

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

ALINE MENDONÇA SILVA

**SIMULAÇÃO DE UMA REDE WLAN PADRÃO IEEE
802.11ax USANDO O SIMULADOR NS-3**

UBERLÂNDIA
2025

ALINE MENDONÇA SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial para
a obtenção do título de Engenheiro (a) de
Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Ederson Rosa da Silva

UBERLÂNDIA
2025

Dedico o presente trabalho à minha família e amigos que estiveram presentes durante todo o período de curso e desenvolvimento desse estudo. Agradeço também ao professor Ederson pelo apoio e pela paciência.

RESUMO

O presente trabalho aborda a simulação de uma rede sem fio padrão IEEE 802.11ax operando em modo infraestrutura através do software de simulação de redes NS-3 (*Network Simulator – 3*). A simulação realizada, tem por objetivo obter a curva de vazão de dados em Mbps em função da distância entre o terminal de usuário e o ponto de acesso, do protocolo de transporte utilizado e de variáveis como índice de modulação, intervalo de guarda e largura de banda. Para isso, foi utilizado um código que estabelece uma rede sem fio com as condições descritas, em linguagem C++ disponível no site da empresa desenvolvedora do NS-3. Através dos resultados obtidos foi constatado que a vazão depende da distância, desde que a mesma esteja dentro da área de cobertura da rede sem fio. Além disso, foi observado que a vazão é fortemente influenciada pelo intervalo de guarda entre os pacotes, pela largura de banda do canal e pelo índice MCS que diz respeito ao esquema de modulação e aos métodos de correção de erros.

Palavras-chave: IEEE 802.11ax; NS-3; simulação; vazão.

ABSTRACT

This project addresses the simulation of a wireless network standard IEEE 802.11ax operating in infrastructure mode through a network simulation software NS-3 (Network Simulator - 3). The simulation aimed to obtain the data throughput curve in Mbps as a function of the distance between the user terminal and the access point, as a function of the transport protocol used and as a function of variables such as modulation index, guard interval and bandwidth. For this simulation, a code was used that establishes a wireless network with the conditions described, written in C++ language available on the website of the company that developed the NS-3. Through the results obtained, it was found that the throughput does depend on the distance, as long as it is within the coverage area of the wireless network. Furthermore, it was observed that the throughput is strongly influenced by the guard interval between packets, the channel bandwidth and the MCS index that concerns the modulation index and error correction methods.

Keywords: IEEE 802.11ax; NS-3; simulation; throughput.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DO WI-FI	13
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DO PADRÃO IEEE 802.11	14
FIGURA 3 – ACESSO ALEATÓRIO EM UPLINK OFDMA	22
FIGURA 4 - EXEMPLO DE OPERAÇÃO TWT BROADCAST	24
FIGURA 5 – TOPOLOGIA INFRAESTRUTURADA	27
FIGURA 6 – VAZÃO EM FUNÇÃO DA LARGURA DE BANDA PARA GI = 800NS E PROTOCOLO UDP	30
FIGURA 7 – VAZÃO EM FUNÇÃO DA LARGURA DE BANDA PARA GI = 1600NS E PROTOCOLO UDP	31
FIGURA 8 – VAZÃO EM FUNÇÃO DA LARGURA DE BANDA PARA GI = 3200NS E PROTOCOLO UDP	32
FIGURA 9 - VAZÃO EM FUNÇÃO DA LARGURA DE BANDA PARA GI = 800NS E PROTOCOLO TCP	33
FIGURA 10 – VAZÃO EM FUNÇÃO DA LARGURA DE BANDA PARA GI = 1600NS E PROTOCOLO TCP	34
FIGURA 11 – VAZÃO EM FUNÇÃO DA LARGURA DE BANDA PARA GI = 3200NS E PROTOCOLO TCP	34
FIGURA 12 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 10M E GI = 800NS	35
FIGURA 13 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 10M E GI = 1600NS	36
FIGURA 14 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 10M E GI = 3200NS	37
FIGURA 15 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 20M E GI = 800NS	37
FIGURA 16 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 20M E GI = 1600NS	38

FIGURA 17 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 20M E GI = 3200NS	39
FIGURA 18 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 40M E GI = 800NS	39
FIGURA 19 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 40M E GI = 1600NS	40
FIGURA 20 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 40M E GI = 3200NS	41
FIGURA 21 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 80M E GI = 1600NS	41
FIGURA 22 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 80M E GI = 1600NS	42
FIGURA 23 – VAZÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE MCS PARA DISTÂNCIA = 80M E GI = 1600NS	43
FIGURA 24 – COMPARAÇÃO DE VAZÃO ENTRE IEEE 802.11AC E 802.11AX	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS ALTERADOS DURANTE O TRABALHO	28
TABELA 2 - VALORES DE VAZÃO PARA DISTÂNCIA DE 1 METRO E PROTOCOLO UDP	51
TABELA 3 - VALORES DE VAZÃO PARA DISTÂNCIA DE 1 METRO E PROTOCOLO TCP	53
TABELA 4 – DADOS DA VAZÃO PARA DISTÂNCIA DE 10 METROS	56
TABELA 5 – DADOS DA VAZÃO PARA DISTÂNCIA DE 20 METROS	59
TABELA 6 – DADOS DA VAZÃO PARA DISTÂNCIA DE 40 METROS	62
TABELA 7 – DADOS DA VAZÃO PARA DISTÂNCIA DE 80 METROS	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	<i>Access Point</i>
BSS	<i>Basic Service Sets</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EDCA	<i>Enhanced Distributed Channel Access</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
HCCA	<i>HCF Controlled Channel Access</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LMSC	<i>LAN / MAN Standards Committee</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MCCA	<i>MCF Controlled Access</i>
MU-MIMO	<i>Multi-User Multiple-Input Multiple-Output</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
OBO	<i>OFDMA Back-Off</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDM/OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing/Multiple Access</i>
PHY	<i>Physical</i>
PPDU	<i>Physical Protocol Data Unit</i>

QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RTS	<i>Request to Send</i>
RU	<i>Resource Units</i>
SR	<i>Spatial Reuse</i>
STA	<i>Station</i>
SU-MIMO	<i>Single User Multiple Input Multiple Output</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TGax	<i>Task Group 802.11</i>
TWT	<i>Target Wake Time</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos do trabalho	15
1.3 Organização do trabalho	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Evolução dos padrões IEEE 802.11	17
2.2 Principais características do padrão IEEE 802.11ax	18
2.2.1 OFDM/OFDMA	18
2.2.2 DL/UP MU-MIMO	20
2.2.3 Reutilização Espacial	20
2.2.4 Mecanismo de acesso OFDMA	21
2.2.5 <i>Target Wake Time</i>	23
2.3 Considerações Finais	24
3 MÉTODOS E MATERIAIS	25
3.1 Trabalhos Relacionados	25
3.2 Metodologia	26
3.3 Considerações finais	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1 Parte 1	30
4.2 Parte 2	35
4.3 Comparação com o IEEE 802.11ac	43
4.4 Considerações Finais	45
5 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
Apêndice 1	51
Anexo 1 – Código em C++	

1 INTRODUÇÃO

A conectividade *wireless* para computadores é uma característica alternativa de comunicação presente em praticamente todos os dispositivos mais recentes, como celulares, notebooks e tablets. Em particular, tem-se a rede sem fio IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11, popularmente denominada Wi-Fi, como uma das grandes novidades dos últimos anos, onde mais e mais pessoas acessam à Internet através da rede local sem fio, em múltiplos ambientes e compartilhando todo tipo de informação.

Com relação a camada física, o 802.11 define uma série de padrões de transmissão e codificação para comunicações sem fio, sendo os mais comuns: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Sua flexibilidade e desempenho têm determinado sua utilização em *hotspots* e permitido a presença desse tipo de solução de acesso a serviços em aeroportos, bares, residências e ambientes públicos.

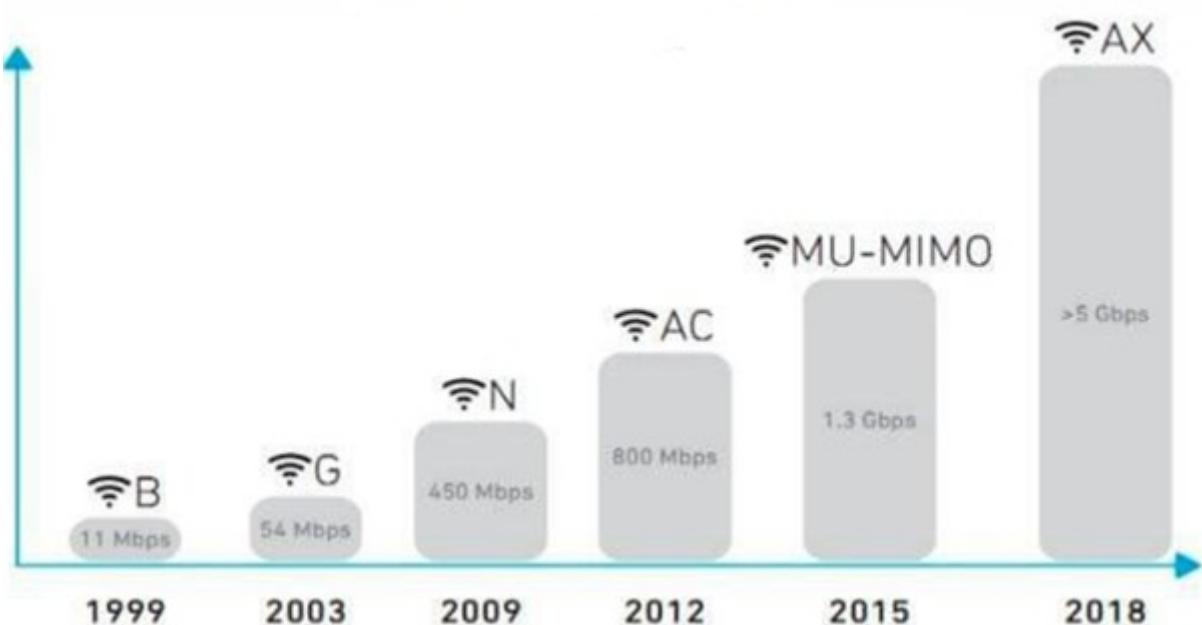
O Grupo IEEE 802 LMSC (LAN / MAN Standards Committee) possui vários padrões referentes a tecnologia Wi-Fi, cobrindo desde a definição das especificações da comunicação sem fio até aspectos de segurança e qualidade de serviço. O Padrão 802.11 possui especificações muito próximas ao padrão 802.3 (*Ethernet*) de redes cabeadas locais/metropolitanas, de modo que possam compartilhar protocolos e serem compatíveis. Os padrões 802.11 foram evoluindo ao longo do tempo, de modo que várias versões do padrão original, denominados padrões de suporte de rede, passassem a existir. Tais padrões incluem o 802.11 (legado), 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac e 802.11ax, sendo esse último conhecido também como Wi-Fi 6.

O Wi-Fi 6 surgiu em 2014 como uma nova proposta para WLANs tendo como principal objetivo alcançar uma vazão 4 vezes maior, em comparação com a chamada Wi-Fi Gigabit (IEEE 802.11ac). O escopo desse novo padrão (IEEE 802.11ax) é definir modificações padronizadas tanto na camada física PHY (*Physical*), quanto na subcamada MAC (*Medium Access Control*), para operações de alta eficiência na faixa de frequências entre 1 e 6 GHz, tendo como objetivo proporcionar uma melhor experiência ao usuário, melhorando em 4 vezes sua taxa de transferência média em ambientes com alta densidade de dispositivos.

Outro ponto a ser destacado diz respeito a integração deste novo padrão com as redes celulares LTE (*Long Term Evolution*), objetivando a migração de parte do tráfego das mesmas para as novas WLANs.

A Figura 1 mostra a evolução dos padrões Wi-Fi ao longo dos anos, destacando suas velocidades e características. O gráfico apresenta os principais padrões, como 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac e o 802.11ax (Wi-Fi 6), com suas respectivas taxas de transmissão de dados. A evolução revela um aumento significativo na capacidade de transmissão, melhorando a experiência do usuário e a conectividade em ambientes com muitos dispositivos.

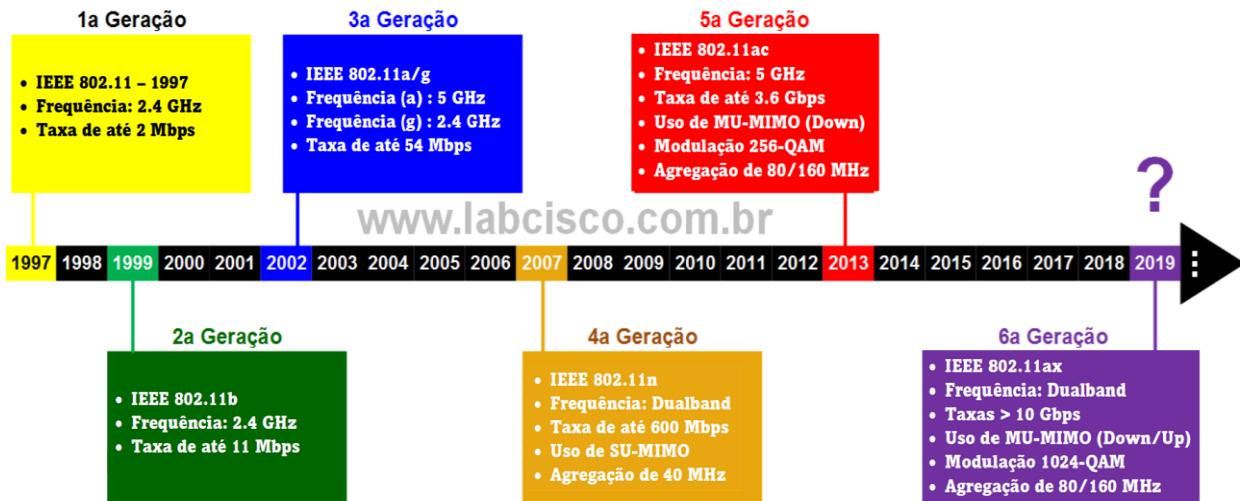
Figura 1 – Evolução do Wi-Fi



Adaptado de: *Understand what changes on the Internet with the new WiFi standard [1]*

Grupos IEEE possuem um método estruturado de introdução de novas tecnologias, ou seja, quando uma lacuna é identificada no padrão existente, um número suficiente de participantes pode iniciar um grupo de estudo para investigar se há justificativa suficiente para desenvolver uma nova tecnologia. Normalmente, quando uma última grande implementação está encerrando, o projeto de desenvolvimento de uma nova implementação de um padrão se inicia. O método estruturado de desenvolver novos padrões levou a uma longa história de inovação, oferecendo novas camadas físicas e aprimoramentos à camada MAC em termos de segurança e qualidade de serviço, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Evolução do Padrão IEEE 802.11



Fonte: Adaptado de Padrão IEEE 802.11ax de WiFi de Próxima Geração [2]

1.1 Justificativa

A crescente demanda por redes sem fio mais eficientes e de maior capacidade impulsiona o desenvolvimento de novos padrões, como o IEEE 802.11ax, também conhecido como Wi-Fi 6. Esse padrão representa um avanço significativo em relação às versões anteriores, oferecendo melhorias em eficiência espectral, capacidade de transmissão e redução de latência, tornando-se essencial para atender às necessidades de conectividade atuais.

Este trabalho tem como objetivo analisar as principais características e tecnologias adotadas no padrão IEEE 802.11ax, destacando seus benefícios em comparação com padrões legados. Esses avanços fazem com que o IEEE 802.11ax seja mais adequado para cenários modernos que exigem grande volume de dados em tempo real, como eventos de grande escala, ambientes urbanos densos e redes empresariais.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho surge da crescente adoção de tecnologias que demandam maior capacidade de rede, como a IoT (*Internet of Things*), que exige redes mais robustas e eficientes para suportar um número crescente de dispositivos conectados. Além disso, a evolução das empresas para soluções de computação em nuvem e a necessidade de conectividade estável e de alto desempenho em ambientes corporativos tornam a implementação de redes sem fio mais complexa e desafiadora. O Wi-Fi 6, com suas melhorias de desempenho, se posiciona como uma solução estratégica para essas demandas, permitindo que as redes sem fio atendam ao aumento da carga de tráfego e às necessidades de dispositivos móveis em empresas e usuários finais.

O estudo do IEEE 802.11ax, portanto, não só se justifica pela busca por maior eficiência e performance, mas também pela relevância que ele ganha no contexto de transformação digital das empresas, que dependem cada vez mais da conectividade sem fio para suportar suas operações e inovação. Esse trabalho busca, assim, contribuir para uma melhor compreensão do impacto desse padrão nas redes modernas e como ele pode ser utilizado para potencializar a conectividade, especialmente em um cenário crescente de dispositivos conectados e serviços em nuvem.

1.2 Objetivos do Trabalho

O principal objetivo deste trabalho é realizar a simulação de uma rede sem fio baseada no padrão IEEE 802.11ax, utilizando o simulador de redes NS-3. A simulação busca avaliar o desempenho da rede em diferentes condições de operação, variando parâmetros como a distância entre o terminal do usuário e o AP (ponto de acesso), o protocolo da camada de transporte, istoé, TCP (*Transmission Control Protocol*) ou UDP (*User Datagram Protocol*), a largura de banda, o intervalo de guarda e o índice de modulação (*Modulation and Coding Scheme*).

Especificamente, pretende-se analisar o impacto da distância na vazão de dados, observando como a proximidade ou afastamento do ponto de acesso influencia a taxa de transmissão. A simulação busca entender de que forma a distância entre os dispositivos interfere na estabilidade da conexão e na qualidade do sinal transmitido.

Além disso, o estudo visa investigar como a modulação e a largura de banda afetam o desempenho da rede. São exploradas diferentes configurações de índice de modulação e intervalos de guarda, verificando como esses parâmetros influenciam a eficiência da comunicação e a vazão de dados em diversos cenários.

Outro objetivo relevante é a comparação entre os protocolos TCP e UDP, buscando identificar as diferenças no tratamento de pacotes. A análise considerará aspectos como controle de congestionamento e confiabilidade na entrega de pacotes, avaliando como essas características afetam a vazão em cada protocolo.

Por fim, é realizada uma comparação entre os padrões IEEE 802.11ax e IEEE 802.11ac, utilizando um cenário controlado para destacar as principais melhorias introduzidas pelo 802.11ax em relação ao seu antecessor. Essa análise evidencia a superioridade do 802.11ax em termos de eficiência e desempenho, reforçando sua adequação às demandas crescentes das redes sem fio modernas.

1.3 Organização do trabalho

O restante do trabalho está organizado conforme a descrição a seguir. No Capítulo 2 está presente a teoria utilizada como base para realização e análise. No Capítulo 3 são descritos os métodos e materiais usados no desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões a respeito dos mesmos. Por fim, no Capítulo 5 estão as conclusões e sugestões de possíveis direcionamentos para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo são apresentados os principais aspectos que caracterizam o padrão IEEE 802.11ax e as diferenças do mesmo em relação aos padrões anteriores.

2.1 Evolução dos padrões IEEE 802.11

O Wi-Fi evoluiu significativamente ao longo dos anos, com cada novo padrão trazendo melhorias em velocidade, eficiência e capacidade, como é apresentado na Figura 2 do Capítulo 1. No entanto, cada geração também apresentava limitações que impactavam o desempenho, a estabilidade da conexão e a experiência do usuário. Desde os primeiros padrões até o Wi-Fi 6, a tecnologia sem fio passou por diversas transformações para atender à crescente demanda por conectividade rápida e confiável.

A 1^a geração do Wi-Fi, baseada no padrão IEEE 802.11, foi introduzida em 1997 e operava exclusivamente na frequência de 2,4 GHz, com taxas de transmissão de até 2 Mbps. Esse padrão foi pioneiro na comunicação sem fio, mas logo se tornou limitado para aplicações mais exigentes.

Em 1999, surgiu a 2^a geração, com o padrão IEEE 802.11b. Ainda utilizando a frequência 2,4 GHz, essa versão trouxe um avanço considerável, permitindo taxas de transmissão de até 11 Mbps. Foi a primeira versão do Wi-Fi a se popularizar amplamente, impulsionando o uso da tecnologia em residências e empresas.

A 3^a geração, lançada em 2002, trouxe dois novos padrões: IEEE 802.11a e 802.11g. Enquanto o 802.11a operava na frequência 5 GHz, oferecendo maior velocidade e menor alcance, o 802.11g manteve a frequência 2,4 GHz, mas com taxas de até 54 Mbps, representando um avanço significativo em relação às versões anteriores.

Já em 2007, a 4^a geração introduziu o IEEE 802.11n, que trouxe suporte ao *dual band*, operando tanto em 2,4 GHz quanto em 5 GHz. Essa versão aumentou drasticamente a capacidade do Wi-Fi, alcançando taxas de até 600 Mbps, além de introduzir o conceito de SU-MIMO e agregação de canais de 40 MHz, permitindo conexões mais rápidas e estáveis.

O ano de 2013 marcou a chegada da 5^a geração, com o IEEE 802.11ac. Exclusivamente na frequência de 5 GHz, essa geração atingiu velocidades de até 3,6 Gbps, implementando a tecnologia MU-MIMO para downloads, modulação 256-QAM e agregação de canais de 80/160

MHz, tornando-se essencial para aplicações de alta demanda, como *streaming* em 4K e jogos online.

O grande avanço veio com o Wi-Fi 6, baseado no padrão IEEE 802.11ax, lançado em 2019. Esse padrão trouxe melhorias significativas em todas as frentes. Operando em *dual band*, ele oferece taxas superiores a 10 Gbps e adota uma modulação ainda mais eficiente, o 1024-QAM, aumentando a densidade de dados transmitidos. Além de aprimorar o MU-MIMO para funcionar tanto no *downlink* quanto no *uplink*, ele introduziu o OFDMA, permitindo a transmissão mais eficiente para vários dispositivos simultaneamente. Outra vantagem crucial do Wi-Fi 6 é sua maior eficiência energética, reduzindo o consumo de bateria em dispositivos conectados, além de oferecer menor latência e melhor desempenho em ambientes de alta densidade, como empresas e espaços públicos.

Dessa forma, o Wi-Fi 6 não apenas supera as limitações dos padrões anteriores, como também estabelece um novo nível de desempenho e confiabilidade para redes sem fio, garantindo suporte para as demandas crescentes de dispositivos conectados e aplicações de alta velocidade.

2.2 Principais características do padrão IEEE 802.11ax

Para atender a demanda dos usuários das redes WLAN por maior desempenho, foi desenvolvida uma nova proposta, denominada IEEE 802.11ax, tendo como características principais: OFDM/OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing/Multiple Access*), DL/UP MU-MIMO (*Multi-User Multiple-Input Multiple-Output*), Reutilização Espacial, TWT (*Target Wake Time*) e QAM – 1024 (*Quadrature Amplitude Modulation*).

O IEEE propôs tal padrão para unir a liberdade e a alta velocidade da conexão sem fio Gigabit Ethernet à confiabilidade e à previsibilidade. O mesmo baseia-se nos pontos fortes dos padrões anteriores, principalmente do 802.11ac, aumentando a eficiência, a flexibilidade e a escalabilidade, o que permite que as redes atuais tenham mais velocidade e maior capacidade com aplicações de próxima geração [3].

2.2.1 OFDM/OFDMA

O OFDMA é uma versão multusuário da tecnologia OFDM, ou seja, uma evolução da mesma. No 802.11ax é um dos recursos críticos responsáveis para melhoria do desempenho da

rede. O padrão mostrou inovação ao utilizar a tecnologia MU-MIMO para *uplink* e *downlink*, permitindo atender a mais usuários simultaneamente, em lugares mais remotos.

Com a aplicação das tecnologias MU e MU-MIMO ao OFDMA e ao OFDM, tornou-se possível que diferentes subconjuntos de portadoras fossem alocados a vários usuários, o que permite acesso simultâneo aos recursos. Com a tecnologia OFDMA, consegue-se fragmentar várias subportadoras em bandas menores, denominadas RU (*Resource Units*), sendo as mesmas distribuídas aleatoriamente para cada estação móvel de acordo com as dificuldades que cada uma possui ao acessar o meio. Assim, o uso do OFDMA acaba permitindo que cada usuário adquira uma RU individual, fazendo com que o fluxo inicial de sinal no canal seja minimizado, tornando o sinal mais eficiente, livre de interferência e desvanecimento.

Além disso, proporciona ao AP (*Access Point*) um melhor equilíbrio ao BSS (*Basic Service Sets*), pois numa transmissão de *downlink*, quando uma estação móvel estiver na borda ou em uma região de baixo nível de sinal, o AP eleva o nível de potência da mesma com objetivo de aumentar a taxa de transferência de *downlink*, por meio da transferência de potência de um usuário mais forte. Por outro lado, os ganhos do OFDMA no *uplink* ocorrem pela aglomeração de múltiplos usuários, por intermédio dos quais cada um transmite em sua RU dedicada, colaborando na melhora da SNR (*Signal to Noise Ratio*) no ponto de acesso.

Ao comparar os pontos de acesso às estações, observa-se que as últimas têm uma potência de transmissão reduzida em regiões com baixo nível de sinal, o que pode comprometer a taxa de transferência no *uplink* e diminuir a área de cobertura da BSS. No entanto, a tecnologia OFDMA no *uplink* do padrão pode mitigar essa limitação, melhorando a eficiência do uso da largura de banda e permitindo uma comunicação mais eficaz mesmo em condições de sinal fraco.

O IEEE 802.11ax, visando atender os recursos do OFDMA e os cenários externos, diminuiu o espaçamento da subportadora, que ficou em 78,125kHz, contrapondo com o IEEE 802.11ac, que é de 312,5kHz, ou seja, 4 vezes menor. Isso resulta na minimização da sobrecarga do intervalo de guarda relativo [4].

Entretanto, quando o sinal enfrenta um espaçamento inadequado entre as subportadoras na transmissão OFDM, surgem interferências decorrentes do espalhamento doppler, o que degrada o desempenho. Os períodos definidos no padrão IEEE 802.11ax para o intervalo de guarda, que são de 800 ns, 1600 ns e 3200 ns, têm como objetivo mitigar esse problema, garantindo proteção contra atrasos de propagação em canais internos e externos. Isso se refere à diferença temporal entre os usuários durante a transmissão, melhorando a eficiência tanto do OFDMA no *uplink* quanto nas operações de MIMO [4].

2.2.2 DL/UP MU-MIMO

A multiplexação espacial foi uma relevante descoberta, sendo uma das premissas dos padrões legados, usando múltiplas antenas em pontos de acesso e estações, permitindo alcançar melhorias no desempenho das WLANs até então.

A multiplexação espacial segue sendo uma das principais tecnologias no padrão 802.11ax com o objetivo de alcançar alto desempenho. O IEEE 802.11ax continua a implantar tanto o SU-MIMO (*Single User Multiple Input Multiple Output*) quanto o MU-MIMO no *downlink*, como já ocorre no padrão IEEE 802.11ac, podendo utilizar a configuração 4×4 ou 8×8 MU-MIMO. De acordo com a sua utilização, proporciona maior capacidade e possibilita a geração de até 8 *streams* simultâneos para diferentes usuários, em *downlink/uplink*.

O padrão utiliza-se da multiplexação espacial para integrar ou dar suporte para o MU-MIMO de *uplink*, o MIMO em massa e o MIMO em rede, bem como possibilita soluções de antenas distribuídas, proporcionando maior transferência de dados ao meio de transmissão. O MIMO multiusuário permite múltiplas transmissões simultâneas para diferentes estações a partir do ponto de acesso tanto no sentido *downlink* quanto no sentido *uplink* [5].

Para iniciar uma transmissão de *downlink*, o ponto de acesso envia informações cruciais sobre o grupo de estações selecionadas e o número de fluxos espaciais destinados a cada uma delas, utilizando os modos SU-MIMO ou MU-MIMO. O MU-MIMO massivo ocorre quando o ponto de acesso possui significativamente mais antenas do que o número de estações ativas. Além disso, a coordenação das transmissões entre diferentes pontos de acesso permite que funcionem como um grande conjunto de antenas, reduzindo a interferência e aumentando a reutilização espacial [6].

2.2.3 Reutilização Espacial

Os padrões 802.11n e 802.11ac, ao detectar uma PPDU (*Physical Protocol Data Unit*) com energia recebida maior que -82dBm, fará com que uma estação, por precaução, adie sua tentativa de transmissão de dados, com o intuito de evitar interferência no BSS (*Basic Service Sets*), o que provocaria uma menor taxa de transferência ao sistema.

O padrão 802.11ax faz uso da reutilização espacial (*Spatial Reuse*) objetivando melhorar o desempenho do sistema e a economia de energia, quando submetido a ambientes densos, identificando precocemente o sinal do BSS e realizando o gerenciamento de interferências. A identificação do BSS ocorre por meio de informações transportadas no cabeçalho da PPDU,

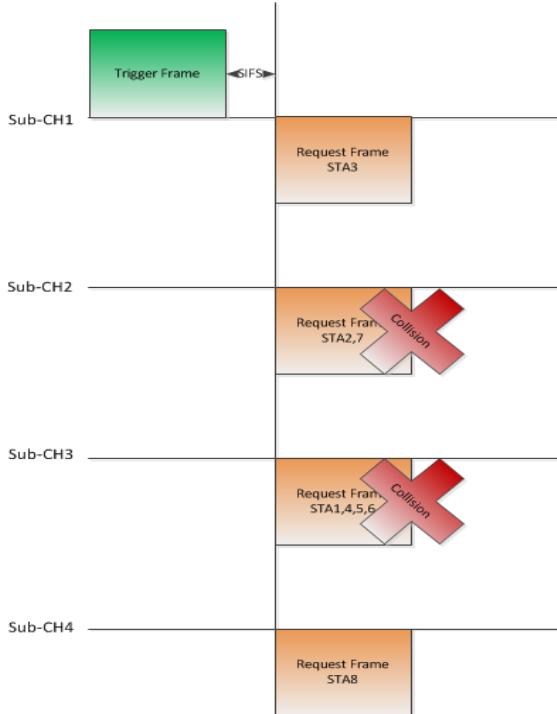
como um código de cor associado a um BSS. A estação consulta-o sobre um determinado quadro e faz um comparativo entre esse código de cor enviado pelo AP e o código de cor do BSS; sendo positivo, se trata do mesmo BSS; caso contrário, se trata de um BSS adjacente [7].

O 802.11ax faz uso também do CCA (*Clear Channel Assessment*). Baseado no código de cores, ele pode atuar no limiar de detecção do sinal BSS, em área de intersecção e controle de potência de transmissão. Além disso, o 802.11ax também favorece o mecanismo de temporização mantendo uma previsão de tráfego futuro através do mecanismo denominado NAV (*Network Allocation Vector*), já utilizado nos padrões IEEE 802.11 anteriores.

2.2.4 Mecanismo de acesso OFDMA

Quando uma estação tenta acessar o canal usando OFDMA no *uplink*, e o AP constata a presença da estação, neste instante o mesmo libera uma RU que é alocada imediatamente pela STA (*Station*), e esta começa a transmitir sua PPDU utilizando OFDMA. Quando o ponto de acesso (AP) detecta a presença de uma estação tentando acessar o canal, mas não a reconhece, ele envia uma ou mais RUs para que a estação possa solicitar acesso por meio de um processo aleatório baseado em OFDMA no *uplink* com múltiplos usuários. Este mecanismo funciona pelo fato do AP, que tem o controle absoluto do acesso ao meio, enviar regularmente quadros disparadores de acesso aleatório (*frame trigger*), que alocam as RUs aleatoriamente. Este mecanismo determina e autoriza qual estação poderá transmitir, e em qual RU a estação propõe-se transmitir, é denominado método OBO (*OFDMA Back-Off*). A Figura 3 ilustra esse processo, incluindo a alocação de RUs e os casos de colisão entre estações que escolhem a mesma unidade de recurso. [8]

Figura 3 – Acesso aleatório em uplink OFDMA.



Fonte: Triggered OFDMA Random Access Observations [8]

A escolha do valor aleatório da janela de contenção, é realizada no instante em que a estação necessita acessar o canal OFDMA no *uplink*. Esta escolha tem como objetivo evitar que transmissões simultâneas vindas de diversos terminais provoquem interferência entre si, cujos parâmetros são assimilados e especificados pelo AP por meio de *frame trigger* [8], sendo que cada *frame trigger* da estação decremente o valor pelo número de RUs especificadas no mesmo, até que ele atinja o valor zero. No próximo momento, para que o quadro seja transmitido com sucesso, a estação seleciona aleatoriamente uma RU. Para melhorar a eficiência de energia, o AP pode definir um ou mais tempos alvo de ativação de *frame trigger* [9].

O TGax (*Task Group 802.11*) trabalha com objetivo de reduzir a sobrecarga causada pelo acesso ao canal vista em versões anteriores, como o canal distribuído aprimorado EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*). Os recuos de espaçamento entre estruturas RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*) e colisões são uma das causas que reduzem consideravelmente a eficiência do espectro quando submetido a altas taxas de dados [10].

Estudos propõem um mecanismo chamado lista (*roster*), que implementa o conceito de passagem de token. Especialmente, o AP aloca intervalos de tempo quando apenas estações da lista podem transmitir. Além disso, as transmissões são realizadas seguindo uma ordem previamente definida. A proposta também descreve como construir a lista e mantê-la no caso

de estações ocultas. Assim, a lista reduz o tempo de colisões ou canal inativo, por exemplo, o HCCA (*HCF Controlled Channel Access*) e o MCCA (*MCF Controlled Access*) [10].

2.2.5 Target Wake Time

A função TWT (*Target Wake Time*) permite ao AP negociar com as estações a fim de definir um horário, ou conjunto de horários, nos quais essas estações poderão acessar o meio de transmissão. O padrão IEEE 802.11ax define dois tipos de TWT: o TWT individual e o TWT *broadcast*.

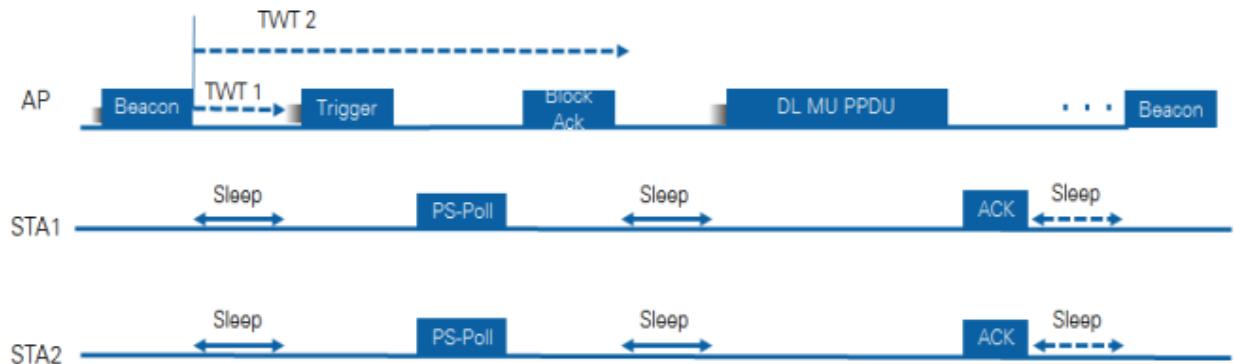
O TWT individual é aquele em que a negociação é realizada entre duas estações, sendo que uma assume a função de estação de agendamento TWT, e as demais assumem o papel de estações agendadas de TWT. O TWT *Broadcast* ocorre quando esta negociação é realizada entre um AP, na função de estação de agendamento de TWT, e as demais estações no papel de estações agendadas de TWT [7].

O AP é o principal gerenciador das estações, no que diz respeito ao acesso ao canal. Com a função TWT, ele cria um grupo de horários para que as estações acessem o meio de transmissão de maneira ordenada. Assim, por meio da função TWT, a economia de energia nas estações ocorre no instante em que o AP controla o nível de concorrência e sobreposição entre as estações. Com isso, estações não autorizadas a acessar o canal entram num estado de hibernação até a chegada do TWT correspondente. Além disso, um AP pode criar programações e fornecer valores de TWT às estações sem ter acordos individuais de TWT com elas.

A Figura 4 ilustra o funcionamento do TWT *Broadcast*, uma técnica usada para otimizar a economia de energia em redes Wi-Fi. O AP envia *Beacons* para sincronizar as estações, informando o horário de despertar (TWT1 e TWT2). Quando o AP detecta a presença de estações, ele envia um sinal de *Trigger* para iniciar a comunicação.

As estações, STA1 e STA2, saem do modo *Sleep* e enviam um pedido de dados (*PS-Poll*). O AP então responde com a transmissão de dados em formato DL MU PPDU. Após receber os dados, as estações retornam ao modo *Sleep*, economizando energia. O ciclo se repete com o envio de novos *Beacons* e *Triggers*. Cada fase de comunicação é coordenada, permitindo um gerenciamento eficiente do tempo de atividade e descanso das estações.

Figura 4 – Exemplo de Operação TWT Broadcast.



Fonte: “Airtime Analysis of EDCA” [10]

2.3 Considerações Finais

Tendo visto toda a caracterização dos principais aspectos e evoluções do padrão IEEE 802.11ax é possível entender a importância do mesmo na atualidade e, consequentemente, a real motivação do trabalho e a escolha do seu tema.

Tal assunto possui uma ampla gama de possibilidades de estudo, como os investimentos na aquisição de novos hardwares, tempo gasto para a implantação do padrão e evolução dos padrões ao longo do tempo. No presente trabalho, foi escolhido como tema a simulação de uma rede sem fio do padrão IEEE 802.11ax no software de simulação de redes NS-3 para destacar características de funcionamento do mesmo, de forma a serem realizadas análises, posteriormente, a respeito do seu desempenho e comprovação da evolução e melhorias do padrão escolhido em relação aos anteriores.

Com a compreensão das principais características e inovações do padrão IEEE 802.11ax, abordadas no Capítulo 2, pode-se agora avançar para a etapa prática de simulação descrita no próximo capítulo. No Capítulo 3, são apresentados os métodos e materiais utilizados para a simulação da rede sem fio no ambiente NS-3, destacando os parâmetros de configuração e as variáveis que influenciam o desempenho da rede. Essa transição teórica para a aplicação prática é fundamental para validar as melhorias propostas pelo padrão 802.11ax em cenários simulados, proporcionando uma análise detalhada dos resultados.

3 MÉTODOS E MATERIAIS

3.1 Trabalhos Relacionados

A simulação de redes Wi-Fi é uma abordagem fundamental para avaliar o desempenho, testar novas tecnologias e compreender o comportamento de redes sem fio em diversos cenários. Diversos estudos acadêmicos e ferramentas especializadas têm sido desenvolvidos para esse fim, proporcionando *insights* valiosos sem a necessidade de implementar redes físicas complexas.

Um exemplo notável é o trabalho intitulado "O Uso de Simuladores no Ensino de Redes de Computadores", que destaca a importância dos simuladores no ensino prático de redes em cursos de graduação e técnicos. O estudo enfatiza como os simuladores de redes complementam o ensino, especialmente diante de restrições orçamentárias para a montagem de laboratórios físicos completos. Foram utilizados três dos principais simuladores de redes de computadores existentes, demonstrando a eficácia dessas ferramentas no ambiente educacional [19].

Outro estudo relevante é "Simulação e Avaliação de uma Rede de Computadores Utilizando o Protocolo de Internet Versão 6", que apresenta a implementação e avaliação de uma rede utilizando o IPv6. Este trabalho exemplifica como a simulação pode ser empregada para analisar o desempenho de novas implementações de protocolos em redes de computadores [20].

Diversas ferramentas têm sido desenvolvidas para simulação de redes Wi-Fi, cada uma com características específicas que atendem a diferentes necessidades de pesquisa e ensino.

O NS-3 é um simulador de redes baseado em eventos discretos, desenvolvido especialmente para pesquisa e uso educacional. Iniciado em 2006, o projeto é de código aberto e tem sido amplamente utilizado para simular redes de computadores, incluindo redes sem fio como o Wi-Fi. Sua flexibilidade e precisão permitem a modelagem detalhada de diversos cenários de rede, tornando-o uma ferramenta valiosa para pesquisadores e educadores.

O OMNeT++ é um ambiente de simulação modular e extensível, amplamente utilizado para simulações de redes de comunicação, sistemas distribuídos e outras arquiteturas de sistemas complexos. Sua arquitetura baseada em componentes facilita a modelagem de redes Wi-Fi, permitindo a criação de simulações detalhadas e personalizadas.

O OPNET Modeler é uma ferramenta de simulação comercial que oferece um ambiente abrangente para modelagem e análise de redes de comunicação. Com suporte para uma ampla

gama de tecnologias de rede, incluindo Wi-Fi, o OPNET permite aos usuários avaliar o desempenho de redes e aplicações em diversos cenários.

O QualNet é um simulador de rede de alta fidelidade que permite a modelagem de redes com milhares de nós. É especialmente útil para simulações de redes sem fio, incluindo Wi-Fi, oferecendo um ambiente escalável e eficiente para análise de desempenho e desenvolvimento de protocolos.

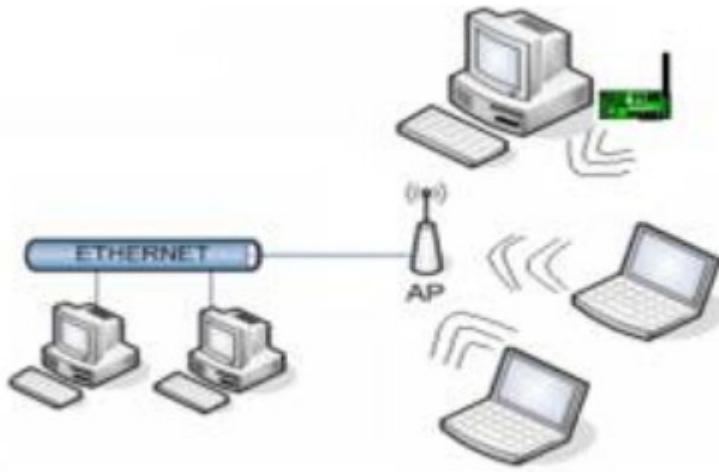
A utilização de simuladores é essencial para o estudo e desenvolvimento de redes Wi-Fi, permitindo a análise de desempenho, teste de novos protocolos e compreensão de comportamentos complexos sem a necessidade de infraestruturas físicas extensivas. Dentre as diversas ferramentas disponíveis, o NS-3 foi escolhido para este trabalho devido à sua flexibilidade, código aberto e ampla adoção na comunidade acadêmica e científica. Além disso, o NS-3 oferece suporte detalhado para a simulação do padrão IEEE 802.11ax, permitindo a modelagem realista de cenários de redes sem fio em diferentes condições operacionais. Sua capacidade de integração com outras tecnologias, aliada à precisão nos resultados, torna-o uma escolha ideal para avaliar o desempenho do Wi-Fi 6 em ambientes variados. Assim, o uso do NS-3 neste estudo contribui para uma análise detalhada e confiável do padrão IEEE 802.11ax, fortalecendo a compreensão de seus benefícios e desafios no contexto atual das redes de comunicação.

3.2 Metodologia

Como mencionado no capítulo anterior, o objetivo do trabalho se resume na simulação de uma rede sem fio padrão IEEE 802.11ax, utilizando o software de simulação de redes NS-3 (*Network Simulator – 3*) em modo infraestrutura conforme a Figura 5. Nesse modo, os dispositivos dos usuários se conectam a um ponto de acesso, que faz a redistribuição da rede para um roteador de borda ou para outra rede Ethernet.

O simulador escolhido foi o NS-3 devido sua flexibilidade, precisão e ampla adoção na pesquisa acadêmica e industrial. Sendo um simulador de código aberto, ele permite a modelagem detalhada do padrão IEEE 802.11ax, oferecendo suporte a funcionalidades essenciais. Além disso, o NS-3 possibilita a personalização dos cenários de simulação, permitindo a análise detalhada do desempenho da rede sob diferentes condições, tornando a escolha ideal para avaliar a eficiência e os benefícios do 802.11ax em um ambiente controlado.

Figura 5 – Topologia Infra Estruturada



Fonte: SANTOS JUNIOR, 2009 [13]

Para a realização do trabalho foi assumido que os dados foram gerados por uma aplicação de rede com taxa de 100Mbps. Essa taxa foi definida para garantir que a rede estivesse sob uma carga constante, permitindo a avaliação do desempenho da rede sob diferentes condições, como variação da distância entre a estação e o ponto de acesso, a largura de banda, e o protocolo de camada de transporte (TCP ou UDP). Um código aberto, disponibilizado no Anexo 1, escrito em linguagem C++, disponível no site da empresa desenvolvedora do NS-3 foi utilizado para a implementação da rede descrita no mesmo [18].

O objetivo principal foi obter as curvas de variação de vazão em função da distância entre a estação de usuário e o ponto de acesso e em função da largura de banda utilizada e, a partir dessas curvas chegar às conclusões a respeito da vazão de dados permitida para esse padrão de rede sem fio de acordo com a variação de alguns parâmetros.

Para a construção de uma rede sem fio, padrão 802.11ax operando no modo infraestrutura foi utilizado, como dito anteriormente, o software NS-3 v3.29 em uma máquina virtual Ubuntu. Para a construção e definição dos elementos presentes nessa rede sem fio foi utilizado um código escrito em linguagem C++ disponibilizado na página web do simulador. No entanto, alterações em alguns parâmetros do código foram necessárias para a correta adequação aos requisitos, o que foi possível, já que o código é aberto.

A Tabela 1 mostra os parâmetros principais que foram alterados ao longo do trabalho.

Tabela 1 – Parâmetros alterados durante o trabalho.

<code>bool udp = false;</code>	Especifica o protocolo utilizado. (TCP ou UDP)
<code>double distance = 10.0;</code>	Distância em metros entre a estação e o ponto de acesso.
<code>double frequency = 5.0</code>	Especifica a distância utilizada. (2,4 GHz ou 5,0 GHz)
<code>phy.Set("TxGain", DoubleValue(10));</code>	Especifica o ganho de transmissão em dBi
<code>phy.Set("RxGain", DoubleValue(5));</code>	Especifica o ganho de recepção em dBi

Fonte: A autora.

Na primeira parte do trabalho foram obtidos valores de vazão em Mbps em função da largura de banda do canal (20MHz, 40MHz, 80MHz e 160MHz) para índices MCS variando de 0 a 10 e intervalos de guarda de 3200ns, 1600ns e 800ns tanto para o protocolo UDP quanto para o protocolo TCP. Foi utilizado a frequência central de 5 GHz, 1 metro de distância padrão entre os nós e geração fixa de dados de 100Mbps por uma aplicação de rede, como mencionado anteriormente. Para essa etapa do código foi necessário alterar apenas a variável que habilita ou desabilita o protocolo UDP.

Na segunda parte do trabalho foram apresentados os resultados de vazão para cada índice MCS utilizando as distâncias entre a STA e o AP de 10m, 20m, 40m e 80m, por meio do protocolo TCP. Desse modo foram obtidos dados para cada índice MCS em função da distância, para diferentes valores de largura de banda e diferentes intervalos de guarda.

Foi necessário adicionar um ganho tanto para a antena transmissora quanto para a receptora, com o intuito de garantir a qualidade do serviço em distâncias mais longas, que são o foco deste trabalho. O valor escolhido foi de 10 dBi para a transmissão e 5 dBi para a recepção. O ganho elevado de 10 dBi na antena transmissora foi selecionado especificamente para maximizar o alcance do sinal em distâncias maiores, concentrando a energia em uma direção mais focada, o que resulta em uma cobertura eficiente para longos trajetos. Antenas como a *Wilson Wide Band Directional Antenna*, projetadas para aplicações externas, são exemplos de modelos que utilizam esse tipo de ganho para aumentar o alcance de transmissão, direcionando o sinal de forma mais concentrada. Essas antenas são ideais para ambientes que exigem maior cobertura e propagação eficiente em cenários de grande distância, justamente o objetivo da simulação realizada neste trabalho [12].

Além disso, a simulação possui uma condição de parar quando um valor de vazão é teoricamente inesperado, ou seja, quando um próximo valor de vazão que deveria ser maior que o anterior é menor que o mesmo. Isso ocorreu para as distâncias maiores antes da inserção do

ganho, por isso a necessidade da inserção do mesmo, já que o intuito era simular uma quantidade considerável para melhor análise, até com as grandes distâncias.

3.3 Considerações Finais

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas distintas. Na primeira etapa, foi realizada a análise da vazão de dados em função da largura de banda do canal, variando os índices de (MCS) e os intervalos de guarda, utilizando tanto o protocolo TCP quanto o protocolo UDP. Nessa fase, buscou-se avaliar o impacto da combinação desses parâmetros no desempenho da rede, levando em consideração as características de cada protocolo, como a confiabilidade do TCP e a simplicidade do UDP.

Na segunda etapa, o foco foi a obtenção dos valores de vazão com base nos diferentes índices MCS, considerando quatro distâncias distintas entre a STA e o AP - 10m, 20m, 40m e 80m. Além disso, foi realizada a variação da largura de banda e dos intervalos de guarda para cada distância, de modo a investigar como esses parâmetros influenciam o desempenho da rede em termos de vazão, considerando cenários com diferentes configurações e distâncias crescentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

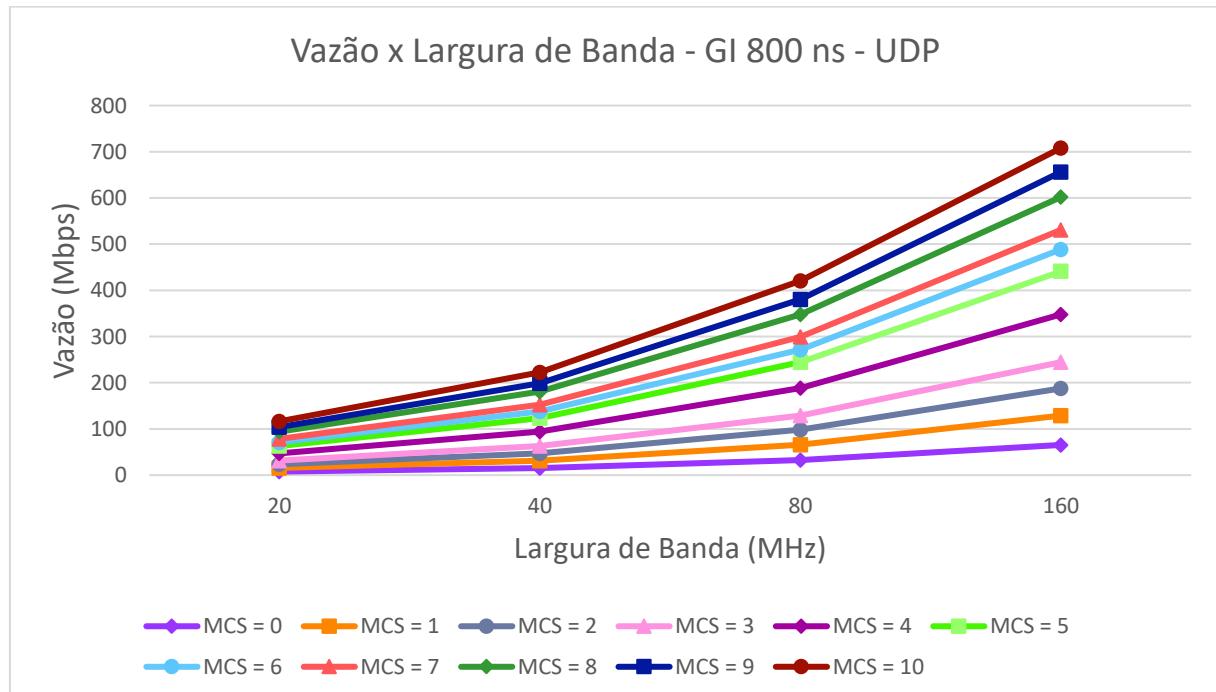
A primeira parte do trabalho trata da simulação de uma rede 802.11ax em modo infraestrutura, obtendo dados de vazão em função da largura de banda usando os protocolos TCP e UDP, fixando em 1 metro a distância entre a STA e o AP, e utilizando a frequência de 5 GHz. A segunda etapa do trabalho consiste em obter dados de vazão em função do índice MCS para as distâncias entre a STA e o AP de 10, 20, 40 e 80 metros. Em seguida analisa-se os resultados das duas etapas separadamente.

4.1 Parte 1

A Tabela 2, cujos dados estão detalhados no Apêndice 1, contém os valores de Vazão [Mbps] no sentido *downlink*, ou seja, do AP para o STA, obtidos usando o protocolo UDP, considerando uma distância de 1 metro entre a STA e o AP e adotando a frequência de 5GHz.

Através dos dados da mesma foi possível gerar os gráficos das Figuras 6, 7 e 8, onde é representada a Vazão em função da Largura de Banda para um Intervalo de Guarda de 800ns, 1600ns e 3200ns, respectivamente.

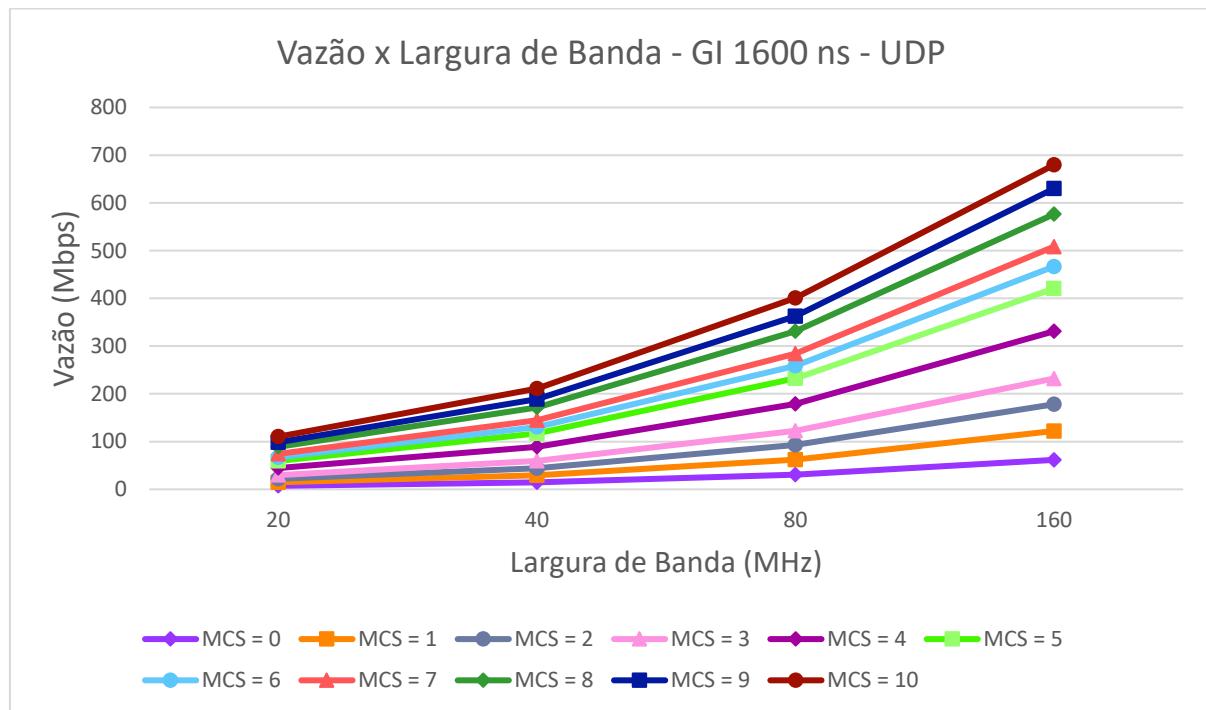
Figura 6 – Vazão em função da Largura de Banda para GI = 800ns e protocolo UDP.



Na Figura 6, a vazão foi analisada em função da largura de banda, utilizando um intervalo de guarda de 800ns. Observa-se que, conforme a largura de banda aumenta (de 20

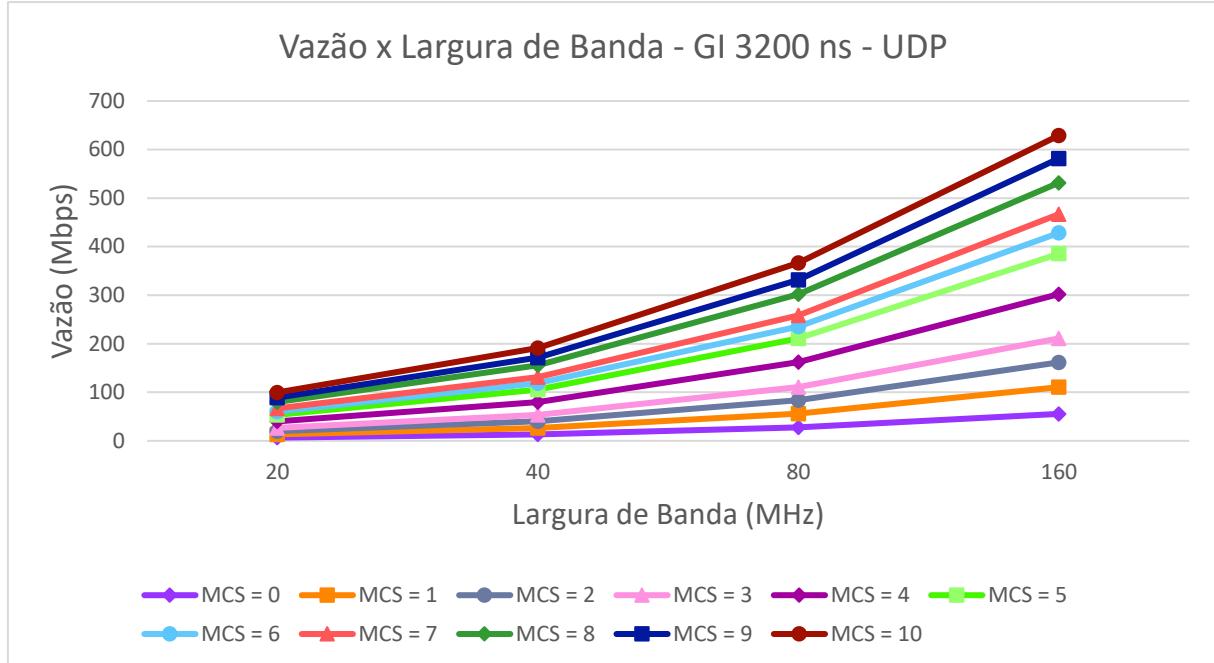
MHz para 160 MHz), a vazão também cresce de forma significativa. Isso ocorre porque uma maior largura de banda permite a inclusão de mais subportadoras, resultando em uma maior taxa de transmissão de dados. Essa relação direta entre largura de banda e vazão é esperada, especialmente em redes que utilizam o protocolo UDP, uma vez que este protocolo não realiza controle de congestionamento, permitindo uma transmissão sem interferência de tal controle. O GI de 800ns oferece uma boa multiplexação de pacotes, favorecendo a alta vazão.

Figura 7 – Vazão em função da Largura de Banda para GI = 1600ns e protocolo UDP.



Na Figura 7, o intervalo de guarda foi aumentado para 1600ns. Com esse aumento, a interferência entre pacotes é reduzida, mas isso também resulta em uma eficiência temporal menor, o que se reflete em uma leve diminuição na vazão comparada ao GI de 800ns. Ainda assim, a relação entre a largura de banda e a vazão permanece visível: à medida que a largura de banda aumenta, a vazão também cresce, embora os valores sejam ligeiramente menores em comparação à configuração com o GI mais curto. A redução da vazão é uma consequência esperada, dado que o tempo de guarda maior reduz o tempo disponível para transmissão efetiva.

Figura 8 – Vazão em função da Largura de Banda para GI = 3200ns e protocolo UDP.



Por fim, na Figura 8, com o intervalo de guarda ajustado para 3200ns, observa-se uma redução ainda mais significativa na vazão. Esse intervalo de guarda maior compromete ainda mais a eficiência temporal da transmissão, resultando em uma vazão inferior em relação aos cenários anteriores. No entanto, a relação entre largura de banda e vazão ainda se mantém: à medida que a largura de banda cresce, a vazão também aumenta. O impacto do GI é claro, mostrando que, embora intervalos de guarda maiores ajudem a mitigar interferências, eles comprometem a eficiência da transmissão ao alocar mais tempo para a redução de interferências, em detrimento da transmissão de dados.

Com base nessas três figuras, conclui-se que o aumento da largura de banda sempre resulta em uma vazão maior, independentemente do intervalo de guarda. No entanto, intervalos de guarda menores (como o de 800ns) proporcionam maior eficiência de transmissão, enquanto intervalos maiores (como 1600ns e 3200ns) reduzem a vazão por conta do tempo adicional alocado para evitar interferências.

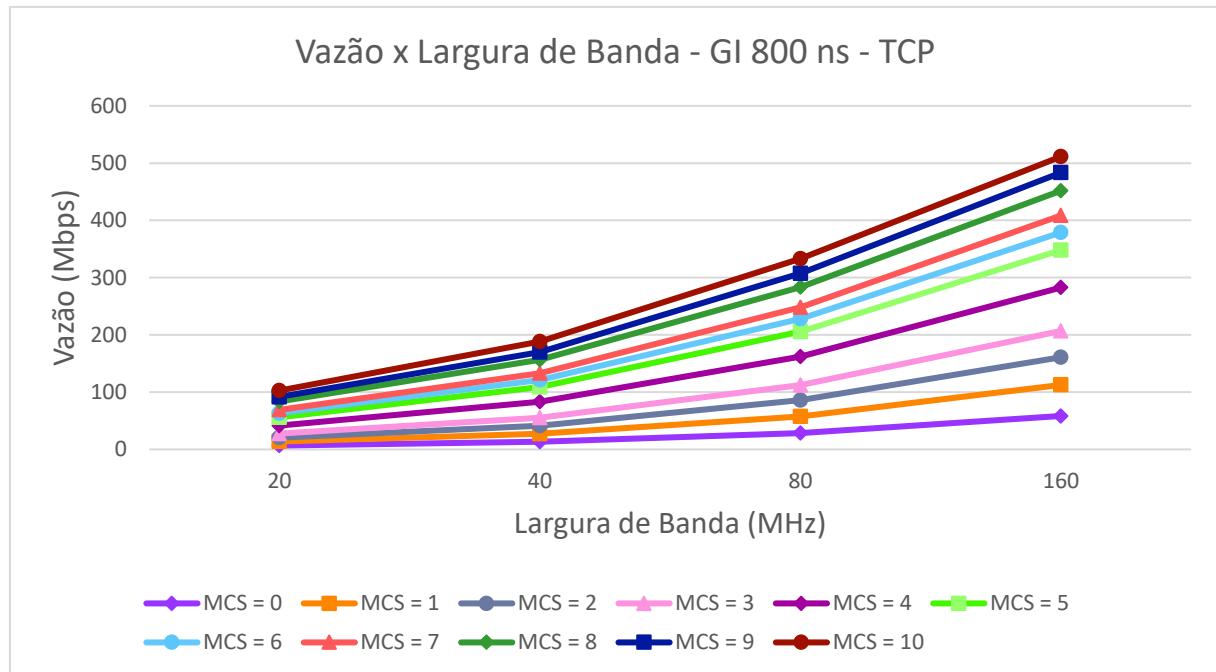
A escolha do intervalo de guarda, portanto, envolve um balanço entre mitigação de interferências e eficiência de transmissão. No cenário simulado, com apenas um AP e uma STA, o menor intervalo de guarda foi suficiente para garantir a eficiência máxima de transmissão, já que a interferência era mínima. No entanto, em situações com uma quantidade maior de STAs e APs, onde as interferências são mais significativas, os resultados poderiam ser diferentes, e

intervalos de guarda maiores poderiam se tornar necessários para garantir a qualidade da transmissão.

A Tabela 3, cujos dados estão detalhados no Apêndice 1, contém os valores de Vazão [Mbps] obtidos usando o protocolo TCP, considerando uma distância de 1 metro entre a STA e o AP e adotando a frequência de 5GHz.

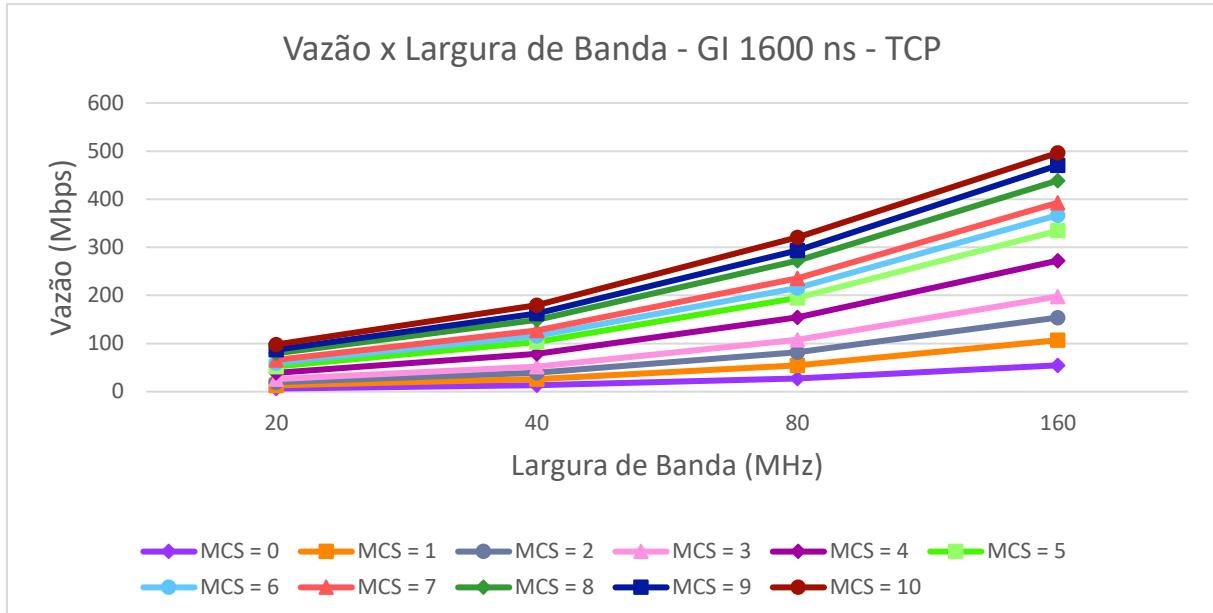
Através dos dados apresentados na Tabela 3, foi possível gerar os gráficos das Figuras 9, 10 e 11, onde é representada a Vazão em função da Largura de Banda para um Intervalo de Guarda de 800ns, 1600ns e 3200ns, respectivamente.

Figura 9 – Vazão em função da Largura de Banda para GI = 800ns e protocolo TCP.



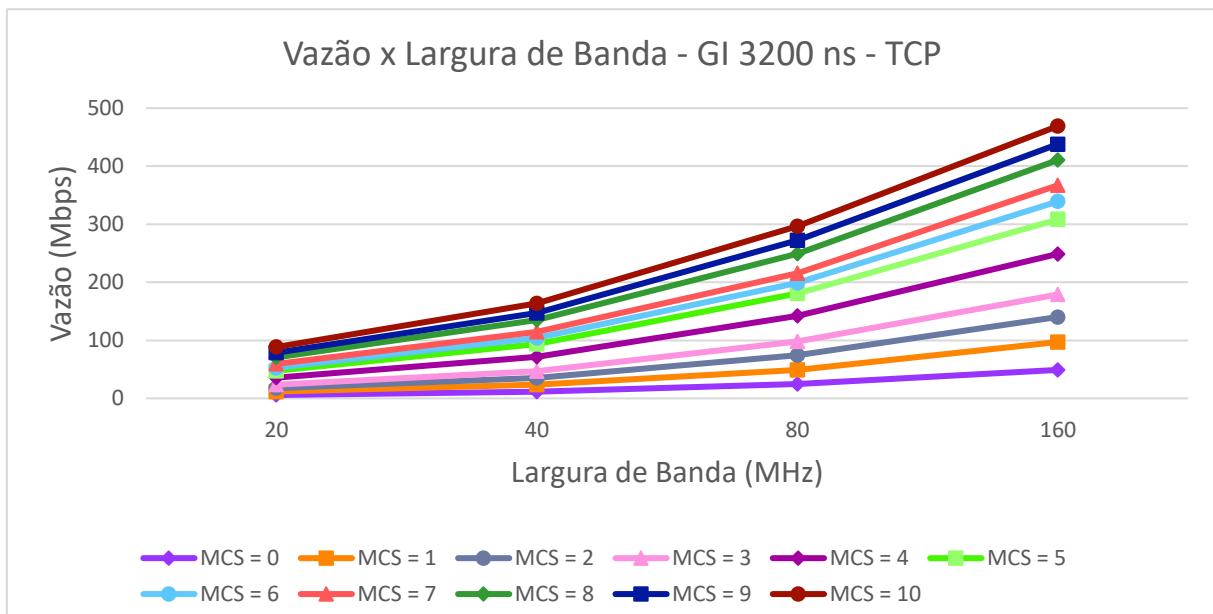
Na Figura 9 são apresentados os resultados da vazão em função da largura de banda para um intervalo de intervalos de guarda de 800ns, utilizando o protocolo TCP. Observa-se que, conforme a largura de banda aumenta (de 20MHz para 160MHz), a vazão também cresce significativamente. Entretanto, a vazão geral é menor em comparação ao protocolo UDP, devido à natureza do TCP, que implementa controle de congestionamento e garante a entrega confiável dos pacotes. Essas características tornam o TCP menos eficiente em termos de taxa de transmissão pura, mas essencial para garantir a entrega dos dados, especialmente em redes sujeitas a erros e perdas de pacotes.

Figura 10 – Vazão em função da Largura de Banda para GI = 1600ns e protocolo TCP.



Na Figura 10, a análise da vazão foi realizada com o GI aumentado para 1600ns, mantendo o protocolo TCP. O aumento do intervalo de guarda reduz a interferência entre pacotes, porém compromete a eficiência temporal, resultando em uma diminuição da vazão em relação ao GI de 800ns. Apesar disso, a relação entre a largura de banda e a vazão permanece evidente, com a vazão crescendo à medida que a largura de banda aumenta. Essa diminuição de desempenho com o aumento do GI é esperada, uma vez que o intervalo de guarda maior aloca mais tempo para evitar interferências, reduzindo a eficiência de transmissão.

Figura 11 – Vazão em função da Largura de Banda para GI = 3200ns e protocolo TCP.



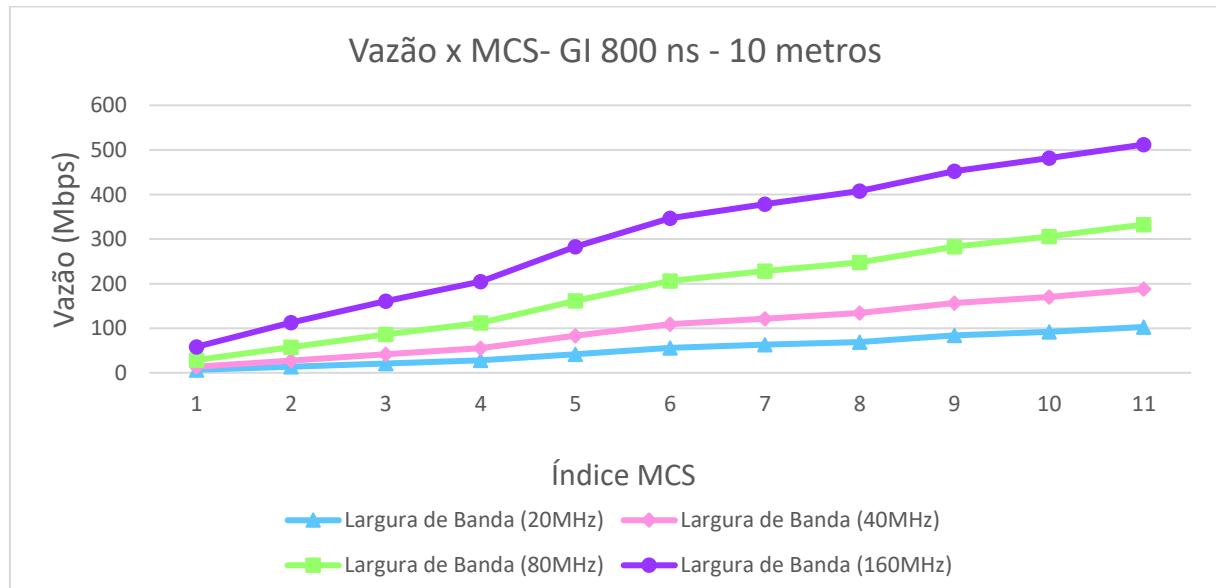
Na Figura 11, o GI foi aumentado para 3200ns, e, como esperado, a vazão se torna ainda menor. O TCP, por sua própria natureza, adiciona uma camada extra de "burocracia", já que realiza verificações e confirmações de entrega dos pacotes, o que afeta diretamente a taxa de transmissão. Ao aumentar o intervalo de guarda para 3200ns, há um impacto significativo na eficiência temporal, resultando em uma vazão substancialmente menor. No entanto, a relação direta entre o aumento da largura de banda e o aumento da vazão permanece, mesmo que a magnitude dos ganhos seja menor em comparação com os cenários de GI mais curto.

A partir das Figuras 9, 10 e 11, pode-se concluir que a vazão é diretamente proporcional à largura de banda, independentemente do intervalo de guarda. No entanto, intervalos de guarda menores, como 800ns, proporcionam maior eficiência na transmissão de dados, enquanto intervalos maiores, como 1600ns e 3200ns, comprometem a eficiência da transmissão, resultando em vazões mais baixas. Além disso, o protocolo TCP, por priorizar a confiabilidade na entrega dos pacotes, resulta em vazões menores em comparação ao UDP, o que é esperado devido à sua natureza de controle de congestionamento e confirmação de pacotes.

4.2 Parte 2

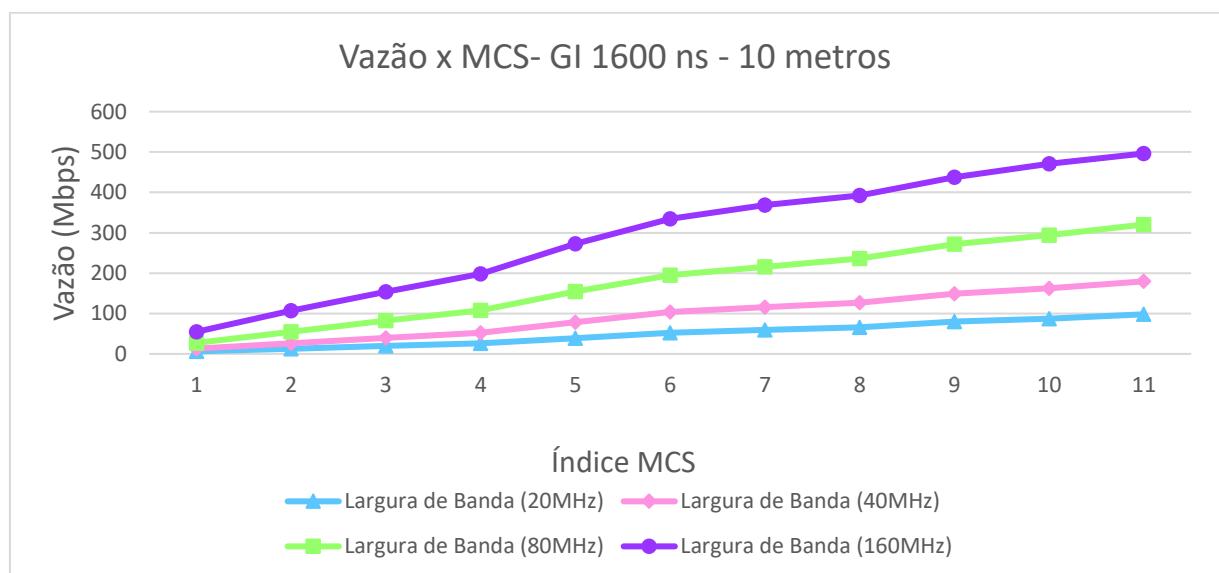
As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentadas no Apêndice 1, contém os dados de Vazão para cada Índice MCS, Largura de Banda, Intervalo de Guarda e Distância entre a STA e o AP, utilizando o protocolo TCP.

Figura 12 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 10m e GI = 800ns.



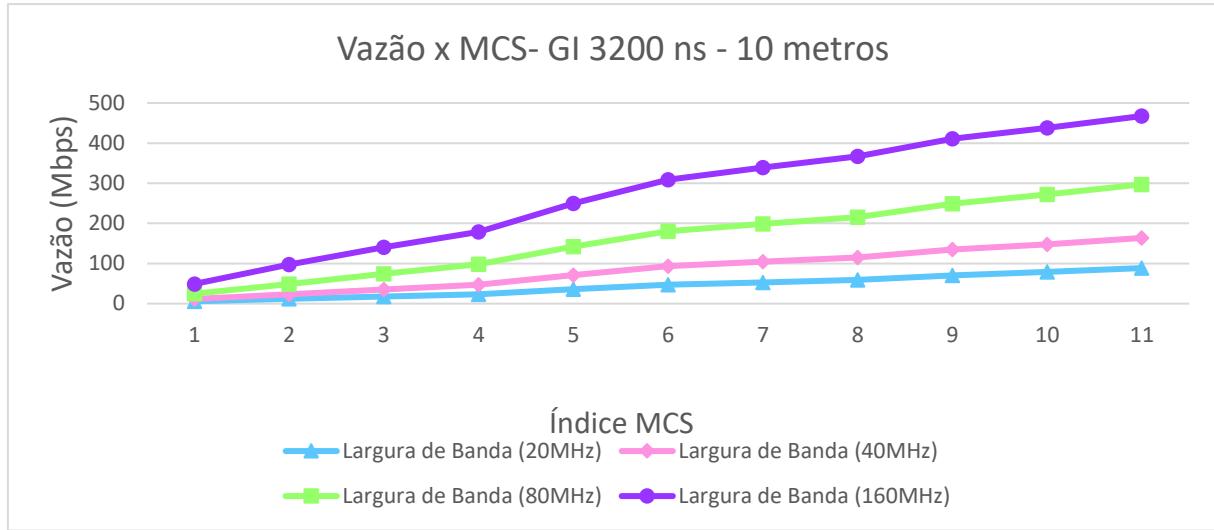
Na Figura 12, são apresentados os resultados da vazão em função do índice MCS para uma distância de 10 metros e um intervalo de guarda de 800ns. Observa-se que, à medida que o índice MCS aumenta, a vazão também cresce de forma significativa. Isso ocorre porque índices de MCS mais elevados utilizam técnicas de modulação mais sofisticadas e eficientes, resultando em uma maior taxa de transmissão de dados. Além disso, com um GI mais curto, há menos tempo de inatividade entre os pacotes, o que contribui para o aumento da vazão, especialmente em distâncias mais curtas como 10 metros.

Figura 13 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 10m e GI = 1600ns.



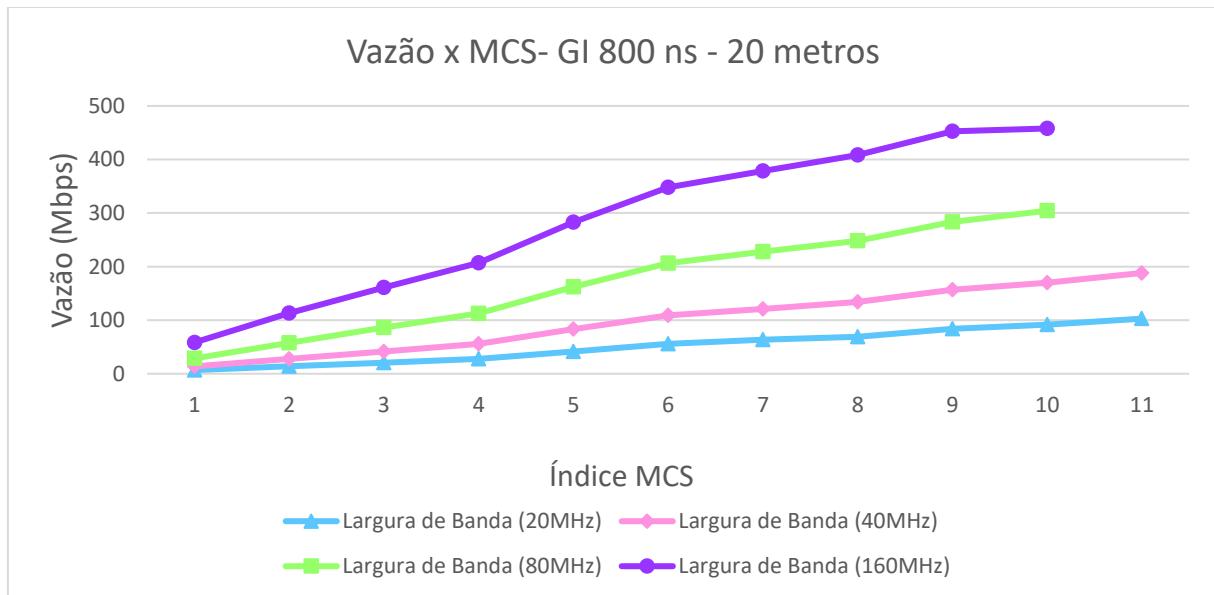
Na Figura 13, o intervalo de guarda foi aumentado para 1600ns, mantendo a mesma distância de 10 metros. O impacto desse aumento no GI é perceptível, com uma redução na vazão em comparação ao GI de 800ns. Embora a vazão ainda aumente com o índice MCS, o maior tempo de guarda entre os pacotes diminui a eficiência temporal da transmissão, resultando em uma vazão inferior, especialmente em índices de MCS mais altos.

Figura 14 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 10m e GI = 3200ns.



Por fim, na Figura 14, o GI foi ampliado para 3200ns. Como esperado, a vazão diminui ainda mais em comparação às configurações anteriores. O intervalo de guarda maior afeta diretamente a capacidade de multiplexar pacotes, resultando em um tempo maior entre cada transmissão e, consequentemente, uma redução da vazão. Ainda assim, observa-se a mesma relação entre o aumento do índice MCS e o aumento da vazão, mas a eficiência global é prejudicada pelo GI de 3200ns.

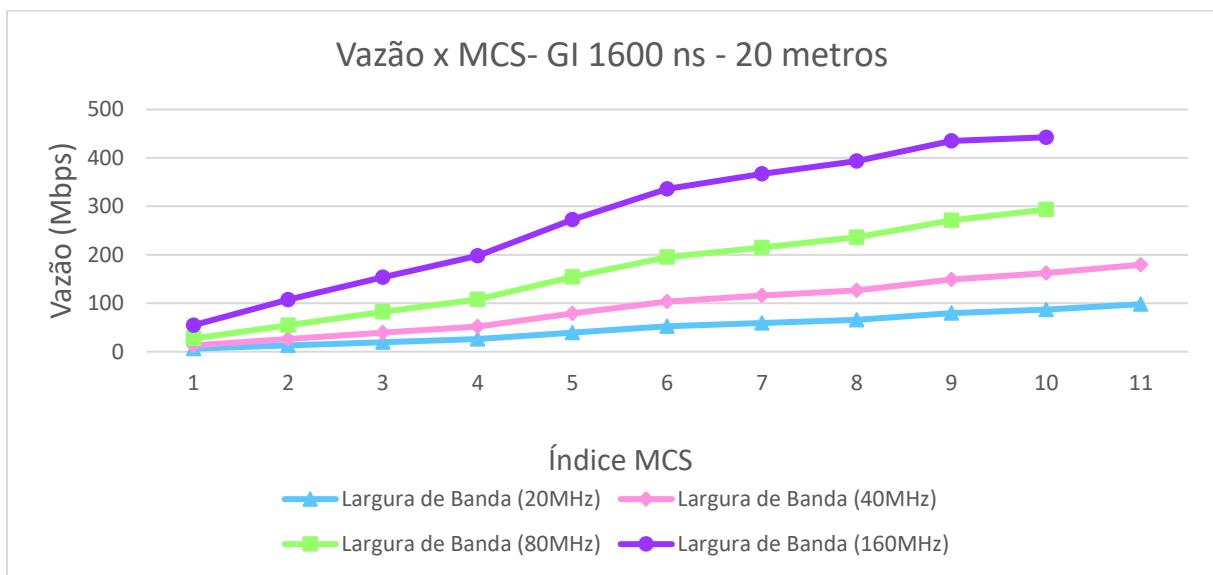
Figura 15 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 20m e GI = 800ns.



Na Figura 15, são apresentados os resultados da vazão em função do índice MCS para uma distância de 20 metros e um intervalo de guarda de 800ns. A relação direta entre o aumento

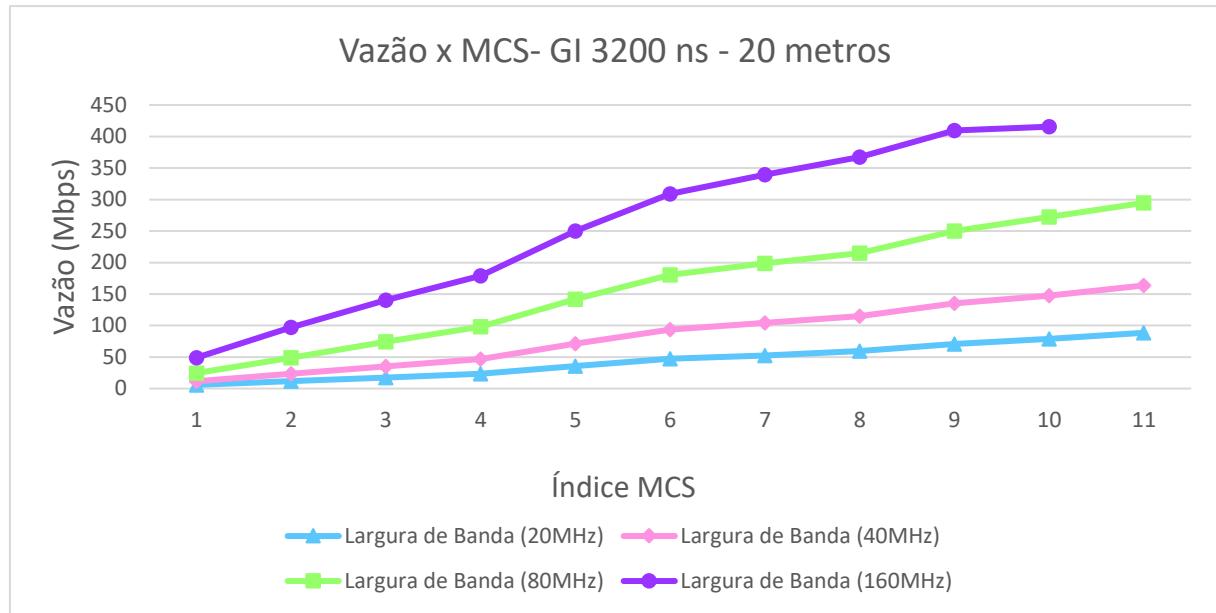
do índice MCS e a vazão permanece evidente, tal como observado em distâncias menores. No entanto, à medida que a distância aumenta para 20 metros, a vazão total começa a diminuir levemente em comparação com a distância de 10 metros. Isso ocorre porque a maior distância provoca mais perda de sinal, afetando o desempenho da rede. O GI de 800ns, sendo curto, ainda permite uma boa eficiência de transmissão temporal, mas a distância começa a impactar a qualidade do sinal.

Figura 16 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 20m e GI = 1600ns.



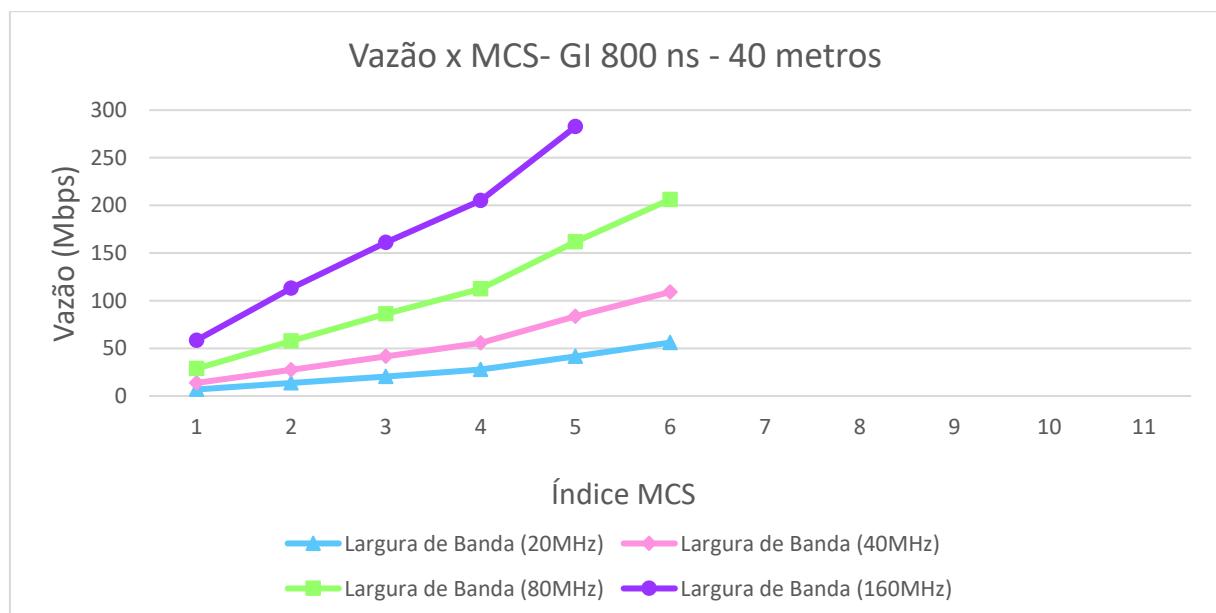
Na Figura 16, o intervalo de guarda foi aumentado para 1600ns, mantendo a mesma distância de 20 metros. Com esse aumento no GI, observa-se uma redução mais acentuada na vazão em relação ao GI de 800ns. A maior distância combinada com um intervalo de guarda mais longo compromete a eficiência temporal, resultando em uma queda na taxa de transmissão de dados. Mesmo assim, a relação entre o índice MCS e o aumento da vazão permanece evidente, mas em uma escala menor devido às limitações impostas pela distância e pelo maior intervalo de guarda.

Figura 17 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 20m e GI = 3200ns.



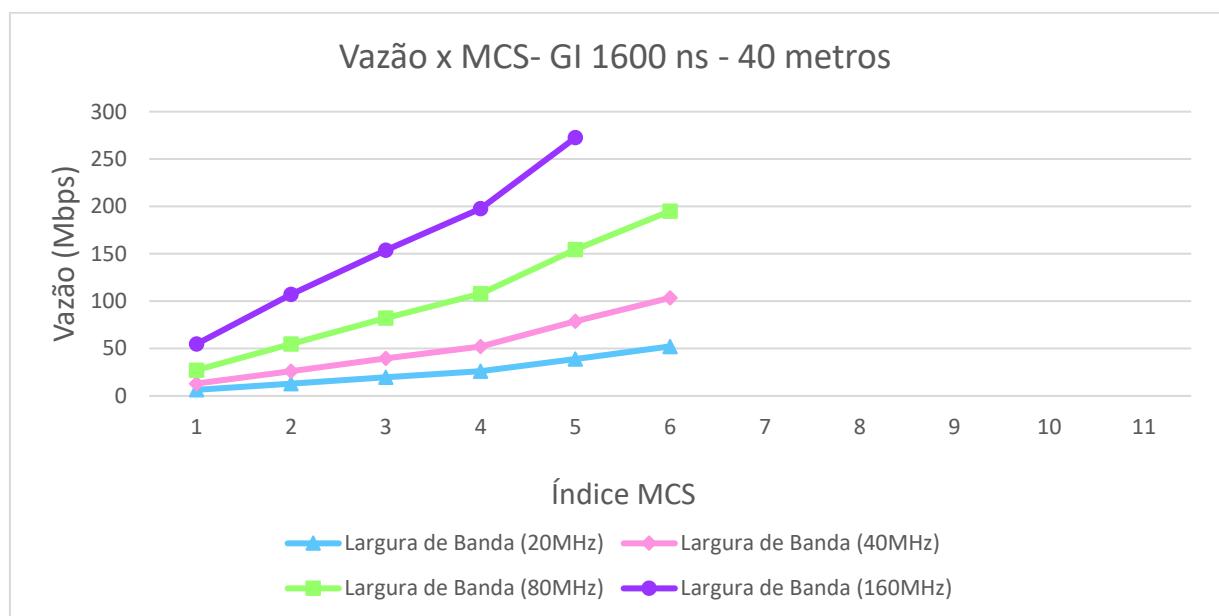
Na Figura 17, o intervalo de guarda foi aumentado para 3200ns. Aqui, a combinação da maior distância (20 metros) com o intervalo de guarda mais longo resulta em uma queda ainda mais significativa na vazão. O impacto do GI de 3200ns é claro, pois o tempo de inatividade entre os pacotes é maior, reduzindo ainda mais a eficiência da transmissão. Embora a relação entre o índice MCS e a vazão continue a existir, os ganhos de vazão são menores em comparação aos cenários com GI menores. Isso reforça o papel do intervalo de guarda e da distância no desempenho da rede.

Figura 18 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 40m e GI = 800ns.



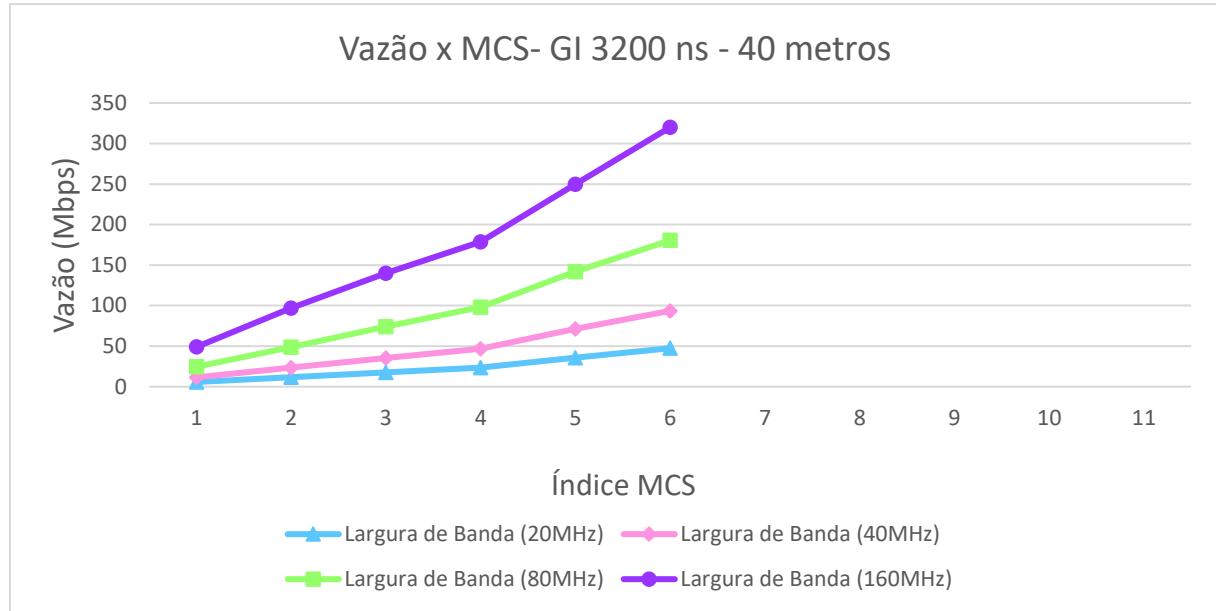
Na Figura 18, a vazão é apresentada em função do índice MCS para uma distância de 40 metros e um intervalo de guarda de 800ns. Observa-se que, conforme o índice MCS aumenta, a vazão também cresce, especialmente para larguras de banda maiores. No entanto, a transmissão se torna instável em MCS mais elevados, resultando na ausência de valores para esses índices. Esse comportamento sugere que, embora o GI de 800ns permita uma boa eficiência de transmissão em MCS baixos e médios, a combinação de maior distância e larguras de banda maiores limita a capacidade de suportar índices MCS mais elevados.

Figura 19 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 40m e GI = 1600ns.



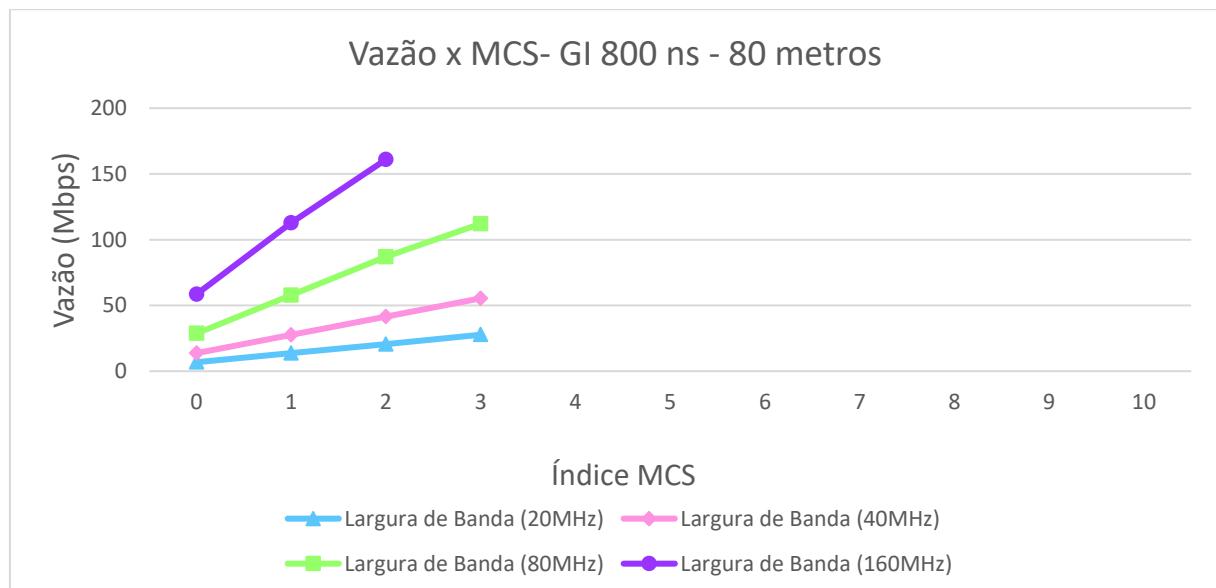
Na Figura 19, com o intervalo de guarda aumentado para 1600ns, a eficiência de transmissão diminui. Isso é evidenciado pela redução na vazão em comparação ao GI de 800ns. Em distâncias de 40 metros, a combinação de maior intervalo de guarda e aumento da distância provoca uma queda mais acentuada na vazão, já que mais tempo é necessário para prevenir interferências entre os pacotes. Mesmo assim, a relação entre o índice MCS e o aumento da vazão permanece, embora os ganhos sejam menores em comparação aos cenários com GI menor.

Figura 20 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 40m e GI = 3200ns.



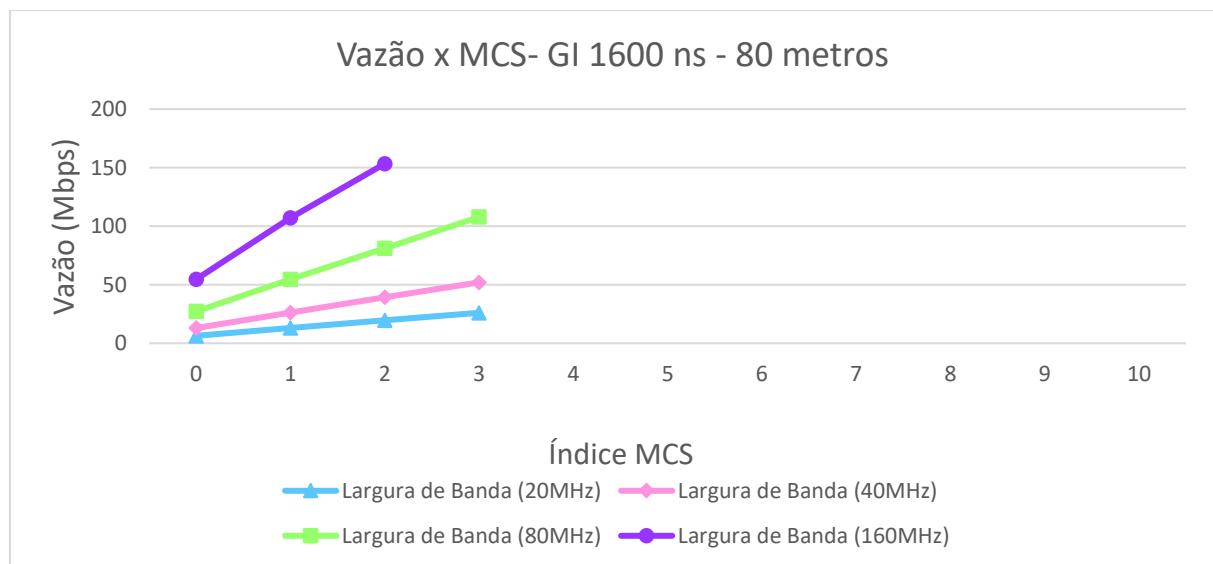
Finalmente, na Figura 20, o intervalo de guarda foi aumentado para 3200ns. Nesse cenário, a vazão é ainda menor devido ao tempo adicional dedicado ao intervalo de guarda, o que reduz a eficiência da transmissão temporal. Com a distância de 40 metros e o GI mais alto, a rede enfrenta dificuldades maiores para manter uma boa vazão, especialmente nos índices MCS mais altos. Mesmo assim, a relação entre a vazão e o índice MCS ainda é perceptível, mas as limitações impostas pela distância e pelo maior GI reduzem significativamente a taxa de transmissão de dados.

Figura 21 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 80m e GI = 800ns.



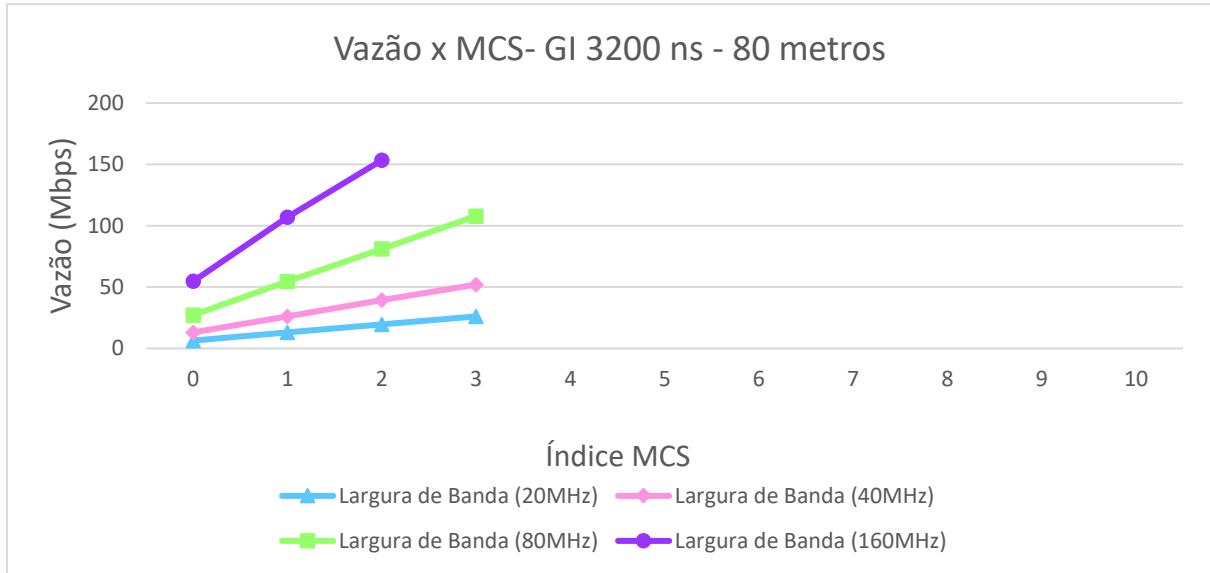
Na Figura 21, a vazão é apresentada em função do índice MCS para uma distância de 80 metros e um intervalo de guarda de 800ns. Observa-se que, diferentemente das distâncias menores, a vazão é limitada a valores baixos e médias distâncias não conseguem sustentar índices MCS mais altos. Para larguras de banda de 80 MHz e 160 MHz, a transmissão para de gerar valores a partir de MCS 3, o que demonstra a degradação significativa do sinal em distâncias maiores. A distância de 80 metro, resulta em uma perda de sinal mais acentuada, afetando a capacidade da rede de sustentar altas vazões. Embora o GI de 800ns permita uma boa eficiência para MCS baixos, a perda de sinal limita consideravelmente a transmissão em MCS mais elevados.

Figura 22 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 80m e GI = 1600ns.



Na Figura 22, o intervalo de guarda foi aumentado para 1600ns, mantendo a distância de 80 metros. Com o aumento no GI, a eficiência da transmissão diminui, e isso é refletido por uma redução mais acentuada na vazão em comparação com o GI de 800ns. A combinação de uma maior distância e de um intervalo de guarda mais longo afeta ainda mais a eficiência temporal da transmissão, resultando em uma queda significativa na taxa de transmissão de dados. No entanto, a relação entre o índice MCS e o aumento da vazão ainda é observada, embora os ganhos sejam menores devido às limitações impostas pela maior distância e pelo maior GI.

Figura 23 - Vazão em função do Índice MCS para Distância = 80m e GI = 3200ns.



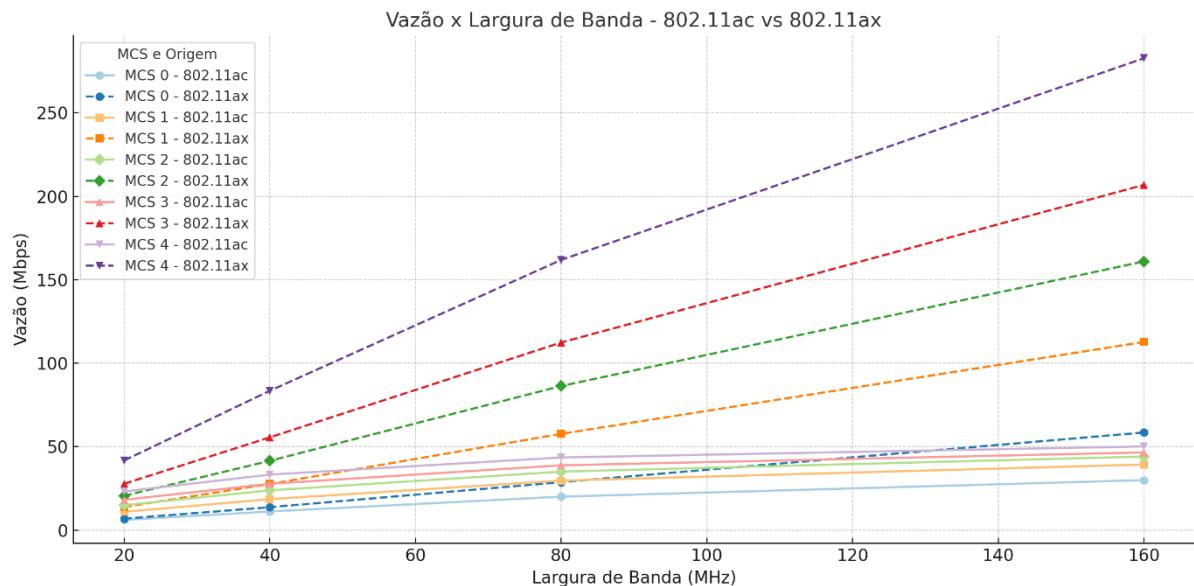
Na Figura 23, o GI foi ampliado para 3200ns, o que resulta em uma diminuição ainda mais significativa da vazão. A distância de 80 metros combinada com o intervalo de guarda mais longo provoca uma perda considerável de eficiência de transmissão, já que mais tempo é necessário para evitar interferências entre os pacotes. A relação entre o aumento do índice MCS e o aumento da vazão permanece, mas os valores de vazão são os mais baixos entre os cenários analisados, devido à combinação de alta distância e grande intervalo de guarda.

4.3 Comparação com o IEEE 802.11ac

Visando complementar o presente trabalho, comprovar a eficácia do protocolo 802.11ax e destacar as melhorias significativas introduzidas em relação ao seu antecessor, foi realizada uma comparação entre os resultados da simulação deste estudo e os resultados para o protocolo 802.11ac, que foram apresentados na referência [17], utilizando o simulador NS-3, assim como o presente trabalho, conforme apresentados na Figura 24.

É importante ressaltar que as condições dos testes para o protocolo 802.11ac foram mantidas semelhantes às utilizadas para o 802.11ax, garantindo a comparabilidade dos resultados. A comparação foca em um cenário controlado com apenas um usuário, a uma distância de 1 metro, utilizando o protocolo TCP, e variando apenas a largura de banda, o índice de modulação (MCS) e, consequentemente, a taxa de transmissão. Essa análise permite evidenciar a superioridade do 802.11ax em termos de taxa de vazão (*throughput*), mesmo em condições de uso ideais.

Figura 24 – Comparação de Vazão entre IEEE 802.11ac e IEEE 802.11ax.



Fonte: Adaptado de Modeling, Implementation and Evaluation of IEEE 802.11ac in Enterprise Networks [17]

Com uma largura de banda de 20 MHz e MCS 0, o protocolo 802.11ac apresenta uma taxa de vazão de 6,076 Mbps, enquanto o 802.11ax alcança 6,810 Mbps, conforme mostrado na Figura 24. Esse incremento se deve ao aprimoramento na utilização do tempo de transmissão no 802.11ax, que reduz a latência entre pacotes e maximiza o uso da largura de banda disponível. Como resultado, o 802.11ax é capaz de entregar uma taxa de dados mais elevada, mesmo com uma largura de banda relativamente estreita.

Com uma largura de banda de 40 MHz e MCS 0, a vantagem do 802.11ax se torna ainda mais evidente. Enquanto o 802.11ac atinge 11,131 Mbps, o 802.11ax, chega a 13,697 Mbps, conforme registrado na Figura 24 deste trabalho. Essa diferença é atribuída à maior eficiência do 802.11ax na organização e envio dos dados, resultando em uma vazão mais elevada. Esse aprimoramento permite ao protocolo 802.11ax se beneficiar de larguras de banda maiores, oferecendo uma transmissão de dados mais rápida e estável.

Para uma largura de banda de 80 MHz e MCS 0, o protocolo 802.11ax atinge 28,696 Mbps, comparado aos 20,010 Mbps do 802.11ac, apresentados na Figura 24. Esse ganho significativo se deve, em parte, ao uso da modulação 1024-QAM no 802.11ax, que permite uma densidade de dados mais elevada em cada símbolo transmitido. Essa característica é essencial para maximizar o uso da largura de banda, mantendo uma taxa de transferência elevada.

Finalmente, na largura de banda de 160 MHz e MCS 0, o 802.11ax alcança uma taxa de 58,471 Mbps, enquanto o 802.11ac registra 29,918 Mbps, de acordo com a Figura 24. Essa diferença significativa destaca a capacidade do 802.11ax de operar com eficiência em canais de alta largura, o que se traduz em uma capacidade de transmissão muito superior. Esse comportamento é essencial em cenários onde a taxa de dados elevada é um requisito fundamental.

Em resumo, os resultados obtidos comprovam que o 802.11ax oferece uma vantagem clara em relação ao 802.11ac, mesmo em um cenário de teste com um único usuário e condições controladas. O protocolo 802.11ax demonstra ser capaz de entregar uma taxa de dados mais elevada em todas as larguras de banda testadas, refletindo as melhorias técnicas implementadas e a sua adequação para as demandas de redes sem fio modernas.

4.4 Considerações Finais

Através dos dados obtidos nas Tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7, apresentadas no Apêndice 1, é possível confirmar que a vazão é diretamente proporcional ao índice MCS e à largura de banda. Isso ocorre porque, à medida que o índice MCS aumenta, são utilizadas técnicas de modulação e codificação mais avançadas, que permitem uma maior taxa de transmissão de dados. Da mesma forma, uma maior largura de banda resulta em mais subportadoras disponíveis para a transmissão, o que gera um aumento na vazão. Essas tendências são consistentes com o comportamento teórico documentado no padrão IEEE 802.11ax, onde valores de vazão mais altos são esperados para índices de modulação mais avançados, como 1024-QAM utilizados em MCS 10 e 11, principalmente em canais de 160MHz [14] [15] [16].

Por outro lado, verificou-se que a vazão é inversamente proporcional ao intervalo de guarda e à distância. Quanto maior o intervalo de guarda, menos pacotes são multiplexados no domínio do tempo, o que diminui a eficiência da transmissão. O mesmo acontece com o aumento da distância: à medida que o terminal do usuário se afasta do ponto de acesso, a perda de sinal se intensifica, resultando em uma redução da vazão. Esse comportamento também está de acordo com os padrões teóricos, que preveem uma perda de eficiência na transmissão à medida que o intervalo de guarda aumenta e a distância provoca maior atenuação do sinal [14] [15] [16].

Ao comparar o desempenho dos protocolos TCP e UDP, observou-se que o protocolo TCP, por ser orientado à conexão e implementar controle de congestionamento, apresentou vazões menores em comparação ao UDP. O TCP garante a confiabilidade da entrega dos

pacotes, mas esse controle adicional reduz a taxa de transmissão, tornando o protocolo menos eficiente em termos de vazão bruta. Em contrapartida, o UDP, que não possui mecanismos de controle de congestionamento ou confirmação de entrega, favorece a rapidez na transmissão, resultando em maiores vazões.

Outro fator relevante observado foi a influência da distância na vazão e na quantidade de valores gerados pela simulação. À medida que a distância entre a STA e o AP aumenta, a vazão diminui, especialmente para os índices MCS mais altos. Em distâncias maiores, os valores de vazão foram gerados apenas para os índices MCS menores, uma vez que a perda de sinal se torna mais severa, interrompendo a transmissão em índices mais elevados. Para compensar essa limitação e garantir resultados plausíveis em distâncias maiores, foi necessário incluir um ganho de transmissão de 10 dB_i e um ganho de recepção de 5 dB_i. Esses ganhos permitiram que a simulação gerasse valores de vazão em cenários de maior distância, mas caso esses ganhos não tivessem sido aplicados, a simulação teria apresentado quedas significativas ou ausência de valores para certas distâncias.

Em síntese, os resultados obtidos estão dentro do esperado. A vazão mostrou-se diretamente proporcional ao índice MCS e à largura de banda, e inversamente proporcional ao intervalo de guarda e à distância. Além disso, o comportamento dos protocolos TCP e UDP, assim como o impacto dos ganhos de transmissão e recepção, foram coerentes com a teoria de redes sem fio, validando a simulação realizada. A segunda etapa, que analisou distâncias maiores, confirmou a tendência de redução na vazão, especialmente para maiores intervalos de guarda e índices MCS elevados, refletindo a dificuldade de manter a eficiência da transmissão em cenários mais desafiadores. Esses resultados também estão em conformidade com as especificações do padrão IEEE 802.11ax, reforçando a validade dos dados simulados e mostrando que a análise realizada segue os padrões de desempenho previstos para este tipo de rede [14] [15] [16].

Por fim, destaca-se a comparação realizada entre os protocolos IEEE 802.11ax e IEEE 802.11ac, que evidenciou as melhorias introduzidas pelo 802.11ax em relação ao seu antecessor. Essa análise, conduzida em um cenário controlado com apenas um usuário, demonstrou a superioridade do 802.11ax em termos de taxa de transferência, especialmente em larguras de banda maiores, graças à adoção de inovações descritas no Capítulo 2 e maior eficiência no uso da largura de banda. Esses resultados reforçam a capacidade do 802.11ax de atender às demandas das redes sem fio modernas, validando sua relevância e destacando sua superioridade em condições ideais de uso.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o protocolo UDP apresentou maiores vazões em comparação ao protocolo TCP, devido à ausência de controle de congestionamento e retransmissões. O TCP, embora ofereça confiabilidade na entrega dos pacotes, limita a taxa de transmissão ao considerar mecanismos de retransmissão, confirmação e o controle de congestionamento, enquanto o UDP maximiza a velocidade de envio, ainda que à custa da confiabilidade.

Observou-se também que a distância tem um papel fundamental na perda de vazão. À medida que a distância entre a estação e o ponto de acesso aumenta, a atenuação do sinal e os ruídos interferem significativamente na relação sinal-ruído, o que compromete a transmissão de dados. Embora a simulação tenha incluído ganhos de transmissão e recepção nas antenas para compensar essa perda, verificou-se que, em distâncias maiores, a eficiência da transmissão é limitada. Nos casos práticos, onde não é possível modificar o ganho das antenas, a vazão tende a cair drasticamente. Além disso, mesmo com o ganho inserido na simulação, a transmissão foi interrompida a partir de certas distâncias, o que evidencia que, mesmo com esses ajustes, a área de cobertura da rede é limitada. Isso está alinhado com o valor teórico de cobertura do padrão 802.11ax, que prevê uma cobertura de até 70 metros, além do qual a relação sinal-ruído se torna insuficiente para uma conexão estável [11].

Os menores índices MCS mostraram-se mais adequados para sustentar a estabilidade da conexão à medida que a distância aumenta, enquanto os índices MCS mais altos proporcionaram maiores vazões, mas foram mais sensíveis à distância e à qualidade do sinal.

Outro aspecto relevante é o impacto da largura de banda e do intervalo de guarda na vazão. Quanto maior a largura de banda, maior a quantidade de subportadoras utilizadas, resultando em uma taxa de transmissão mais elevada. Embora o intervalo de guarda menor favoreça uma maior eficiência temporal, os resultados indicam que a largura de banda tem um impacto mais significativo na vazão. A taxa de transmissão foi maior em canais de 160MHz, em comparação com canais menores, como 80MHz e 40MHz.

Em resumo, as maiores taxas de transmissão foram obtidas em cenários com maiores larguras de banda, intervalos de guarda menores, menores distâncias, maiores índices MCS, maiores ganhos de antena, e ao utilizar o protocolo UDP. Esses fatores demonstram as características que tornam o padrão IEEE 802.11ax altamente eficiente e avançado.

A comparação realizada entre os protocolos IEEE 802.11ax e IEEE 802.11ac reforçou as vantagens do 802.11ax, evidenciando sua superioridade em termos de eficiência e desempenho. O 802.11ax se destacou por incorporar inovações tecnológicas que aprimoraram o uso da largura de banda e a capacidade de transmissão, demonstrando ser uma evolução significativa em relação ao seu antecessor. Essas melhorias posicionaram o 802.11ax como uma solução robusta para desafios cada vez maiores impostos pelas redes sem fio atuais.

Para trabalhos futuros, uma direção interessante seria explorar o comportamento da rede em ambientes com alta densidade de usuários. O 802.11ax foi projetado para melhorar a eficiência em redes congestionadas, e uma análise detalhada de como o padrão lida com a alocação dinâmica de recursos, como as RUs, poderia fornecer uma compreensão mais profunda de suas capacidades. Além disso, investigar o impacto do uso de OFDMA e o recurso BSS *Coloring*, que visa reduzir interferências, seria uma abordagem valiosa para compreender como o 802.11ax se comporta em cenários práticos com vários dispositivos concorrendo por acesso à rede.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Understand what changes on the Internet with the new WiFi standard. Disponível em: <https://www.showmetech.com.br/en/understand-what-changes-on-the-internet-with-the-new-wifi-standard/> Acessado em 28/09/2024.
- [2] Padrão IEEE 802.11ax de WiFi de Próxima Geração. Disponível em: <http://labcisco.blogspot.com/2017/10/padrao-ieee-80211ax-de-wifi-de-proxima.html> Acessado em 28/09/2024.
- [3] O que é 802.11ax? Disponível em: https://www.cisco.com/c/pt_br/products/wireless/what-is-802-11ax.html Acessado em 28/09/2024.
- [4] Der-Jiunn Deng et al. "IEEE 802.11ax: Highly Efficient WLANs for Intelligent Information Infrastructure". IEEE Communication Magazine, December 2017, pp. 52-59.
- [5] Clayton Shepard, Hang Yu, Narendra Anand, Erran Li, Thomas Marzetta, Richard Yang, and Lin Zhong. Argos: Practical many-antenna base stations. In Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pages 53–64. ACM, 2012.
- [6] X. Zhang, K. Sundaresan and K. G. Shin. "NEMOx: Scalable Network MIMO for Wireless Networks". Proceedings of The 19th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 453-464, September 30 – October 04, 2013.
- [7] Der-Jiunn Deng et al. "IEEE 802.11ax: Highly Efficient WLANs for Intelligent Information Infrastructure". IEEE Communication Magazine, December 2017, pp. 52-59
- [8] Russell Huang et al. "Triggered OFDMA Random Access Observations". IEEE 802.11-15/1137. September 2015. Disponível em: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1137-01-00ax-triggeredofdma-random-access-observations.pptx>. Acessado em 28/09/2024.
- [9] Chittabrata Ghosh. "Power Save with Random Access". IEEE 802.11-15/1107r0. September 2015. Disponível em: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1107-00-00ax-powersave-with-random-access.pptx>. Acessado em 28/09/2024.
- [10] Sean Coffey and DZ Liu. "Airtime Analysis of EDCA". IEEE 802.11-15/1114r1. September 2015. Disponível em: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1114-01-00ax-airtimeanalysis-of-edca.pptx>. Acessado em 28/09/2024.

- [11] Kurose, Ross, Redes de Computadores e Internet: Uma abordagem topdown. 5ed, Pearson, 2010.
- [12] Wilson Wide-Band Directional Antenna (314411/314475)
<https://www.wilsonsignalbooster.com/products/wilson-wide-band-directional-antenna-314411-304475?variant=44862112694494> Acessado em 28/09/2024.
- [13] Redes Wi-fi II: Arquitetura IEEE 802.11 Disponível em:
https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwifimanaus2/pagina_4.asp Acessado em 28/09/2024.
- [14] MCS Table (Updated with 802.11ax Data Rates) Disponível em:
<https://semfionetworks.com/blog/mcs-table-updated-with-80211ax-data-rates/> Acessado em 06/10/2024.
- [15] Wi-Fi 6 (802.11ax) Technical Guide Disponível em:
[https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_6_\(802.11ax\)_Technical_Guide](https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_6_(802.11ax)_Technical_Guide) Acessado em 06/10/2024.
- [16] 802.11ax MCS Table | 802.11ax MCS Rates Disponível em: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/802.11ax-MCS-Rates-Table.html> Acessado em 06/10/2024.
- [17] Modeling, Implementation and Evaluation of IEEE 802.11ac in Enterprise Networks, Disponível em:
<https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8524771&fileId=8961851> Acessado em 10/11/2024.
- [18] Simulador “wifi-he-network.cc”, Disponível em:
https://www.nsnam.org/doxygen/db/d12/wifi-he-network_8cc_source.html Acessado em 11/03/2025.
- [19] O Uso de Simuladores no Ensino de Redes de Computadores, Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/359297668_O_Uso_de_Simuladores_no_Ensino_de_Redes_de_Computadores Acessado em: 18/03/2025.
- [20] Simulação e avaliação de uma rede de computadores utilizando o protocolo de internet versão 6, Disponível em:
https://bdm.ufpa.br/jspui/bitstream/prefix/2135/1/TCC_SimulacaoAvaliacaoRede.pdf
Acessado em: 18/03/2025

APÊNDICE 1

Tabela 2 – Valores de Vazão para distância de 1 metro e protocolo UDP.

MCS	Largura de Banda [MHz]	Intervalo de Guarda – GI [ns]	Vazão [Mbps]
0	20	3200	6,62164
0	20	1600	7,31878
0	20	800	7,72623
0	40	3200	13,2409
0	40	1600	14,7424
0	40	800	15,5738
0	80	3200	27,7902
0	80	1600	30,8461
0	80	800	32,6019
0	160	3200	55,5427
0	160	1600	61,678
0	160	800	65,4039
1	20	3200	13,3033
1	20	1600	14,8095
1	20	800	15,6374
1	40	3200	26,6173
1	40	1600	29,6013
1	40	800	31,4007
1	80	3200	55,823
1	80	1600	61,9842
1	80	800	65,6865
1	160	3200	110,566
1	160	1600	122,167
1	160	800	128,826
2	20	3200	19,9568
2	20	1600	22,1942
2	20	800	23,4719
2	40	3200	39,9477
2	40	1600	44,3932
2	40	800	46,9674
2	80	3200	83,7026
2	80	1600	92,9833
2	80	800	98,14
2	160	3200	161,614
2	160	1600	178,124
2	160	800	187,729
3	20	3200	26,6656
3	20	1600	29,6791
3	20	800	31,4796
3	40	3200	53,4678
3	40	1600	59,3758
3	40	800	62,9545
3	80	3200	110,824
3	80	1600	122,529
3	80	800	129,278

3	160	3200	211,012
3	160	1600	232,063
3	160	800	244,519
4	20	3200	40,0455
4	20	1600	44,4956
4	20	800	47,0746
4	40	3200	80,0603
4	40	1600	89,0713
4	40	800	94,0714
4	80	3200	162,227
4	80	1600	178,814
4	80	800	188,517
4	160	3200	302,252
4	160	1600	331,032
4	160	800	347,858
5	20	3200	53,4842
5	20	1600	59,331
5	20	800	62,8968
5	40	3200	105,807
5	40	1600	117,066
5	40	800	123,511
5	80	3200	211,191
5	80	1600	232,253
5	80	800	244,427
5	160	3200	385,207
5	160	1600	420,567
5	160	800	440,835
6	20	3200	60,0729
6	20	1600	66,7464
6	20	800	70,8479
6	40	3200	118,485
6	40	1600	130,893
6	40	800	138,147
6	80	3200	235,277
6	80	1600	258,593
6	80	800	272,004
6	160	3200	428,314
6	160	1600	466,724
6	160	800	488,691
7	20	3200	66,8688
7	20	1600	74,1841
7	20	800	78,5624
7	40	3200	131,066
7	40	1600	144,861
7	40	800	152,658
7	80	3200	258,796
7	80	1600	284,366
7	80	800	299,084
7	160	3200	466,91
7	160	1600	508,402

7	160	800	530,952
8	20	3200	80,0509
8	20	1600	89,0266
8	20	800	94,0679
8	40	3200	155,678
8	40	1600	171,6
8	40	800	181,032
8	80	3200	302,111
8	80	1600	331,006
8	80	800	347,619
8	160	3200	531,686
8	160	1600	576,268
8	160	800	601,911
9	20	3200	88,9983
9	20	1600	98,5639
9	20	800	104,035
9	40	3200	171,269
9	40	1600	188,676
9	40	800	198,937
9	80	3200	331,346
9	80	1600	362,6
9	80	800	380,43
9	160	3200	581,693
9	160	1600	630,002
9	160	800	656,331
10	20	3200	99,698
10	20	1600	110,296
10	20	800	116,426
10	40	3200	191,465
10	40	1600	210,795
10	40	800	222,148
10	80	3200	366,934
10	80	1600	401,002
10	80	800	420,662
10	160	3200	629,072
10	160	1600	679,592
10	160	800	708,016

Tabela 3 – Valores de Vazão para distância de 1 metro e protocolo TCP.

MCS	Largura de Banda [MHz]	Intervalo de Guarda – GI [ns]	Vazão [Mbps]
0	20	3200	5,80127
0	20	1600	6,39784
0	20	800	6,81023
0	40	3200	11,5539
0	40	1600	13,032
0	40	800	13,6969
0	80	3200	24,6403
0	80	1600	27,2189

0	80	800	28,6959
0	160	3200	49,0467
0	160	1600	54,7286
0	160	800	58,4714
1	20	3200	11,7566
1	20	1600	13,0262
1	20	800	13,8243
1	40	3200	23,4124
1	40	1600	26,2181
1	40	800	27,5873
1	80	3200	48,7478
1	80	1600	54,651
1	80	800	57,6605
1	160	3200	97,1203
1	160	1600	106,945
1	160	800	112,707
2	20	3200	17,5926
2	20	1600	19,5619
2	20	800	20,5234
2	40	3200	35,2327
2	40	1600	39,3902
2	40	800	41,4835
2	80	3200	74,2349
2	80	1600	82,1792
2	80	800	86,3182
2	160	3200	140,247
2	160	1600	153,975
2	160	800	160,983
3	20	3200	23,5688
3	20	1600	26,0605
3	20	800	27,7251
3	40	3200	46,9372
3	40	1600	52,0098
3	40	800	55,5406
3	80	3200	98,1003
3	80	1600	107,849
3	80	800	112,403
3	160	3200	178,939
3	160	1600	197,788
3	160	800	206,857
4	20	3200	35,6451
4	20	1600	39,0497
4	20	800	41,6862
4	40	3200	71,3968
4	40	1600	78,6426
4	40	800	83,4558
4	80	3200	142,051
4	80	1600	154,342
4	80	800	161,897
4	160	3200	248,876

4	160	1600	272,429
4	160	800	282,726
5	20	3200	47,4747
5	20	1600	52,2508
5	20	800	56,0237
5	40	3200	93,5906
5	40	1600	103,474
5	40	800	109,178
5	80	3200	180,557
5	80	1600	195,087
5	80	800	205,621
5	160	3200	308,268
5	160	1600	334,49
5	160	800	348,18
6	20	3200	52,5786
6	20	1600	59,4282
6	20	800	63,3633
6	40	3200	104,376
6	40	1600	115,65
6	40	800	121,202
6	80	3200	198,825
6	80	1600	215,404
6	80	800	228,106
6	160	3200	339,351
6	160	1600	366,825
6	160	800	378,967
7	20	3200	59,3564
7	20	1600	65,9373
7	20	800	69,131
7	40	3200	114,833
7	40	1600	126,831
7	40	800	133,332
7	80	3200	215,561
7	80	1600	235,71
7	80	800	248,231
7	160	3200	367,224
7	160	1600	392,772
7	160	800	408,568
8	20	3200	70,5524
8	20	1600	79,7257
8	20	800	83,7454
8	40	3200	135,029
8	40	1600	148,97
8	40	800	156,696
8	80	3200	249,283
8	80	1600	272,112
8	80	800	283,286
8	160	3200	410,655
8	160	1600	438,808
8	160	800	451,773

9	20	3200	78,7642
9	20	1600	87,1858
9	20	800	91,8739
9	40	3200	147,359
9	40	1600	162,416
9	40	800	169,744
9	80	3200	272,116
9	80	1600	293,577
9	80	800	307,415
9	160	3200	437,971
9	160	1600	470,474
9	160	800	483,362
10	20	3200	88,5145
10	20	1600	98,062
10	20	800	102,805
10	40	3200	163,546
10	40	1600	179,762
10	40	800	188,162
10	80	3200	296,396
10	80	1600	320,964
10	80	800	333,327
10	160	3200	469,172
10	160	1600	496,438
10	160	800	511,451

Tabela 4 - Dados da Vazão para Distância de 10 metros.

MCS	Largura de Banda [MHz]	Intervalo de Guarda – GI [ns]	Vazão [Mbps]	Distância [m]
0	20	3200	5,80127	10
0	20	1600	6,39784	10
0	20	800	6,81023	10
0	40	3200	11,5527	10
0	40	1600	13,032	10
0	40	800	13,6969	10
0	80	3200	24,6392	10
0	80	1600	27,2189	10
0	80	800	28,6959	10
0	160	3200	49,0467	10
0	160	1600	54,7286	10
0	160	800	58,4702	10
1	20	3200	11,7554	10
1	20	1600	13,0262	10
1	20	800	13,8243	10
1	40	3200	23,4113	10
1	40	1600	26,2169	10
1	40	800	27,5873	10
1	80	3200	48,7466	10

1	80	1600	54,651	10
1	80	800	57,6594	10
1	160	3200	97,1145	10
1	160	1600	106,943	10
1	160	800	112,696	10
2	20	3200	17,5926	10
2	20	1600	19,5619	10
2	20	800	20,5234	10
2	40	3200	35,2327	10
2	40	1600	39,3891	10
2	40	800	41,4835	10
2	80	3200	74,2337	10
2	80	1600	82,1804	10
2	80	800	86,3205	10
2	160	3200	140,235	10
2	160	1600	154,023	10
2	160	800	160,986	10
3	20	3200	23,5688	10
3	20	1600	26,0605	10
3	20	800	27,724	10
3	40	3200	46,9361	10
3	40	1600	52,0087	10
3	40	800	55,5395	10
3	80	3200	98,0968	10
3	80	1600	107,853	10
3	80	800	112,403	10
3	160	3200	178,951	10
3	160	1600	197,813	10
3	160	800	204,781	10
4	20	3200	35,644	10
4	20	1600	39,0497	10
4	20	800	41,6862	10
4	40	3200	71,3957	10
4	40	1600	78,6368	10
4	40	800	83,567	10
4	80	3200	142,045	10
4	80	1600	154,564	10
4	80	800	161,892	10
4	160	3200	249,911	10
4	160	1600	272,657	10
4	160	800	283,061	10
5	20	3200	47,4747	10
5	20	1600	52,2508	10
5	20	800	56,0237	10
5	40	3200	93,5895	10

5	40	1600	103,469	10
5	40	800	109,124	10
5	80	3200	180,573	10
5	80	1600	195,16	10
5	80	800	206,31	10
5	160	3200	309,165	10
5	160	1600	334,9	10
5	160	800	346,906	10
6	20	3200	52,5786	10
6	20	1600	59,4271	10
6	20	800	63,3622	10
6	40	3200	104,372	10
6	40	1600	115,648	10
6	40	800	121,196	10
6	80	3200	198,771	10
6	80	1600	215,385	10
6	80	800	228,098	10
6	160	3200	339,492	10
6	160	1600	368,518	10
6	160	800	378,659	10
7	20	3200	59,3564	10
7	20	1600	65,9373	10
7	20	800	69,1298	10
7	40	3200	114,829	10
7	40	1600	126,825	10
7	40	800	134,079	10
7	80	3200	215,612	10
7	80	1600	236,095	10
7	80	800	247,98	10
7	160	3200	366,865	10
7	160	1600	392,523	10
7	160	800	408,067	10
8	20	3200	70,5524	10
8	20	1600	79,7292	10
8	20	800	83,7396	10
8	40	3200	135,028	10
8	40	1600	148,968	10
8	40	800	156,681	10
8	80	3200	248,748	10
8	80	1600	271,897	10
8	80	800	283,316	10
8	160	3200	410,574	10
8	160	1600	437,991	10
8	160	800	452,421	10

9	20	3200	78,7642	10
9	20	1600	87,18	10
9	20	800	91,8715	10
9	40	3200	147,365	10
9	40	1600	162,405	10
9	40	800	170,112	10
9	80	3200	272,075	10
9	80	1600	293,847	10
9	80	800	305,962	10
9	160	3200	437,918	10
9	160	1600	470,68	10
9	160	800	481,987	10
10	20	3200	88,5168	10
10	20	1600	98,0609	10
10	20	800	102,803	10
10	40	3200	163,669	10
10	40	1600	179,602	10
10	40	800	188,159	10
10	80	3200	297,13	10
10	80	1600	320,499	10
10	80	800	332,753	10
10	160	3200	467,465	10
10	160	1600	496,383	10
10	160	800	512,079	10

Tabela 5 - Dados da Vazão para Distância de 20 metros.

MCS	Largura de Banda [MHz]	Intervalo de Guarda – GI [ns]	Vazão [Mbps]	Distância [m]
0	20	3200	5,80127	20
0	20	1600	6,39784	20
0	20	800	6,81023	20
0	40	3200	11,5527	20
0	40	1600	13,032	20
0	40	800	13,6969	20
0	80	3200	24,6392	20
0	80	1600	27,2189	20
0	80	800	28,6959	20
0	160	3200	49,0455	20
0	160	1600	54,7274	20
0	160	800	58,4691	20
1	20	3200	11,7554	20
1	20	1600	13,025	20
1	20	800	13,8243	20
1	40	3200	23,4113	20
1	40	1600	26,2169	20

1	40	800	27,5873	20
1	80	3200	48,7466	20
1	80	1600	54,6498	20
1	80	800	57,6594	20
1	160	3200	97,1145	20
1	160	1600	107,074	20
1	160	800	112,883	20
2	20	3200	17,5695	20
2	20	1600	19,5619	20
2	20	800	20,5222	20
2	40	3200	35,2316	20
2	40	1600	39,3891	20
2	40	800	41,4835	20
2	80	3200	74,2326	20
2	80	1600	82,1792	20
2	80	800	86,1664	20
2	160	3200	140,232	20
2	160	1600	153,398	20
2	160	800	160,977	20
3	20	3200	23,5688	20
3	20	1600	26,0594	20
3	20	800	27,724	20
3	40	3200	46,9349	20
3	40	1600	52,0087	20
3	40	800	55,5383	20
3	80	3200	98,0979	20
3	80	1600	107,845	20
3	80	800	112,409	20
3	160	3200	178,931	20
3	160	1600	197,589	20
3	160	800	206,821	20
4	20	3200	35,644	20
4	20	1600	39,0497	20
4	20	800	41,685	20
4	40	3200	71,3899	20
4	40	1600	78,638	20
4	40	800	83,5681	20
4	80	3200	142,041	20
4	80	1600	154,317	20
4	80	800	161,889	20
4	160	3200	249,999	20
4	160	1600	272,69	20
4	160	800	283,052	20
5	20	3200	47,4735	20
5	20	1600	52,2496	20

5	20	800	56,0225	20
5	40	3200	93,5883	20
5	40	1600	103,475	20
5	40	800	109,119	20
5	80	3200	180,533	20
5	80	1600	195,094	20
5	80	800	206,264	20
5	160	3200	309,053	20
5	160	1600	335,872	20
5	160	800	348,033	20
6	20	3200	52,5786	20
6	20	1600	59,4271	20
6	20	800	63,361	20
6	40	3200	104,373	20
6	40	1600	115,648	20
6	40	800	121,194	20
6	80	3200	198,829	20
6	80	1600	215,33	20
6	80	800	227,887	20
6	160	3200	339,588	20
6	160	1600	367,129	20
6	160	800	378,555	20
7	20	3200	59,3553	20
7	20	1600	65,9199	20
7	20	800	69,1287	20
7	40	3200	114,824	20
7	40	1600	126,82	20
7	40	800	134,071	20
7	80	3200	215,228	20
7	80	1600	235,968	20
7	80	800	247,998	20
7	160	3200	367,611	20
7	160	1600	393,332	20
7	160	800	408,446	20
8	20	3200	70,5512	20
8	20	1600	79,728	20
8	20	800	83,7407	20
8	40	3200	135,02	20
8	40	1600	148,966	20
8	40	800	156,675	20
8	80	3200	250,055	20
8	80	1600	271,194	20
8	80	800	283,211	20
8	160	3200	409,472	20

8	160	1600	435,109	20
8	160	800	452,725	20
9	20	3200	78,7619	20
9	20	1600	87,1858	20
9	20	800	91,8692	20
9	40	3200	147,347	20
9	40	1600	162,413	20
9	40	800	169,728	20
9	80	3200	272,252	20
9	80	1600	293,401	20
9	80	800	304,308	20
9	160	3200	415,578	20
9	160	1600	442,489	20
9	160	800	457,839	20
10	20	3200	88,5145	20
10	20	1600	98,0539	20
10	20	800	102,803	20
10	40	3200	163,633	20
10	40	1600	179,533	20
10	40	800	188,096	20
10	80	3200	294,693	20
10	80	1600	-	20
10	80	800	-	20
10	160	3200	-	20
10	160	1600	-	20
10	160	800	-	20

Tabela 6 - Dados da Vazão para Distância de 40 metros.

MCS	Largura de Banda [MHz]	Intervalo de Guarda – GI [ns]	Vazão [Mbps]	Distância [m]
0	20	3200	5,80127	40
0	20	1600	6,39784	40
0	20	800	6,81023	40
0	40	3200	11,5527	40
0	40	1600	13,032	40
0	40	800	13,6969	40
0	80	3200	24,6392	40
0	80	1600	27,2178	40
0	80	800	28,6947	40
0	160	3200	49,0443	40
0	160	1600	54,7263	40
0	160	800	58,4679	40
1	20	3200	11,7554	40
1	20	1600	13,025	40

1	20	800	13,8162	40
1	40	3200	23,4101	40
1	40	1600	26,2169	40
1	40	800	27,5861	40
1	80	3200	48,7443	40
1	80	1600	54,6475	40
1	80	800	57,657	40
1	160	3200	97,1052	40
1	160	1600	107,018	40
1	160	800	112,929	40
2	20	3200	17,5683	40
2	20	1600	19,5607	40
2	20	800	20,5222	40
2	40	3200	35,2304	40
2	40	1600	39,4447	40
2	40	800	41,4835	40
2	80	3200	74,2303	40
2	80	1600	82,1757	40
2	80	800	86,105	40
2	160	3200	140,229	40
2	160	1600	153,886	40
2	160	800	160,963	40
3	20	3200	23,5688	40
3	20	1600	26,0594	40
3	20	800	27,7228	40
3	40	3200	46,9337	40
3	40	1600	52,0064	40
3	40	800	55,6484	40
3	80	3200	98,0968	40
3	80	1600	107,809	40
3	80	800	112,388	40
3	160	3200	178,921	40
3	160	1600	197,674	40
3	160	800	205,19	40
4	20	3200	35,6428	40
4	20	1600	39,0485	40
4	20	800	41,6839	40
4	40	3200	71,3922	40
4	40	1600	78,6403	40
4	40	800	83,5623	40
4	80	3200	142,04	40
4	80	1600	154,31	40
4	80	800	161,872	40
4	160	3200	249,971	40
4	160	1600	272,537	40

4	160	800	282,602	40
5	20	3200	47,4724	40
5	20	1600	52,2473	40
5	20	800	56,0214	40
5	40	3200	93,5871	40
5	40	1600	103,469	40
5	40	800	109,119	40
5	80	3200	180,589	40
5	80	1600	195,156	40
5	80	800	206,269	40
5	160	3200	320,008	40
5	160	1600	-	40
5	160	800	-	40
6	20	3200	-	40
6	20	1600	-	40
6	20	800	-	40
6	40	3200	-	40
6	40	1600	-	40
6	40	800	-	40
6	80	3200	-	40
6	80	1600	-	40
6	80	800	-	40
6	160	3200	-	40
6	160	1600	-	40
6	160	800	-	40
7	20	3200	-	40
7	20	1600	-	40
7	20	800	-	40
7	40	3200	-	40
7	40	1600	-	40
7	40	800	-	40
7	80	3200	-	40
7	80	1600	-	40
7	80	800	-	40
7	160	3200	-	40
7	160	1600	-	40
7	160	800	-	40
8	20	3200	-	40
8	20	1600	-	40
8	20	800	-	40
8	40	3200	-	40
8	40	1600	-	40
8	40	800	-	40
8	80	3200	-	40

8	80	1600	-	40
8	80	800	-	40
8	160	3200	-	40
8	160	1600	-	40
8	160	800	-	40
9	20	3200	-	40
9	20	1600	-	40
9	20	800	-	40
9	40	3200	-	40
9	40	1600	-	40
9	40	800	-	40
9	80	3200	-	40
9	80	1600	-	40
9	80	800	-	40
9	160	3200	-	40
9	160	1600	-	40
9	160	800	-	40
10	20	3200	-	40
10	20	1600	-	40
10	20	800	-	40
10	40	3200	-	40
10	40	1600	-	40
10	40	800	-	40
10	80	3200	-	40
10	80	1600	-	40
10	80	800	-	40
10	160	3200	-	40
10	160	1600	-	40
10	160	800	-	40

Tabela 7 - Dados da Vazão para Distância de 80 metros.

MCS	Largura de Banda [MHz]	Intervalo de Guarda – GI [ns]	Vazão [Mbps]	Distância [m]
0	20	3200	5,80127	80
0	20	1600	6,39668	80
0	20	800	6,80908	80
0	40	3200	11,55116	80
0	40	1600	13,0308	80
0	40	800	13,6958	80
0	80	3200	24,6369	80
0	80	1600	27,2154	80
0	80	800	28,6936	80
0	160	3200	49,042	80
0	160	1600	54,7228	80
0	160	800	58,4644	80

1	20	3200	11,7543	80
1	20	1600	13,0239	80
1	20	800	13,8151	80
1	40	3200	23,4089	80
1	40	1600	26,2146	80
1	40	800	27,5143	80
1	80	3200	48,742	80
1	80	1600	54,6452	80
1	80	800	57,6547	80
1	160	3200	97,0936	80
1	160	1600	107,059	80
1	160	800	112,69	80
2	20	3200	17,5671	80
2	20	1600	19,5596	80
2	20	800	20,5211	80
2	40	3200	35,2281	80
2	40	1600	39,4424	80
2	40	800	41,5877	80
2	80	3200	74,2256	80
2	80	1600	81,0718	80
2	80	800	86,8754	80
2	160	3200	140,216	80
2	160	1600	153,364	80
2	160	800	160,945	80
3	20	3200	23,5688	80
3	20	1600	26,0594	80
3	20	800	27,7217	80
3	40	3200	46,9314	80
3	40	1600	52,0041	80
3	40	800	55,3912	80
3	80	3200	98,3285	80
3	80	1600	107,849	80
3	80	800	112,138	80
3	160	3200	-	80
3	160	1600	-	80
3	160	800	-	80
4	20	3200	-	80
4	20	1600	-	80
4	20	800	-	80
4	40	3200	-	80
4	40	1600	-	80
4	40	800	-	80
4	80	3200	-	80
4	80	1600	-	80
4	80	800	-	80

4	160	3200	-	80
4	160	1600	-	80
4	160	800	-	80
5	20	3200	-	80
5	20	1600	-	80
5	20	800	-	80
5	40	3200	-	80
5	40	1600	-	80
5	40	800	-	80
5	80	3200	-	80
5	80	1600	-	80
5	80	800	-	80
5	160	3200	-	80
5	160	1600	-	80
5	160	800	-	80
6	20	3200	-	80
6	20	1600	-	80
6	20	800	-	80
6	40	3200	-	80
6	40	1600	-	80
6	40	800	-	80
6	80	3200	-	80
6	80	1600	-	80
6	80	800	-	80
6	160	3200	-	80
6	160	1600	-	80
6	160	800	-	80
7	20	3200	-	80
7	20	1600	-	80
7	20	800	-	80
7	40	3200	-	80
7	40	1600	-	80
7	40	800	-	80
7	80	3200	-	80
7	80	1600	-	80
7	80	800	-	80
7	160	3200	-	80
7	160	1600	-	80
7	160	800	-	80
8	20	3200	-	80
8	20	1600	-	80
8	20	800	-	80
8	40	3200	-	80
8	40	1600	-	80

8	40	800	-	80
8	80	3200	-	80
8	80	1600	-	80
8	80	800	-	80
8	160	3200	-	80
8	160	1600	-	80
8	160	800	-	80
9	20	3200	-	80
9	20	1600	-	80
9	20	800	-	80
9	40	3200	-	80
9	40	1600	-	80
9	40	800	-	80
9	80	3200	-	80
9	80	1600	-	80
9	80	800	-	80
9	160	3200	-	80
9	160	1600	-	80
9	160	800	-	80
10	20	3200	-	80
10	20	1600	-	80
10	20	800	-	80
10	40	3200	-	80
10	40	1600	-	80
10	40	800	-	80
10	80	3200	-	80
10	80	1600	-	80
10	80	800	-	80
10	160	3200	-	80
10	160	1600	-	80
10	160	800	-	80

ANEXO 1 – CÓDIGO C++

```

/* -*- Mode: C++; c-file-style: "gnu"; indent-tabs-mode:nil; -*- */
/*
 * Copyright (c) 2016 SEBASTIEN DERONNE
 *
 * This program is free software; you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License version 2 as
 * published by the Free Software Foundation;
 *
 * This program is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with this program; if not, write to the Free Software
 * Foundation, Inc., 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA
 *
 * Author: Sebastien Deronne <sebastien.deronne@gmail.com>
 */

#include "ns3/command-line.h"
#include "ns3/config.h"
#include "ns3/uinteger.h"
#include "ns3/boolean.h"
#include "ns3/double.h"
#include "ns3/string.h"
#include "ns3/log.h"
#include "ns3/yans-wifi-helper.h"
#include "ns3/ssid.h"
#include "ns3/mobility-helper.h"
#include "ns3/internet-stack-helper.h"
#include "ns3/ipv4-address-helper.h"

```

```

#include "ns3/udp-client-server-helper.h"
#include "ns3/packet-sink-helper.h"
#include "ns3/on-off-helper.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/packet-sink.h"
#include "ns3/yans-wifi-channel.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/flow-monitor.h"
#include "ns3/flow-monitor-helper.h"

// This is a simple example in order to show how to configure an IEEE 802.11ax Wi-Fi
network.

//
// It outputs the UDP or TCP goodput for every HE MCS value, which depends on the
MCS value (0 to
11),
// the channel width (20, 40, 80 or 160 MHz) and the guard interval (800ns, 1600ns or
3200ns).

// The PHY bitrate is constant over all the simulation run. The user can also specify the
distance
between
// the access point and the station: the larger the distance the smaller the goodput.

//
// The simulation assumes a single station in an infrastructure network:
//
// STA AP
// ***
// ||
// n1 n2
//
//Packets in this simulation aren't marked with a QosTag so they are considered
//belonging to BestEffort Access Class (AC_BE).
using namespace ns3;
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("he-wifi-network");

```

```

int main (int argc, char *argv[])
{
    bool udp = false;
    bool useRts = false;
    double simulationTime = 1; //seconds
    double distance = 50; //meters
    double frequency = 5.0; //whether 2.4 or 5.0 GHz
    int mcs = -1; // -1 indicates an unset value
    double minExpectedThroughput = 0;
    double maxExpectedThroughput = 0;
    CommandLine cmd;
    cmd.AddValue ("frequency", "Whether working in the 2.4 or 5.0 GHz band (other values
gets
rejected)", frequency);
    cmd.AddValue ("distance", "Distance in meters between the station and the access point",
distance);
    cmd.AddValue ("simulationTime", "Simulation time in seconds", simulationTime);
    cmd.AddValue ("udp", "UDP if set to 1, TCP otherwise", udp);
    cmd.AddValue ("useRts", "Enable/disable RTS/CTS", useRts);
    cmd.AddValue ("mcs", "if set, limit testing to a specific MCS (0-7)", mcs);
    cmd.AddValue ("minExpectedThroughput", "if set, simulation fails if the lowest
throughput is below
this value", minExpectedThroughput);
    cmd.AddValue ("maxExpectedThroughput", "if set, simulation fails if the highest
throughput is
above this value", maxExpectedThroughput);
    cmd.Parse (argc,argv);
    if (useRts)
    {
        Config::SetDefault ("ns3::WifiRemoteStationManager::RtsCtsThreshold", StringValue
("0"));
    }
    double prevThroughput [12];

```

```

for (uint32_t l = 0; l < 12; l++)
{
    prevThroughput[l] = 0;
}
std::cout << "MCS value" << "\t\t" << "Channel width" << "\t\t" << "GI" << "\t\t\t" <<
"Throughput"
<< '\n';
int minMcs = 0;
int maxMcs = 11;
if (mcs >= 0 && mcs <= 11)
{
    minMcs = mcs;
    maxMcs = mcs;
}
for (int mcs = minMcs; mcs <= maxMcs; mcs++)
{
    uint8_t index = 0;
    double previous = 0;
    uint8_t maxChannelWidth = frequency == 2.4 ? 40 : 160;
    for (int channelWidth = 20; channelWidth <= maxChannelWidth; ) //MHz
    {
        for (int gi = 3200; gi >= 800; ) //Nanoseconds
        {
            uint32_t payloadSize; //1500 byte IP packet
            if (udp)
            {
                payloadSize = 1472; //bytes
            }
            else
            {
                payloadSize = 1448; //bytes
            }
            Config::SetDefault ("ns3::TcpSocket::SegmentSize", UintegerValue (payloadSize));
        }
    }
}

```

```

NodeContainer wifiStaNode;
wifiStaNode.Create (1);
NodeContainer wifiApNode;
wifiApNode.Create (1);
YansWifiChannelHelper channel = YansWifiChannelHelper::Default ();
YansWifiPhyHelper phy = YansWifiPhyHelper::Default ();
phy.SetChannel (channel.Create ());
phy.Set("TxGain", DoubleValue(24)); //Ganho de transmissao em dBi
phy.Set("RxGain", DoubleValue(24));
phy.Set("TxPowerStart", DoubleValue(18.0)); //Minimum available transmission level
(dbm).
phy.Set("TxPowerEnd", DoubleValue(18.0)); //Maximum available transmission level
(dbm).

// Set guard interval
phy.Set ("GuardInterval", TimeValue (NanoSeconds (gi)));
WifiMacHelper mac;
WifiHelper wifi;
if (frequency == 5.0)
{
    wifi.SetStandard (WIFI_PHY_STANDARD_80211ax_5GHZ);
}
else if (frequency == 2.4)
{
    wifi.SetStandard (WIFI_PHY_STANDARD_80211ax_2_4GHZ);
    Config::SetDefault ("ns3::LogDistancePropagationLossModel::ReferenceLoss",
DoubleValue (40.046));
}
else
{
    std::cout << "Wrong frequency value!" << std::endl;
    return 0;
}
std::ostringstream oss;

```

```

oss << "HeMcs" << mcs;
wifi.SetRemoteStationManager ("ns3::ConstantRateWifiManager", "DataMode",
StringValue
(oss.str ()),
"ControlMode", StringValue (oss.str ()));
Ssid ssid = Ssid ("ns3-80211ax");
mac.SetType ("ns3::StaWifiMac",
"Ssid", SsidValue (ssid));
NetDeviceContainer staDevice;
staDevice = wifi.Install (phy, mac, wifiStaNode);
mac.SetType ("ns3::ApWifiMac",
"EnableBeaconJitter", BooleanValue (false),
"Ssid", SsidValue (ssid));
NetDeviceContainer apDevice;
apDevice = wifi.Install (phy, mac, wifiApNode);
// Set channel width
Config::Set ("/NodeList/*/DeviceList/*/$ns3::WifiNetDevice/Phy/ChannelWidth",
UintegerValue (channelWidth));
// mobility.
MobilityHelper mobility;
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc = CreateObject<ListPositionAllocator> ();
positionAlloc->Add (Vector (0.0, 0.0, 0.0));
positionAlloc->Add (Vector (distance, 0.0, 0.0));
mobility.SetPositionAllocator (positionAlloc);
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (wifiApNode);
mobility.Install (wifiStaNode);
/* Internet stack*/
InternetStackHelper stack;
stack.Install (wifiApNode);
stack.Install (wifiStaNode);
Ipv4AddressHelper address;
address.SetBase ("192.168.1.0", "255.255.255.0");

```

```

Ipv4InterfaceContainer staNodeInterface;
Ipv4InterfaceContainer apNodeInterface;
staNodeInterface = address.Assign (staDevice);
apNodeInterface = address.Assign (apDevice);
/* Setting applications */
ApplicationContainer serverApp;
if (udp)
{
//UDP flow
uint16_t port = 9;
UdpServerHelper server (port);
serverApp = server.Install (wifiStaNode.Get (0));
serverApp.Start (Seconds (0.0));
serverApp.Stop (Seconds (simulationTime + 1));
UdpClientHelper client (staNodeInterface.GetAddress (0), port);
client.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue (4294967295u));
client.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Time ("0.00001"))); //packets/s
client.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (payloadSize));
ApplicationContainer clientApp = client.Install (wifiApNode.Get (0));
clientApp.Start (Seconds (1.0));
clientApp.Stop (Seconds (simulationTime + 1));
}
else
{
//TCP flow
uint16_t port = 50000;
Address localAddress (InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), port));
PacketSinkHelper packetSinkHelper ("ns3::TcpSocketFactory", localAddress);
serverApp = packetSinkHelper.Install (wifiStaNode.Get (0));
serverApp.Start (Seconds (0.0));
serverApp.Stop (Seconds (simulationTime + 1));
OnOffHelper onoff ("ns3::TcpSocketFactory", Ipv4Address::GetAny ());
onoff.SetAttribute ("OnTime", StringValue

```

```

("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=1]"));
onoff.SetAttribute ("OffTime", StringValue
("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=0]"));
onoff.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (payloadSize));
onoff.SetAttribute ("DataRate", DataRateValue (1000000000)); //bit/s
AddressValue remoteAddress (InetSocketAddress (staNodeInterface.GetAddress (0),
port));
onoff.SetAttribute ("Remote", remoteAddress);
ApplicationContainer clientApp = onoff.Install (wifiApNode.Get (0));
clientApp.Start (Seconds (1.0));
clientApp.Stop (Seconds (simulationTime + 1));
}

Ipv4GlobalRoutingHelper::PopulateRoutingTables ();
Ptr<FlowMonitor> flowMonitor;
FlowMonitorHelper flowHelper;
flowMonitor = flowHelper.InstallAll();
Simulator::Stop (Seconds (simulationTime + 1));
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();

uint64_t rxBytes = 0;
if (udp)
{
    rxBytes = payloadSize * DynamicCast<UdpServer> (serverApp.Get (0))->GetReceived
0;
}
else
{
    rxBytes = DynamicCast<PacketSink> (serverApp.Get (0))->GetTotalRx ();
}
double throughput = (rxBytes * 8) / (simulationTime * 1000000.0); //Mbit/s
flowMonitor->SerializeToXmlFile("50m.xml", true, true); //envia pro arquivo
std::cout << mcs << "\t\t\t" << channelWidth << " MHz\t\t\t" << gi << " ns\t\t\t" <<

```

```

throughput << " Mbit/s" << std::endl;
//test first element
if (mcs == 0 && channelWidth == 20 && gi == 3200)
{
if (throughput < minExpectedThroughput)
{
NS_LOG_ERROR ("Obtained throughput " << throughput << " is not expected!");
exit (1);
}
}
//test last element
if (mcs == 11 && channelWidth == 160 && gi == 800)
{
if (maxExpectedThroughput > 0 && throughput > maxExpectedThroughput)
{
NS_LOG_ERROR ("Obtained throughput " << throughput << " is not expected!");
exit (1);
}
}
//test previous throughput is smaller (for the same mcs)
if (throughput > previous)
{
previous = throughput;
}
else
{
NS_LOG_ERROR ("Obtained throughput " << throughput << " is not expected!");
exit (1);
}
//test previous throughput is smaller (for the same channel width and GI)
if (throughput > prevThroughput [index])
{
prevThroughput [index] = throughput;
}

```

```
    }
else
{
    NS_LOG_ERROR ("Obtained throughput " << throughput << " is not expected!");
    exit (1);
}
index++;
gi /= 2;
}
channelWidth *= 2;
}
}

return 0;
}
```

