

# Estudo Exploratório do Wi-Fi 7 Multi-Link Operation no ns-3

William Nascimento, Daniel Rodrigues de Luna e Vicente A. de Sousa Jr.

**Resumo**—Serviços como realidade virtual e jogos em nuvem têm crescido de forma significativa nos últimos anos, impulsionados por avanços tecnológicos, mudanças no comportamento dos consumidores e o aumento da conectividade global. Para atender às novas exigências desses serviços, especialmente em relação à taxa de transmissão e à latência, surge o Wi-Fi 7, baseado no padrão IEEE 802.11be, e também conhecido como *Extremely High Throughput*. Uma de suas principais inovações é o Multi-Link Operation (MLO), que permite a conexão simultânea em múltiplos canais sem fio, com o objetivo de oferecer maior volume de dados transmitidos e menor atraso na recepção — aspectos fundamentais para aplicações imersivas e em tempo real. Este trabalho explora o uso da ferramenta de simulação ns-3 como alternativa para prototipagem de serviços e funcionalidades do Wi-Fi 7 com o uso do *Multi-Link Operation*. Foram realizadas investigações comparativas de capacidade de transmissão das diferentes gerações do Wi-Fi, assim como simulações que mediram o ganho de taxa de transmissão do MLO e sua sensibilidade à distância do ponto de acesso. O estudo contribui para adoção do ns-3 como ferramenta de prototipagem de redes Wi-Fi 7, uma vez que a ferramenta apresentou um desempenho coerente para os testes realizados.

**Palavras-Chave**— Wi-Fi 7, Multi-link Operation, ns-3.

## I. INTRODUÇÃO

É possível identificar que, além do 5G, o Wi-Fi 7 (baseado no padrão IEEE 802.11be) foi criado com uma série de recursos voltados a conectividade com maior taxa de transmissão e menor latência. Contudo, depois que um sistema sem fio é padronizado, a implementação de várias funcionalidades fica a cargo de cada fabricante, com o padrão se concentrando na definição dos aspectos de sinalização. Dessa forma, o estudo desses novos recursos se faz necessário com o objetivo de entender como podem ser aperfeiçoados e customizados, bem como evoluídos para novas funcionalidades.

O Wi-Fi 7 é a mais nova versão do Wi-Fi lançada pela Wi-Fi Alliance e que segue as especificações desenvolvidas pelo Task Group IEEE 802.11be. É um sistema WLAN que opera em ambientes *indoor* e *outdoor*, para terminais com velocidade pedestre ou estacionários, nas frequências de 2,4, 5 e 6 GHz. O seu principal objetivo é atender aplicações emergentes como transmissão de vídeos 4K/8K, jogos e computação em nuvem, que requerem simultaneamente baixa latência e alta taxa de transmissão [1].

Todos os autores são do Leading Advanced Technologies Center of Excellence (LANCE), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, E-mails: william.nascimento.086@ufrn.edu.br, daniel.luna.088@ufrn.edu.br, vicente.sousa@ufrn.edu.br. Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. As simulações fornecidas por esse trabalho foram realizadas com o apoio do Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD/UFRN).

O Wi-Fi 7 também é chamado de *Extremely High Throughput* (EHT), o diferenciando do seu antecessor, o Wi-Fi 6, que tem a alcunha de *High Efficiency* (HE). O padrão 802.11ax, utilizado no Wi-Fi 6, introduziu o múltiplo acesso por divisão ortogonal de frequência (OFDMA), bem como a possibilidade de redes na faixa de 6 GHz. O 802.11be apresenta novos recursos como: modulação de alta ordem (*4086-Quadrature Amplitude Modulation - 4k-QAM*); Maior largura de banda (320 MHz); e *Multi-Link Operation* (MLO) [1].

O MLO, principal foco deste trabalho, é um recurso que promove o uso de múltiplas interfaces sem fio para permitir a transmissão e recepção simultâneas de dados em pontos de acesso (APs) e estações (STAs) Wi-Fi com capacidade de banda dupla ou tripla [2]. Por exemplo, esse recurso permite que um dispositivo em uma mesma rede opere três links simultaneamente para atender à sua demanda por taxa de transmissão e latência.

Um conceito novo no Wi-Fi 7 é o *Multi-Link Device* (MLD). Como definido em [3], o MLD permite que múltiplos APs/STAs possuam uma única interface de camada superior. Assim, os protocolos de camadas superiores tratam o MLD como um único dispositivo e com um único endereço MAC, embora possua múltiplas instâncias PHY/MAC para cada link. Esta configuração traz vantagens para processos de fragmentação ou remontagem de quadro e troca dinâmica entre os links por meio do MLO. A Fig. 1 ilustra o conceito de MLD, na qual é possível identificar os múltiplos enlaces PHY pertencentes a uma instância da MAC.

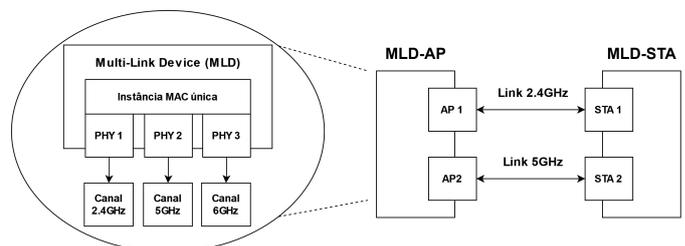


Fig. 1: Arquitetura de um MLD (baseado em [2] e [3]).

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise exploratória do uso da ferramenta de simulação ns-3 para fins de análise de desempenho e entendimento de novos recursos de transmissão disponíveis no Wi-Fi 7. O trabalho explora o uso de duas bandas simultâneas com o *Multi-Link Operation* (MLO) operando em 2, 4, 5 e 6 GHz.

## II. METODOLOGIA

A realização de análises de desempenho em sistemas de telecomunicações reais é uma tarefa complexa devido à

necessidade de dispositivos físicos para a elaboração dos experimentos. Uma alternativa metodológica para a realização dessas análises é a simulação. Como ensinado em [4], o uso de simulações traz inúmeras vantagens ao permitir o teste de comportamento dos protocolos de comunicação de diversas redes, implantadas em diversos ambientes e sujeitas a distintas situações de uso. Essa flexibilidade é inexistente, ou muito cara, ao tentar realizar experimentos em sistemas reais.

#### A. Network Simulator 3

O Network Simulator 3 (ns-3) é um simulador de redes baseado em eventos discretos e desenvolvido especialmente para pesquisa e uso educacional. Ele é uma ferramenta de simulação amplamente utilizada em todo o mundo, contando com diversos colaboradores que trabalham para conceber melhoramentos para redes emergentes. O ns-3 possui uma documentação detalhada, mas exige do usuário conceitos avançados de linguagem de programação C++ e Python. O fato de não haver uma interface intuitiva para a utilização, exigir determinado conhecimento de programação e redes/sistemas de telecomunicações, faz com que sua curva de aprendizado seja lenta, trazendo o desafio apropriado para os primeiros passos de um jovem cientista. Por essas razões, é um software utilizado neste trabalho.

### III. DESCRIÇÃO EXPERIMENTOS

Para atingir o objetivo de compreender a ferramenta de simulação e a metodologia de análise de sistemas de telecomunicações, foram realizados estudos sobre o entendimento e uso do ns-3. Foi realizado um estudo a partir do tutorial da própria ferramenta, leituras a respeito dos modelos do Wi-Fi do ns-3 e exploração dos exemplos que estão disponíveis [5]. Uma compilação do material sobre o ns-3 e uma série de novos tutoriais foram criados e disponibilizados no GitHub do grupo de pesquisa GppCom (<https://github.com/vicentesousa/ns3-intermediate-training>).

Com o entendimento inicial a respeito do ns-3 e do Wi-Fi 7, foi possível explorar os exemplos da versão 3.40 do ns-3 e utilizá-los como base para novas experimentações utilizando o MLO. Dois conjuntos de simulações são apresentados neste artigo, denominados: (i) Experimento *Rate Adaptation*; e (ii) Experimento *EHT Network*.

O Experimento *Rate Adaptation* foi construído a partir do script *wifi-rate-adaptation* do ns-3. O experimento ilustra o comportamento da técnica de *rate adaptation* Minstrel para o Wi-Fi. Este experimento consiste em um AP gerando tráfego UDP para um STA. O STA começa o experimento a uma distância de 5 m do AP e se afasta em linha reta de 1 m a cada segundo. Ao se afastar do AP, o STA ativa o algoritmo de adaptação de enlace, forçando a avaliação de troca do uso da *Modulation and Coding Scheme* (MCS). Foram executadas simulações para uma mesma configuração de rede e algoritmo de adaptação de enlace, mas alterando o padrão Wi-Fi, a fim de comparar a vazão útil (*throughput*) dos diferentes padrões.

O Experimento *EHT Network* foi realizado com base no script *wifi-eh-network* disponível no ns-3. Ele consiste na configuração de uma rede utilizando os padrões 802.11be com

um MLD-AP e um ou mais MLD-STAs dispostos em uma posição fixa. O número de MLD-STAs, a distância para os APs e outros parâmetros podem ser configurados. Os MLD-STAs transmitem pacotes UDP para o MLD-AP. Cada simulação é realizada com parâmetros fixos de rede, como: largura de banda, intervalo de guarda e MCS. Ao final é computado *throughput* médio por MLD-STA.

### IV. RESULTADO E DISCUSSÕES

#### A. Experimento Rate Adaptation

As simulações deste experimento seguiram as configurações padrões do script *wifi-rate-adaptation* (disponível no ns-3), com o objetivo de comparar as diversas versões do 802.11 sob as mesmas condições, utilizando apenas um canal de 5 GHz, com uma largura de banda (BW) de 40 MHz com tempo de 1 segundo em cada posição. Os padrões Wi-Fi testados foram:

- 802.11n: Wi-Fi 4 (2008);
- 802.11ac: Wi-Fi 5 (2012);
- 802.11ax: Wi-Fi 6 (2019);
- 802.11be: Wi-Fi 7 (2023).

A Fig. 2 é fruto do experimento e expressa o *throughput* em Mbps em função da distância entre AP e STA. É possível observar que quanto menor a distância, as gerações mais recentes do Wi-Fi conseguem entregar maior vazão de dados, pois exploram modulações de mais alta ordem. Porém, para distâncias superiores a 50 metros, a capacidade de transmissão de modulações de alta ordem não é aproveitada, devido à sua maior suscetibilidade ao erro. Esse experimento ensina que o *rate adaptation* desempenha um papel importante no compromisso entre taxa de transmissão e vulnerabilidade ao erro do canal, fazendo com que os diferentes padrões do Wi-Fi respondam de forma diferente à mesma estratégia de *rate adaptation*. Esse resultado também ilustra a superioridade de taxa de transmissão apresentada pelo Wi-Fi 7 em condições de canais menos críticas (menor distância), ao mesmo tempo que apresenta o desafio de realizar a adaptação de taxa para maiores distâncias entre AP e STA.

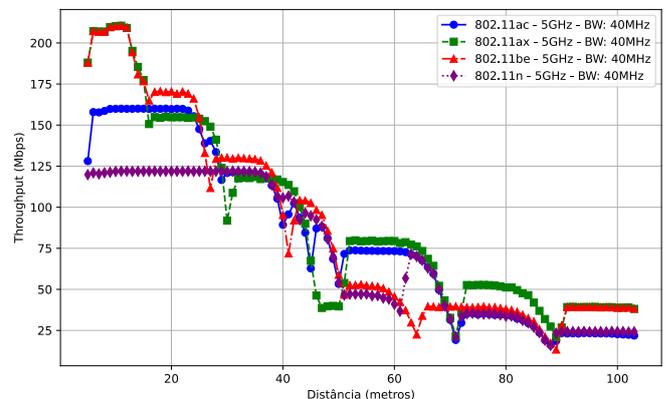


Fig. 2: Comparação de *throughput* de diferentes gerações do Wi-Fi.

#### B. Experimento EHT Network

Neste experimento, o alvo é a avaliação do uso simultâneo de dois enlaces sem fio, utilizando duas frequências por

meio do MLO. Foram executadas simulações para comparar a configuração *Single-Link* (SL) com a configuração *Multi-Link* (ML) do MLO, com tráfego TCP entre AP e STA (*downlink*) e MCS em 12 (sem *rate adaptation*).

As Figs. 3 e 4 apresentam os resultados das simulações, de modo que cada ponto de cada linha é o resultado de uma simulação isolada, na qual foi definida uma distância fixa para que fosse observado o *throughput* no MLD-STA. Então, cada linha das figuras é o resultado de simulações para uma determinada configuração de rede com valor fixo de intervalo de guarda GI (800 ou 3200 ns) e largura de banda BW (20 ou 40 MHz). Os casos com SL são mostrados em linhas azuis, enquanto para ML com linhas vermelhas.

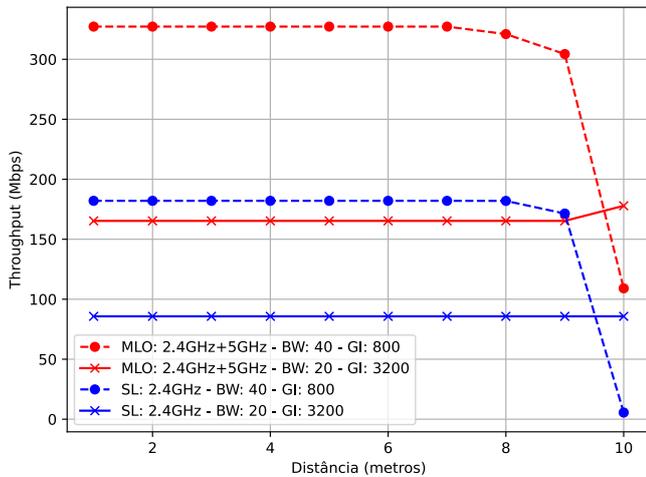


Fig. 3: Simulações de comparação Single-Link vs Multi-Link em 2,4 GHz sem *rate adaptation*.

Ao comparar o par de curvas azuis para o SL em 2,4 GHz da Fig. 3, como esperado, a configuração de maior BW e menor GI apresenta maior *throughput*. A queda de desempenho no final de uma das curvas está relacionada com a forte degradação com a distância devido ao menor GI. Assim, pode-se comprovar que o menor GI auxilia no aumento do *throughput*, porque mais símbolos podem ser transmitidos por segundo. Contudo, o menor GI pode ser problemático, especialmente em maiores distâncias, pois é mais suscetível a erros. Ao comparar as linhas SL com as linhas ML nas mesmas configurações de BW e GI, é possível perceber um ganho considerável de *throughput* do ML em relação ao SL, devido ao uso de dois links para a transmissão dos dados. Isso mostra o ganho potencial proporcionado pelo MLO. Ao comparar o par de curvas vermelhas do ML, se verifica o aumento de *throughput* causado por maior BW e menor GI, ao preço de queda de desempenho para maiores distâncias com menor GI, pelo mesmos motivos discutidos para o SL.

Fig. 4 mostra resultados para o ML em 5 GHz e 6 GHz. Os valores de GI são os mesmos que antes (800 ou 3200 ns), mas a BW assumiu 20 e 160 MHz. Os resultados indicam maior *throughput* comparada ao caso com 2,4 GHz, ao preço de maior sensibilidade à distância entre AP e STA, mesmo para os casos de GI maior. Essa maior sensibilidade à distância é devido ao MCS fixo em 12, que permite cobertura menor que 4 m para 5 GHz.

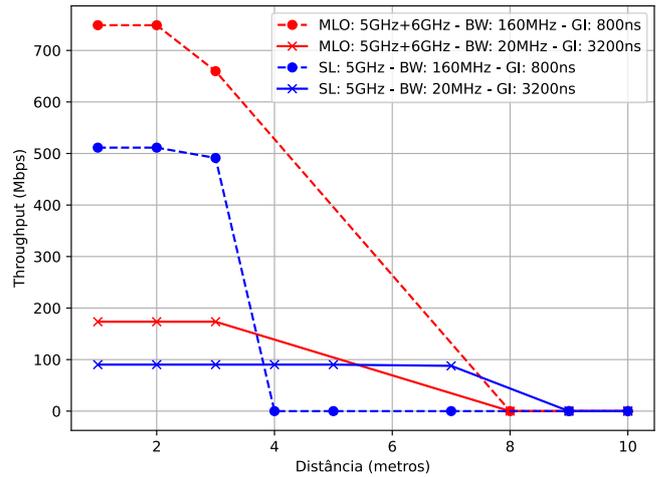


Fig. 4: Comparação Single-Link vs Multi-Link em 5 GHz sem *rate adaptation*.

## V. CONCLUSÕES

O Wi-Fi é um padrão de comunicação de grande adesão e popularidade nos dias de hoje e sua nova versão se torna um ponto relevante de estudo, especialmente devido à flexibilidade de configuração de seus parâmetros. Esse artigo apresentou uma introdução ao Wi-Fi 7 e a funcionalidade denominada Multi-Link Operation. Em seguida, apresentou o ns-3 como ferramenta de prototipagem de tal sistema, bem como uma série de tutoriais personalizados (<https://github.com/vicentesousa/ns3-intermediate-training>) para auxiliar em sua curva de aprendizado. Como principal contribuição, foi realizado um estudo exploratório dos recursos do Wi-Fi 7 no ns-3, com enfoque no MLO, a fim de avaliar a viabilidade de uso do ns-3 como ferramenta para prototipagens desta tecnologia.

Foi possível constatar que o ns-3 tem potencial para a realização de análises de desempenho de sistemas de rede Wi-Fi 7 com uso do MLO, customizando o sistema para casos de uso específicos e/ou auxiliando na prototipagem de novas funcionalidades. Estudos futuros incluem mais casos de avaliação do MLO, tais como: cenários com mobilidade, múltiplos MLD-STAs e canais sem fio mais severos.

## REFERÊNCIAS

- [1] W. Alliance, "IEEE and Wi-Fi Alliance: Synergy Driving," *IEEE Communications Standards Magazine*, 2020.
- [2] A. López-Raventós and B. Bellalta, "Multi-link operation in IEEE 802.11 be WLANs," *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, no. 4, pp. 94–100, 2022.
- [3] X. Lan, X. Zu, and J. Yang, "Enhanced Multilink Single-Radio Operation for the Next-Generation IEEE 802.11 BE Wi-Fi Systems," *Security and Communication Networks*, vol. 2022, no. 1, p. 7018360, 2022.
- [4] M. Conterato, I. de Oliveira *et al.*, "Avaliação do suporte à simulação de redes OpenFlow no NS-3," *11a. Escola Regional de Redes de Computadores, 2013, Brasil.*, 2013.
- [5] nsnam, "ns-3 website," <https://www.nsnam.org/>, [Acessado em 01-05-2025].