592
8	256-QAM, 3/4	155.231	171.4	180.962
9	256-QAM, 5/6	170.728	187.721	197.896
10	1024-QAM, 3/4	191.749	210.049	222.378
11	1024-QAM, 5/6	209.943	229.679	242.586

Tabela 11 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ac por MCS e GI para um canal de 40 MHz.
Fonte: do autor.

Índice MCS	MCS, <i>Coding Rate</i>	GI = 800ns	GI = 400ns
0	BPSK, 1/2	12.1528	13.5071
1	QPSK, 1/2	24.4352	27.2968
2	QPSK, 3/4	36.9766	40.8038
3	16-QAM, 1/2	48.9646	54.4993
4	16-QAM, 3/4	74.0946	82.326
5	64-QAM, 2/3	98.4591	108.41
6	64-QAM, 3/4	109.752	120.963
7	64-QAM, 5/6	120.834	134.635
8	256-QAM, 3/4	144.492	159.859
9	256-QAM, 5/6	159.93	174.968

4.1.3 Canal de 80 MHz

Os valores de *throughput* obtidos pelas simulações do Wi-Fi 6 utilizando um GI de $3,2\mu\text{s}$ e do Wi-Fi 5 utilizando um GI de 800ns em um canal de 80 MHz podem ser verificados na figura 14.

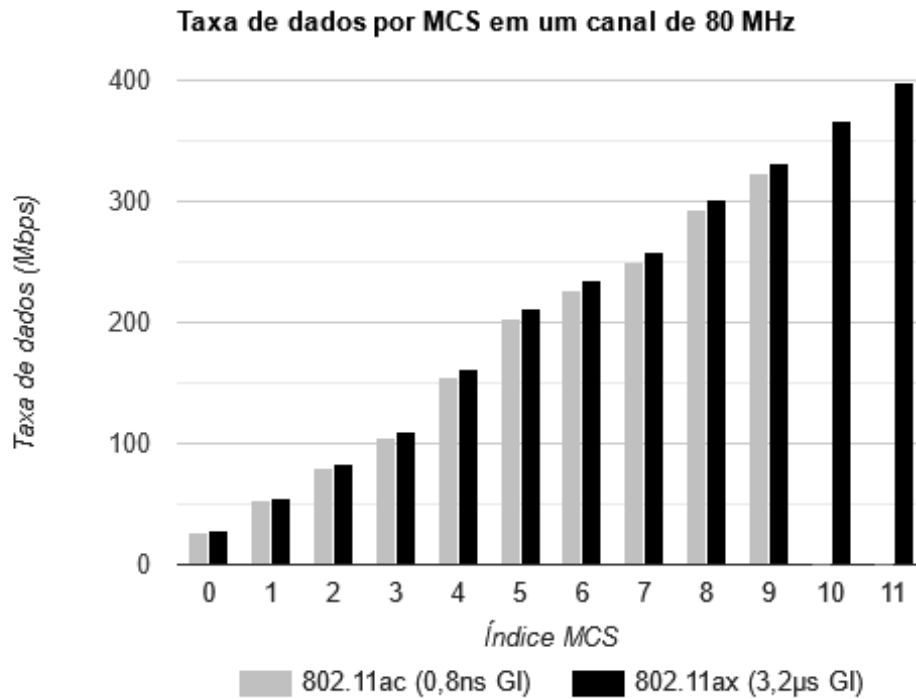


Figura 14 – Taxa de dados comparada em canal de 80 MHz. Fonte: do autor.

Os resultados obtidos, assim como os resultados de outras configurações de parâmetros podem ser verificados nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ax por MCS e GI para um canal de 80 MHz.
Fonte: do autor.

Índice MCS	MCS, <i>Coding Rate</i>	GI = 3,2 μ s	GI = 1,6 μ s	GI = 0,8 μ s
0	BPSK, 1/2	27.7914	30.7589	32.4311
1	QPSK, 1/2	55.83	61.6474	65.345
2	QPSK, 3/4	83.692	92.9833	97.5406
3	16-QAM, 1/2	110.718	121.858	128.794
4	16-QAM, 3/4	162.226	177.912	187.945
5	64-QAM, 2/3	211.179	232.635	244.764
6	64-QAM, 3/4	235.626	259.425	270.542
7	64-QAM, 5/6	258.566	284.803	299.487
8	256-QAM, 3/4	302.113	330.034	346.344
9	256-QAM, 5/6	331.047	361.547	379.128
10	1024-QAM, 3/4	366.987	401.609	421.887
11	1024-QAM, 5/6	399.03	434.64	456.614

Tabela 13 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ac por MCS e GI para um canal de 80 MHz.
Fonte: do autor.

Índice MCS	MCS, <i>Coding Rate</i>	GI = 800ns	GI = 400ns
0	BPSK, 1/2	26.496	29.4989
1	QPSK, 1/2	53.0862	59.2451
2	QPSK, 3/4	79.7117	88.9559
3	16-QAM, 1/2	105.796	117.336
4	16-QAM, 3/4	154.96	171.529
5	64-QAM, 2/3	203.112	224.015
6	64-QAM, 3/4	227.395	248.886
7	64-QAM, 5/6	249.592	272.273
8	256-QAM, 3/4	293.776	319.412
9	256-QAM, 5/6	322.71	350.053

4.1.4 Canal de 160 MHz

Os valores de *throughput* obtidos pelas simulações do Wi-Fi 6 utilizando um GI de $3,2\mu\text{s}$ e do Wi-Fi 5 utilizando um GI de 800ns em um canal de 160 MHz podem ser verificados na figura 15. As simulações com o MCS de índice 11 em um canal de 160 MHz não pôde ser executada pelo simulador NS-3, razão pela qual tal valor não foi incluído no gráfico.

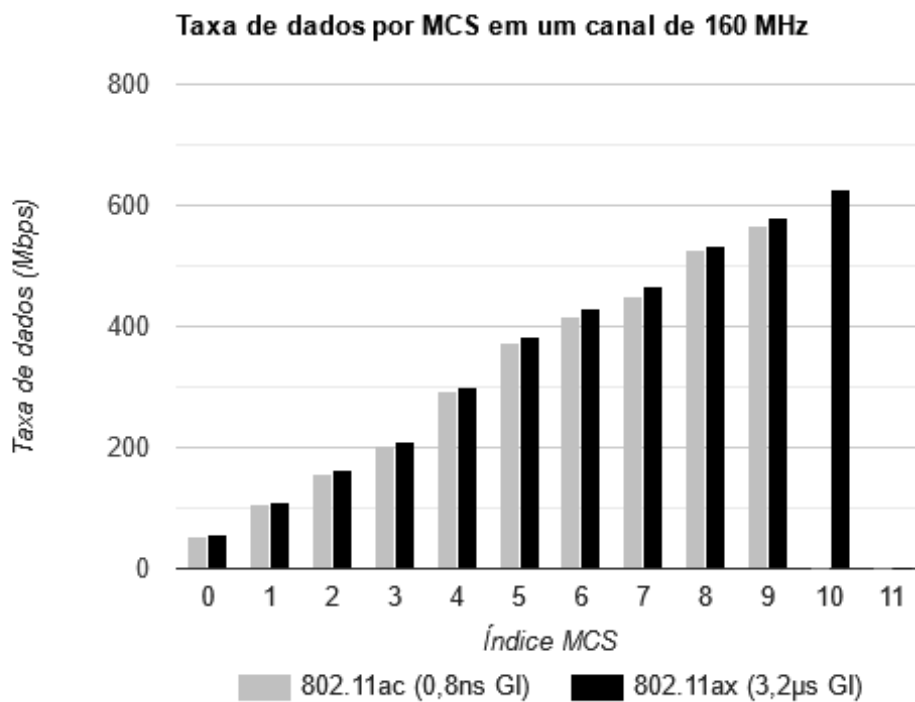


Figura 15 – Taxa de dados comparada em canal de 160 MHz. Fonte: do autor.

Os resultados obtidos, assim como os resultados de outras configurações de parâmetros podem ser verificados nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ax por MCS e GI para um canal de 160 MHz. Fonte: do autor.

Índice MCS	MCS, <i>Coding Rate</i>	GI = 3,2 μ s	GI = 1,6 μ s	GI = 0,8 μ s
0	BPSK, 1/2	55.3001	61.247	65.1802
1	QPSK, 1/2	110.518	122.129	127.876
2	QPSK, 3/4	161.755	178.194	187.627
3	16-QAM, 1/2	211.179	231.234	243.999
4	16-QAM, 3/4	301.207	329.398	349.182
5	64-QAM, 2/3	383.509	420.474	442.907
6	64-QAM, 3/4	428.858	468.873	489.693
7	64-QAM, 5/6	466.318	510.855	529.249
8	256-QAM, 3/4	533.394	578.378	601.801
9	256-QAM, 5/6	580.262	633.572	657.831
10	1024-QAM, 3/4	626.46	666.439	682.089
11	1024-QAM, 5/6	-	-	-

Tabela 15 – Taxa de dados (em Mbps) 802.11ac por MCS e GI para um canal de 160 MHz. Fonte: do autor.

Índice MCS	MCS, <i>Coding Rate</i>	GI = 800ns	GI = 400ns
0	BPSK, 1/2	53.1922	58.9742
1	QPSK, 1/2	105.701	116.924
2	QPSK, 3/4	155.196	169.916
3	16-QAM, 1/2	204.125	224.439
4	16-QAM, 3/4	294.212	321.084
5	64-QAM, 2/3	374.536	410.358
6	64-QAM, 3/4	416.329	450.526
7	64-QAM, 5/6	450.868	492.943
8	256-QAM, 3/4	525.186	572.478
9	256-QAM, 5/6	567.262	583.312

4.1.5 Análise dos Resultados

Como esperado, os valores de taxa de dados obtidos para configurações de parâmetros similares entre os padrões foram próximas, para todas as larguras de canais, com uma leve e consistente vantagem para o Wi-Fi 6.

No cenário testado, as maiores diferenças de *throughput* se deram quando foram utilizados os novos MCSs de índice 10 e 11, demonstrando que a implementação da modulação 1024-QAM foi o elemento de maior impacto para situações similares ao cenário da simulação.

Devido ao fato do Wi-Fi 6 ter sido desenvolvido tendo em vista cenários com múltiplas redes, alta densidade de dispositivos e levando em conta os benefícios do uso do OFDMA, MU-MIMO e BSS Coloring para tais cenários, é razoável concluir que neles o uso do padrão 802.11ax seria muito mais vantajoso.

4.2 Reutilização espacial

A fim de investigar os benefícios da reutilização espacial do Wi-Fi 6 em cenários de multiplicidade de redes e de alta densidade de dispositivos, para os quais foi idealizado, cenários com um número variável de *Basic Service Sets* foram simulados pelo simulador Komondor (v 3.0).

Os cenários testados incluíam 2, 4 ou 6 BSSs e seus APs foram posicionados, respectivamente, como células em uma matriz 1x2, 2x2 e 2x3, com uma distância vertical e horizontal de 6 metros entre células/APs, como ilustrado pela figura 16. As baixas distâncias entre APs foram definidas propositalmente de modo a forçar que os dispositivos competissem pela utilização do canal.

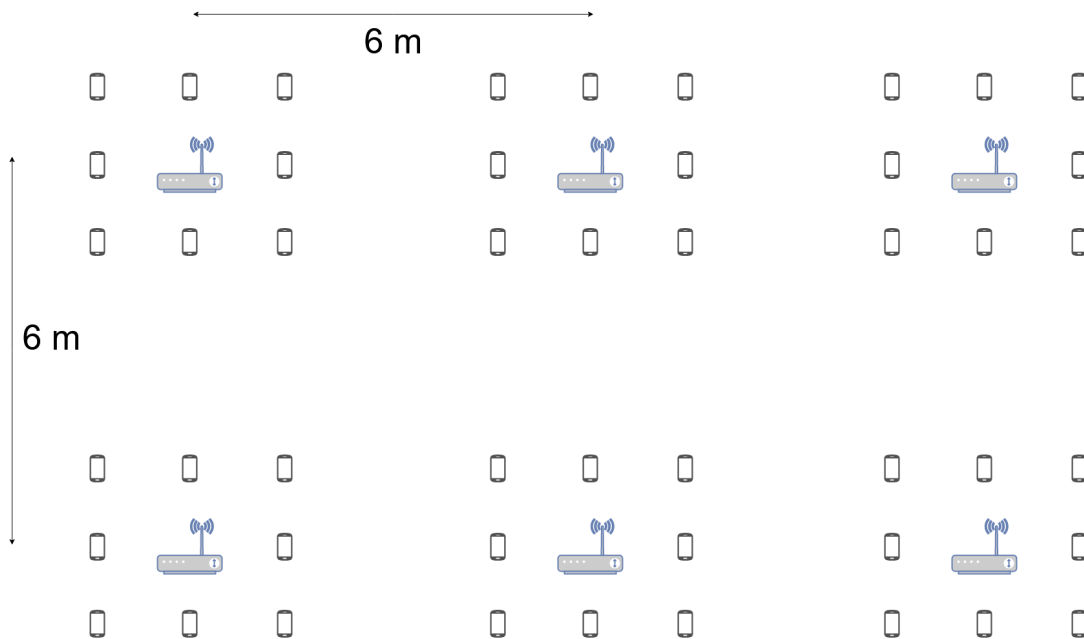


Figura 16 – Configuração de simulação com 6 BSSs. Fonte: do autor.

Além do posicionamento físico, a fim de garantir a competição pelo uso do canal, todos os BSSs foram configurados para transmitirem no mesmo canal de 20 MHz da frequência de 5 GHz, não permitindo *channel bonding* para a formação de canais de maior largura de banda. Isso significa que, em um cenário sem o uso do BSS Coloring, um único dispositivo seria capaz de transmitir no canal em um determinado momento, para que não houvessem colisões.

Para os cenários usando o BSS Coloring, a cada BSS foi atribuída uma *BSS Color* diferente, possibilitando a diferenciação da origem de cada pacote, fazendo com que

dispositivos de BSSs diferentes pudessem transmitir simultaneamente no mesmo canal, mesmo que isso signifique perda de eficiência na taxa de dados devido à interferência.

Cada BSS era composto pelo AP central e por oito estações a seu redor, posicionados de modo a formar um quadrado envolvendo o AP, conforme ilustrado pela figura 17.

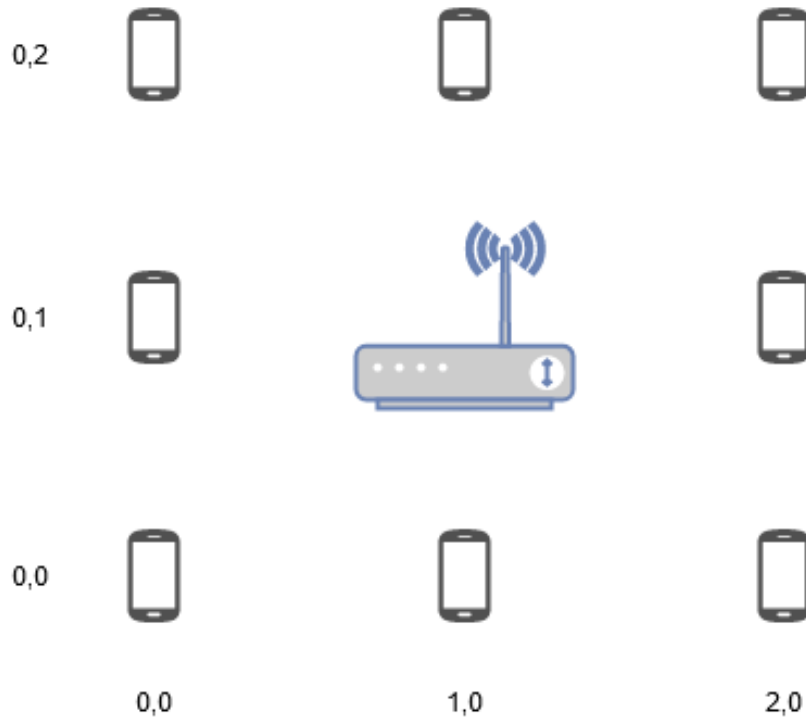


Figura 17 – Configuração de um BSS. Fonte: do autor.

As simulações foram executadas pelo Komondor 3.0 em um cenário de *downlink* no qual cada AP transmitia pacotes aleatoriamente a uma das estações de seu BSS, buscando saturar a utilização de banda do canal de 20 MHz. As simulações foram executadas com e sem o uso do BSS Coloring, buscando identificar os benefícios de tal mecanismo em um cenário de interferência.

4.2.1 2 Basic Service Sets

Os valores médios de *throughput* por BSS, assim como o *throughput* total de todos os BSSs para a simulação do cenário de 2 BSSs, com e sem o uso do BSS Coloring, podem ser verificados na figura 18 e na tabela 16.

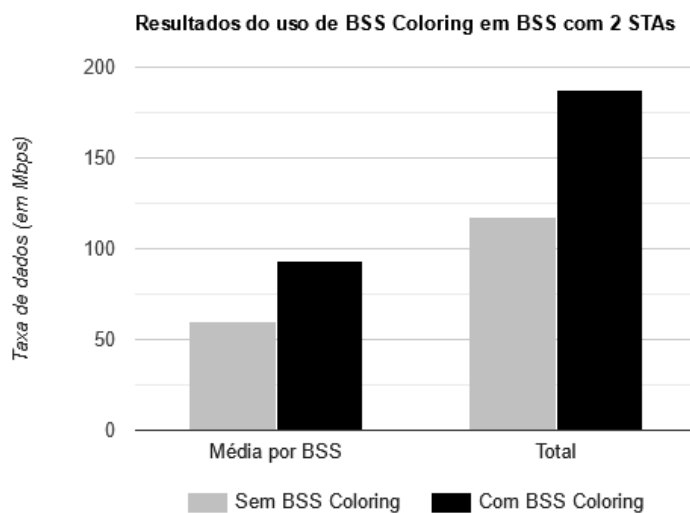


Figura 18 – Taxa de dados em cenário de 2 BSSs. Fonte: do autor.

Tabela 16 – Simulação de 2 BSSs em canal de 20 MHz com e sem uso de BSS Coloring. Fonte: do autor.

Canal 1 (20 MHz), 2 APs, 8 STAs por AP	Taxa de dados média por BSS (em Mbps)	Taxa de dados total (em Mbps)
Sem BSS Coloring	59,825	117,65
Com BSS Coloring	93,55	187,1

4.2.2 4 Basic Service Sets

Os valores médios de *throughput* por BSS, assim como o *throughput* total de todos os BSSs para a simulação do cenário de 4 BSSs, com e sem o uso do BSS Coloring, podem ser verificados na figura 19 e na tabela 17.

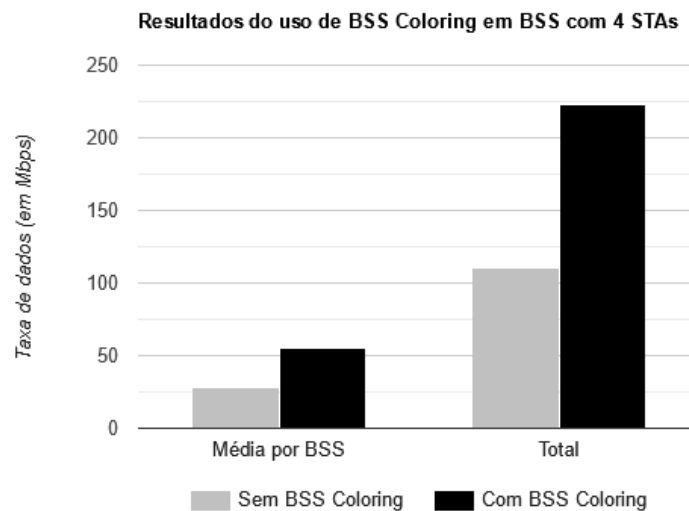


Figura 19 – Taxa de dados em cenário de 4 BSSs. Fonte: do autor.

Tabela 17 – Simulação de 4 BSSs em canal de 20 MHz com e sem BSS Coloring. Fonte: do autor.

Canal 1 (20 MHz), 4 APs, 8 STAs por AP	Taxa de dados média por BSS (em Mbps)	Taxa de dados total (em Mbps)
Sem BSS Coloring	27,624	110,49
Com BSS Coloring	55,682	222,73

4.2.3 6 Basic Service Sets

Os valores médios de *throughput* por BSS, assim como o *throughput* total de todos os BSSs para a simulação do cenário de 6 BSSs, com e sem o uso do BSS Coloring, podem ser verificados na figura 20 e na tabela 18.

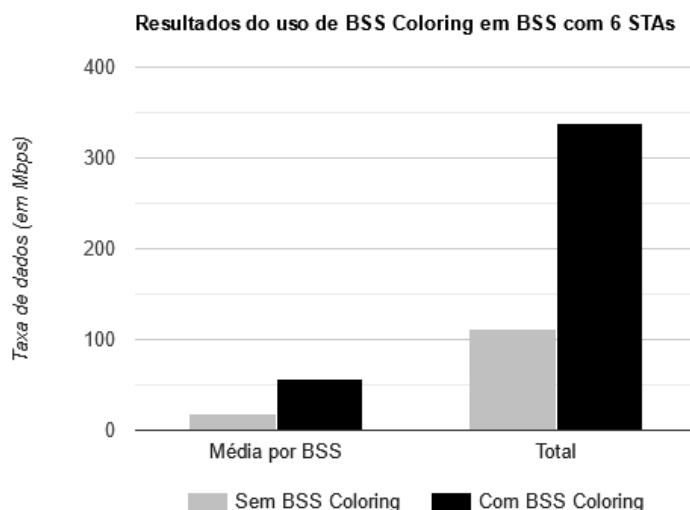


Figura 20 – Taxa de dados em cenário de 6 BSSs. Fonte: do autor.

Tabela 18 – Simulação de 6 BSSs em canal de 20 MHz com e sem BSS Coloring. Fonte: do autor.

Canal 1 (20 MHz), 6 APs, 8 STAs por AP	Taxa de dados média por BSS (em Mbps)	Taxa de dados total (em Mbps)
Sem BSS Coloring	18,546	111,28
Com BSS Coloring	56,314	337,89

4.2.4 Análise dos Resultados

O uso do BSS Coloring foi, como esperado, benéfico tanto para a taxa de dados média de um BSS quanto para a taxa de dados total do conjunto de BSSs. Cenários com maior número de BSSs obtiveram os maiores ganhos de desempenho, principalmente quanto à taxa de dados total. Os resultados de taxa de dados total e de taxa de dados média por BSS podem ser verificados nas tabelas 16, 17 e 18.

Cenários sem o uso do BSS Coloring, independentemente do número de BSSs, saturavam a banda do canal e não conseguiram ultrapassar o limite de taxa de dados total de 120 Mbps, como ilustrado pela figura 21. Tal limitação pode ser explicada pela necessidade de dividir o tempo de uso do meio sem fio entre vários dispositivos diferentes, evitando colisões entre APs de BSSs diferentes. Os resultados obtidos para a taxa de dados total, como ilustrados na figura 21 foram: 117,65 Mbps para o cenário de 2 BSSs, 110,49 Mbps para o cenário de 4 BSSs e 111,28 para o cenário de 6 BSSs.

No cenário, os APs conseguem transmitir com alta eficiência de uso do meio (devido à ausência de interferência), mas a uma fração de tempo inversamente proporcional ao número de dispositivos tentando transmitir simultaneamente. Como demonstrado pela figura 22, a taxa de dados média por BSS é de 59,825 Mbps para o cenário de 2 BSSs, 27,624 Mbps para o cenário de 4 BSSs e de 18,546 Mbps para o cenário de 6 BSSs.

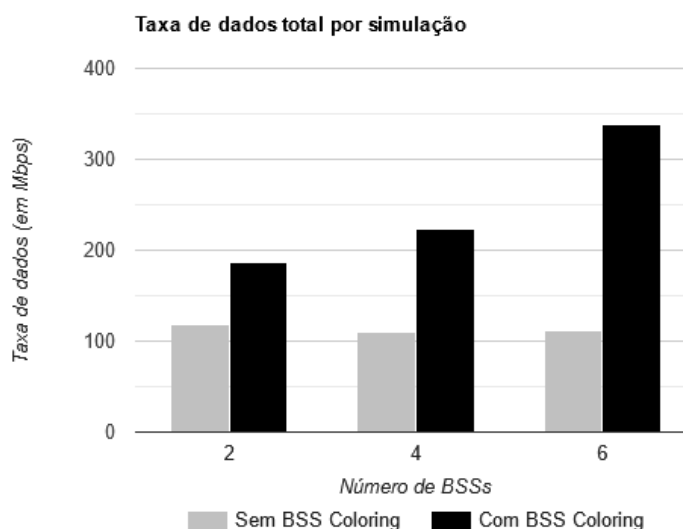


Figura 21 – Taxa de dados total por cenário. Fonte: do autor.

Com o uso do BSS Coloring, o aumento de BSSs resultou em um aumento da taxa de dados total, ao contrário do cenário anterior. Tal aumento não foi diretamente proporcional ao número de BSSs adicionados, já que, mesmo não precisando obedecer a regras de divisão de tempo de acesso ao canal, o aumento de transmissões simultâneas

resulta em maiores níveis de interferência e, logo, menor eficiência de uso do canal em transmissões específicas. A taxa de dados total, como ilustrado na figura 21, para o cenário de 2 BSSs foi de 187,1 Mbps, de 222,73 Mbps para o cenário de 4 BSSs e de 337,89 Mbps para o cenário de 6 BSSs.

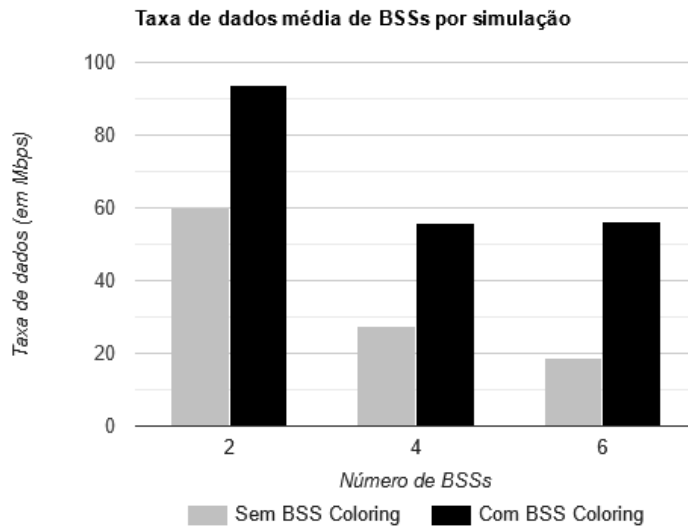


Figura 22 – Taxa de dados média por BSS por cenário. Fonte: do autor.

A taxa de dados média por BSS com o uso de BSS Coloring, apesar de sofrer uma queda com o aumento de BSSs devido à interferência, parece estabilizar em cenários contendo 4 ou mais BSSs, possibilitando o ganho de taxa de dados total já comentado. Como demonstrado na figura 22, a taxa de dados média por BSS para o cenário de 2 BSSs foi de 93,55 Mbps, de 55,682 Mbps para o cenário de 4 BSSs e de 56,314 Mbps para o cenário de 6 BSSs.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou as vantagens do uso do novo padrão Wi-Fi 6 comparado ao padrão anterior, Wi-Fi 5. Mesmo em simulações realizadas pelo simulador NS-3 de cenários simples, com uma única estação, o 802.11ax mostrou superioridade nas taxas de dados de transmissões mesmo quando utiliza os mesmos MCSs que o Wi-Fi 5. Com uma diferença ainda maior nas taxas de dados para o uso dos MCSs novos, que utilizam a Modulação de Amplitude em Quadratura de 1024 pontos, a demonstração de superioridade do novo padrão é clara.

Em cenários de redes densas, que foram o foco principal do desenvolvimento do Wi-Fi 6, as simulações executadas pelo Komondor demonstraram como a reutilização espacial propiciada pelo sistema BSS Coloring conseguem favorecer cenários de interferência. Em cenários com apenas 4 BSSs, número relativamente pequeno comparado ao que se pode esperar em cenários atuais como o de estádios, *shopping centers* e universidades, foi possível atingir a duplicação da taxa de dados total das redes, chegando até mesmo a triplicar a taxa de dados total em cenários utilizando 6 BSSs.

O BSS Coloring mostrou ser capaz de adaptar redes Wi-Fi aos novos cenários, mantendo um funcionamento satisfatório das redes mesmo nos cenários mais desfavoráveis. Apesar do OFDMA e de múltiplas *streams* espaciais possíveis com o MU-MIMO não terem sido testadas nas simulações, a julgar pelo funcionamento básico dos mesmos, sua combinação com o sistema BSS Coloring deve garantir resultados ainda melhores, confirmando o sucesso do Wi-Fi 6 em lidar com os problemas que, em sua idealização, buscava solucionar.

Como proposta de trabalhos futuros, simulações integrando o uso do OFDMA, primeiramente, mas até mesmo de *streams* espaciais com o MU-MIMO podem ser interessantes para a análise das vantagens do Wi-Fi 6 em cenários de redes densas limitadas pela interferência.

REFERÊNCIAS

- [1] BANERJI, S.; CHOWDHURY, R. S. On ieee 802.11: wireless lan technology. *arXiv preprint arXiv:1307.2661*, 2013.
- [2] ALSOP, T. *WLAN connected devices worldwide 2016-2021*. 2020. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/802706/world-wlan-connected-device/>>.
- [3] HIERTZ, G. R. et al. The ieee 802.11 universe. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 48, n. 1, p. 62–70, 2010.
- [4] CAGALJ, M. et al. On selfish behavior in csma/ca networks. In: IEEE. *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. [S.l.], 2005. v. 4, p. 2513–2524.
- [5] WANG, S.-C. et al. Performance evaluations for hybrid ieee 802.11 b and 802.11 g wireless networks. In: IEEE. *PCCC 2005. 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, 2005*. [S.l.], 2005. p. 111–118.
- [6] GARG, V. K. An overview of wireless systems. *Wireless Communications Networking, Morgan Kaufmann, 1 st edition*. Isbn, v. 123735807, 2007.
- [7] RAHAIM, M.; LITTLE, T. *Wifi PHY Standards Review—From Early 802.11 to ‘AC’ and ‘AD’*. [S.l.], 2014.
- [8] WEISS, T. A.; JONDRAL, F. K. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency. *IEEE communications Magazine*, IEEE, v. 42, n. 3, p. S8–14, 2004.
- [9] ABDELRAHMAN, R. B. M.; MUSTAFA, A. B. A.; OSMAN, A. A. A comparison between ieee 802.11 a, b, g, n and ac standards. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JEC)*, v. 17, p. 26–29, 2015.
- [10] VISOOTTIVISETH, V.; PIROONSITH, T.; SIWAMOGSATHAM, S. An empirical study on achievable throughputs of ieee 802.11 n devices. In: IEEE. *2009 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- [11] ONG, E. H. et al. Ieee 802.11 ac: Enhancements for very high throughput wlans. In: IEEE. *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. [S.l.], 2011. p. 849–853.
- [12] VERMA, L.; FAKHARZADEH, M.; CHOI, S. Wifi on steroids: 802.11 ac and 802.11 ad. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 20, n. 6, p. 30–35, 2013.
- [13] ROCHIM, A. F. et al. Performance comparison of wireless protocol ieee 802.11 ax vs 802.11 ac. In: IEEE. *2020 International Conference on Smart Technology and Applications (ICoSTA)*. [S.l.], 2020. p. 1–5.
- [14] BEJARANO, O.; KNIGHTLY, E. W.; PARK, M. Ieee 802.11 ac: from channelization to multi-user mimo. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 51, n. 10, p. 84–90, 2013.

- [15] KHOROV, E. et al. A tutorial on ieee 802.11 ax high efficiency wlangs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 21, n. 1, p. 197–216, 2018.
- [16] TERRY, J.; HEISKALA, J. *OFDM wireless LANs: A theoretical and practical guide*. [S.l.]: Sams publishing, 2002.
- [17] CHANG, R. W. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. *Bell System Technical Journal*, Wiley Online Library, v. 45, n. 10, p. 1775–1796, 1966.
- [18] WEINSTEIN, S.; EBERT, P. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform. *IEEE Transactions on Communication Technology*, v. 19, n. 5, p. 628–634, 1971.
- [19] PELED, A.; RUIZ, A. Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms. In: IEEE. *ICASSP'80. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. [S.l.], 1980. v. 5, p. 964–967.
- [20] BOLCSKEI, H. MIMO-OFDM wireless systems: basics, perspectives, and challenges. *IEEE Wireless Communications*, v. 13, n. 4, p. 31–37, 2006.
- [21] YANG, S. C. *OFDMA system analysis and design*. [S.l.]: Artech House, 2010.
- [22] GENÇ, V. *Performance analysis of transparent mode IEEE 802.16 j relay-based WiMAX systems*. Tese (Doutorado) — Citeseer, 2010.
- [23] YIN, H.; ALAMOUTI, S. OFDMA: A broadband wireless access technology. In: IEEE. *2006 IEEE Sarnoff Symposium*. [S.l.], 2006. p. 1–4.
- [24] LEE, K.-H. Using OFDMA for MU-MIMO user selection in 802.11 ax-based Wi-Fi networks. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 186041–186055, 2019.
- [25] DALDOUL, Y.; MEDDOUR, D.-E.; KSENTINI, A. Performance evaluation of OFDMA and MU-MIMO in 802.11 ax networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 182, p. 107477, 2020.
- [26] BANKOV, D. et al. OFDMA uplink scheduling in IEEE 802.11 ax networks. In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2018. p. 1–6.
- [27] AVALLONE, S. et al. Will OFDMA improve the performance of 802.11 Wi-Fi networks? *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 28, n. 3, p. 100–107, 2021.
- [28] NAIK, G.; BHATTARAI, S.; PARK, J.-M. Performance analysis of uplink multi-user OFDMA in IEEE 802.11 ax. In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2018. p. 1–6.
- [29] YANG, H. A road to future broadband wireless access: MIMO-OFDM-based air interface. *IEEE Communications Magazine*, v. 43, n. 1, p. 53–60, 2005.
- [30] ICYMI: What's the difference between OFDMA and MU-MIMO in 11ax?: Aruba Blogs. 2021. Disponível em: <<https://blogs.arubanetworks.com/solutions/whats-the-difference-between-ofdma-and-mu-mimo-in-11ax/>>.
- [31] BHANDARI, H.; DEVKOTA, B. Next generation of wireless networks: Wi-Fi 6 and 5G. 2020.

- [32] QAMAR, Z. *What is wi-fi 6?* 2020. Disponível em: <<https://techiereader.com/what-is-wifi-6/>>.
- [33] BARDOU, A.; BEGIN, T.; BUSSON, A. Improving the spatial reuse in ieee 802.11 ax wlans: A multi-armed bandit approach. In: *Proceedings of the 24th International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 135–144.
- [34] WILHELMI, F.; BARRACHINA-MUÑOZ, S.; BELLALTA, B. On the performance of the spatial reuse operation in ieee 802.11 ax wlans. In: *IEEE. 2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. [S.l.], 2019. p. 1–6.
- [35] NURCHIS, M.; BELLALTA, B. Target wake time: Scheduled access in ieee 802.11 ax wlans. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 26, n. 2, p. 142–150, 2019.
- [36] BRUNNER, H. et al. Understanding and mitigating the impact of wi-fi 6e interference on ultra-wideband communications and ranging. In: *Proc. of the IPSN Conf.* [S.l.: s.n.], 2022.
- [37] COLEMAN, D. *Wi-Fi 6 & 6E Extreme Networks Special Edition*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2022.
- [38] KHOROV, E.; LEVITSKY, I.; AKYILDIZ, I. F. Current status and directions of ieee 802.11 be, the future wi-fi 7. *IEEE access*, IEEE, v. 8, p. 88664–88688, 2020.