

Análise de Desempenho de Modos de Transmissão do Wi-Fi 7 MLO no ns-3

William M. C. do Nascimento, Daniel Rodrigues de Luna, Álvaro A. M. de Medeiros e Vicente A. de Sousa Jr.

Resumo— O *Multi-link Operation* (MLO) é o novo recurso do Wi-Fi 7 que permite a utilização simultânea de múltiplos enlaces, sendo uma oportunidade para investigações que contribuam para sua compreensão e aperfeiçoamento. Este trabalho apresenta uma análise de desempenho do MLO por meio de simulações no *network simulator 3* (ns-3), considerando os modos de operação *Multi-link Simultaneous Transmit and Receive* (STR) e *Enhanced Multi-Link-Single-Radio* (EMLSR). O estudo tem como objetivo avaliar e comparar o desempenho entre os modos de operação em diferentes configurações da rede e variando o número de dispositivos conectados. As simulações validam o funcionamento dos modos STR e EMLSR disponíveis no ns-3 em termos de *throughput*, PLR e atraso, trazendo uma discussão de como customizar o MLO para beneficiar os usuários do Wi-Fi 7. Os resultados demonstram os benefícios no MLO, contudo, revelam o desafio de manter um bom desempenho com muitos usuários na rede.

Palavras-Chave— ns-3, MLO, STR, EMLSR.

I. INTRODUÇÃO

Com o lançamento do Wi-Fi 7, baseado no padrão IEEE 802.11be [1], o mercado da nova versão de um dos padrões de comunicação amplamente utilizado no mundo vem, cada vez mais, ganhando espaço. Os dados mostram que, em 2025, o mercado do Wi-Fi 7 está em torno de 1,89 bilhões de dólares e a previsão é que, em 2030, esse valor atinja mais de 13 bilhões [2]. O crescimento desse mercado gera oportunidades para estudos de aperfeiçoamento dos padrões existentes e a concepção de novos padrões.

Um dos principais recursos adicionados no Wi-Fi 7 é o *Multi-link Operation* (MLO), que permite a utilização de múltiplos enlaces ao mesmo tempo para a transmissão entre dispositivos. Esse recurso gera implicações significativas para os fabricantes de hardware e projetistas de protocolos, uma vez que definir como operar múltiplos rádios e coordenar o tráfego entre eles, influencia o desenvolvimento dos novos equipamentos e das gerações futuras dessa tecnologia. Consequentemente, tal recurso tem atraído a atenção de pesquisadores e desenvolvedores de sistemas sem fio, que buscam compreender e propor otimizações ao padrão.

A complexidade inerente ao MLO também traz uma série de desafios técnicos que tornam a simulação uma ferramenta essencial para sua avaliação e desenvolvimento. Primeiramente, os cenários de operação com MLO envolvem

múltiplas variáveis que interagem dinamicamente — como interferência entre bandas, coordenação entre múltiplos rádios, diferenças entre os canais nas diferentes bandas e os efeitos da mobilidade do usuário. A avaliação experimental desses fatores exigiria uma infraestrutura física sofisticada e flexível, o que demandaria custos e dificuldade de reprodutibilidade. Já com simulações, é possível reproduzir uma ampla gama de cenários realistas e controlados, testando configurações que seriam inviáveis ou demoradas em ambiente físico. Além disso, a variabilidade do ambiente de rádio, especialmente em locais com densa ocupação espectral, interfere diretamente na eficácia do MLO. A simulação permite explorar situações com diferentes perfis de tráfego, níveis de congestionamento e padrões de interferência, o que é crucial para entender os limites e oportunidades do MLO em condições adversas.

Por fim, a simulação oferece visibilidade detalhada de métricas por camada, tais como latência e taxa de perda de pacotes ou quadros. Para medir tais métricas com precisão em testes empíricos, são necessários terminais e roteadores Wi-Fi de *firmware* aberto ou analisadores de redes de alto custo. Deste modo, a simulação permite uma compreensão mais profunda do comportamento do Wi-Fi 7 e possibilita a concepção de aperfeiçoamentos.

A simulação é utilizada em [3]–[6] para avaliar diversos aspectos do MLO. Comparação do MLO com a operação em único enlace [3], atraso causado por alta carga em enlaces com MLO [4], desempenho e interferência nos diversos modos de transmissão [5], [6] são alguns aspectos explorados na literatura. Contudo, esses trabalhos não explicitam a ferramenta de prototipagem, o que dificulta a reprodutibilidade dos resultados e os avanços dos estudos sobre MLO.

Apesar de recente, o padrão IEEE 802.11be já está implementado no ns-3 e vem sendo utilizado para avaliações mais específicas, como descritas a seguir. Os trabalhos [7] e [8] propõem otimização ao EMLSR. Os autores de [9] apresentam um algoritmo de agregação de MPDUs (*MAC Protocol Data Unit*) para melhorar a distribuição de pacotes e o *throughput* em cenários livres de interferência e com sobrecarga de tráfego. Buscando uma análise mais global do padrão, este artigo visa avaliar a flexibilidade do ns-3 como ferramenta de prototipagem para tal tecnologia, apresentando e analisando os diferentes modos de transmissão MLO utilizando o simulador ns-3, a fim de discutir seus desafios e benefícios. Todos os scripts implementados para esta análise são disponibilizados, permitindo que a mesma análise seja replicada e servindo de ponto de partida para outras contribuições.

Este artigo está organizado da seguinte forma: O MLO e seus modos de operação STR e EMLSR são apresentados com mais detalhes na Seção II. A Seção III introduz o ns-3 e as implementações do MLO disponíveis na versão

Os autores William Nascimento, Daniel Luna e Vicente Sousa 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. Álvaro Medeiros é do Departamento de Engenharia Elétrica da UFJF, Juiz de Fora, E-mail: alvaro.medeiros@ufjf.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).

3.43. O cenário de avaliação e as simulações realizadas são apresentados na Seção IV. Os resultados das simulações são mostrados e discutidos na Seção V. Por fim, a Seção VI conclui o trabalho.

II. MULTI-LINK OPERATION

Tradicionalmente, os dispositivos Wi-Fi são capazes de operar em canais nas bandas de 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz, porém o dispositivo utiliza cada banda de maneira independente, não havendo coordenação entre os enlaces de diferentes bandas [6]. O MLO, desenvolvido no padrão IEEE 802.11be, tem o objetivo de permitir a operação coordenada entre os *links* nas diferentes bandas para balancear carga ou agregar as transmissões [10]. Os *links* em conjunto podem ser utilizados para atender a diferentes objetivos, por exemplo, obter maior vazão útil de dados (*throughput*) e menor latência.

A. Arquitetura do Multi-link Device

Até a versão do 802.11ax, um dispositivo pode ser chamado de *Single-Link Device* (SLD), pois opera com apenas um enlace por vez [5]. Cada interface com uma Estação (STA) ou Ponto de Acesso (AP) está associada a uma BSS (*Basic Service Set*) distinta. Nessa arquitetura, há a possibilidade do uso da funcionalidade *Dual Band AP Operation*, que possibilita o AP oferecer múltiplas bandas, porém com a STA usando apenas uma por vez. Já o MLO permite que o cliente use múltiplos links em paralelo, com coordenação integrada, trazendo ganhos reais de desempenho, latência e confiabilidade [7].

Diferente do SLD, o *Multi-link Device* (MLD) é um dispositivo com uma única interface que associa múltiplos STAs ou APs a um mesmo MAC (*Media Access Control*) como um único dispositivo [7]. Essa estrutura permite que os MLDs possam utilizar múltiplos enlaces em uma mesma BSS e operar com o MLO. A Fig. 1 ilustra um comparativo entre as arquiteturas de uma rede com *Dual Band AP Operation* e uma rede MLO. Apesar da figura ilustrar apenas duas bandas, esse conceito pode ser aplicado também para três, por exemplo, com banda em 6 GHz.

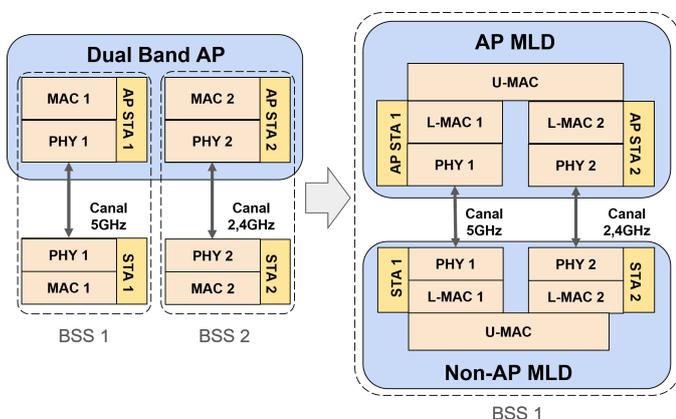


Fig. 1: Arquitetura de redes *Dual Band AP Operation* e MLD. Adaptada de [5] e [7].

Existem dois tipos de classificação de um MLD, dependendo se ele está associado a APs ou STAs. O AP

multi-link device (AP MLD) é o nome dado ao dispositivo que agrega APs. E também o non-AP *multi-link device* (non-AP MLD), quando o dispositivo agrega STAs [5]. Neste trabalho, o termo STA MLDs é usado para se referir aos non-AP MLDs.

Para poder gerenciar os múltiplos STAs com múltiplas instâncias PHY e MAC, o MLD possui uma arquitetura distinta de um SLD. Uma das mudanças importantes é o papel das duas sub-camadas da camada MAC em um MLD: a MAC superior (U-MAC - *Upper MAC*) e a MAC inferior ou L-MAC (*Low MAC*). Essas subcamadas atuam de forma complementar para permitir o controle coordenado dos múltiplos enlaces (*links*) de comunicação de um dispositivo MLD. A L-MAC é uma MAC independente para cada instância de STA do MLD, e está localizada mais próxima da camada PHY, sendo responsável pelo controle específico de cada enlace, como acesso ao meio, envio de quadros PHY e retransmissões locais [11]. A U-MAC opera acima da L-MAC e realiza o gerenciamento unificado entre os enlaces, sendo responsável pelo tráfego entre os enlaces, como a coordenação de agendamento de tráfego, controle de sequência de quadros, associação de dispositivos e decisões de balanceamento. Com essa estrutura, um MLD pode gerenciar o tráfego entre os *links* utilizando diferentes estratégias de *TID-to-link mapping* [6].

B. Modos de Transmissão do Multi-link Operation

É possível caracterizar os modos de transmissão de um MLD em vários tipos, dois deles são: o *Simultaneous Transmit and Receive* (STR) e o *Enhanced Multi-Link-Single-Radio* (EMLSR) [6].

O modo STR é definido pela operação de múltiplos enlaces com comunicação DL (*downlink*) e UL (*uplink*) de modo independente e assíncrono [6], [7], [12]. Isto significa que o dispositivo pode transmitir e receber nos dois enlaces simultaneamente. O STR é idealmente o modo de operação padrão para redes 802.11be, por apresentar o melhor desempenho em termos de taxa de transmissão. Porém, esse modo deve ser acompanhado de mecanismos de economia de energia, devido às múltiplas interfaces de rádio operando simultaneamente [11].

Além disso, outra questão relacionada à utilização de múltiplos rádios próximos fisicamente é a interferência IDC (*In-device Coexistence*) [11]. Esse efeito pode causar perda de pacotes se dois ou mais rádios operarem no mesmo canal ou em canais próximos da mesma banda, ou então, por emissões indesejadas, tais como harmônicos, emissões fora de banda, produtos de intermodulação e outras causas [13]. Portanto, é essencial que esses dispositivos utilizem tecnologias de cancelamento de interferência para lidar com esses problemas [12].

A Fig. 2 mostra um exemplo de comunicações entre dois dispositivos STR, transmitindo e recebendo PPDU (*Physical Protocol Data Unit*) de maneira independente, podendo haver momentos de transmissão e recepção simultânea.

No EMLSR, o dispositivo só utiliza um rádio por vez para realizar as transmissões através de um rádio principal, enquanto as transmissões são bloqueadas nos demais enlaces. É uma forma otimizada de operar MLO em um dispositivo que tem apenas um rádio físico, mas que alterna rapidamente entre diferentes canais. Essa alternância é gerenciada de forma inteligente para maximizar a eficiência, aproveitando o melhor

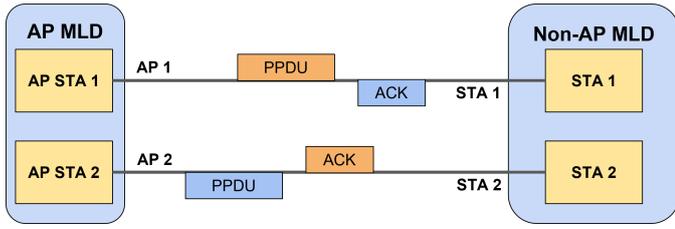


Fig. 2: Exemplo de transmissão STR. Adaptada de [6].

canal disponível sem exigir múltiplos rádios simultâneos. Dispositivos EMLSR fazem utilização de um rádio principal (*main radio*) e um rádio de varredura (*scan radio*) para auxiliar na troca dinâmica entre os *links* [7]. Enquanto o rádio principal possui funcionamento completo, o rádio de varredura tem capacidades limitadas, somente para auxiliar no funcionamento do principal. Entretanto, realizar essas trocas envolve um tempo considerável no processo de comunicação, algo entre 16 e 256 ms, a depender da implementação [7].

A Fig. 3 ilustra um exemplo de transmissão *downlink* no modo EMLSR. Quando o AP MLD envia o MU-RTS (*Multi-User Request To Send*) para solicitar o acesso, existe um pequeno tempo de espera para que o non-AP MLD possa sintonizar o rádio principal na *link* que receberá os dados. Uma vez sintonizado, o non-AP MLD responde com o CTS (*Clear To Send*) e se inicia a transmissão dos PPDUs. Quando um link está sendo usado para transmissão (TX), os outros links ficam bloqueados, e ao final, o AP MLD bloqueia suas transmissões para que haja outra transição de links do non-AP MLD [14].

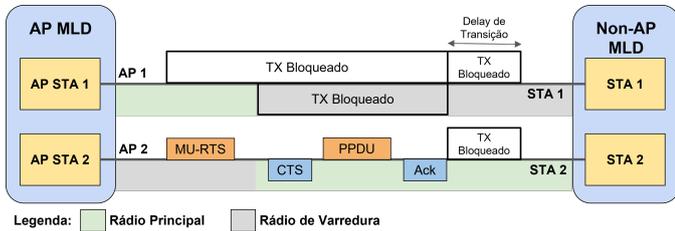


Fig. 3: Exemplo de transmissão EMLSR. Adaptado de [14] e [6].

A Tabela I traz uma comparação entre os modos de transmissão do MLO discutidos, enumerando suas principais características.

TABELA I: Comparação dos Tipos de MLO no Wi-Fi 7.

Tipo de MLO	Características
STR	Múltiplos rádios simultâneos em diferentes bandas (e.g., 5 GHz + 6 GHz). Alto custo, maior consumo de energia, maior complexidade.
EMLSR	Altera um rádio físico rapidamente entre múltiplas bandas de forma coordenada. Custo e consumo reduzidos (ideal para IoT), suporte a MLO com hardware simplificado. Sem transmissão simultânea, depende de agendamento eficiente.

III. PROTOTIPAGEM DO SISTEMA

O Network Simulator 3 (ns-3) é um simulador de redes baseado em eventos discretos desenvolvido especialmente para

pesquisa e uso educacional [15]. Ele é uma ferramenta de simulação amplamente utilizada em todo o mundo e com grandes perspectivas de crescimento, contando com diversos colaboradores que trabalham para conceber melhoramentos para redes emergentes. Por essas razões, foi o software utilizado neste trabalho.

Todavia, para trabalhar com ns-3 é necessário conhecer conceitos avançados da linguagem de programação C++ [16], desafiando sua curva de aprendizado. Porém, existe uma documentação detalhada disponível no seu site oficial [15] com descrição dos modelos implementados e tutoriais de como utilizar a ferramenta.

O ns-3 possui um módulo oficial para prototipagem de redes Wi-Fi com implementações de recursos de diversos padrões 802.11. Como discutido em [17], apenas partes dos padrões são implementados no ns-3. Os principais motivos são que muitos aspectos do Wi-Fi não são padronizados pelo IEEE, ficando a cargo da Wi-Fi Alliance e dos fabricantes de equipamentos, como forma de diferenciar seus produtos.

A. MLO no ns-3

O Wi-Fi está em pleno desenvolvimento no ns-3. A versão ns-3.38 (03/2023) introduziu o STR, enquanto o ns-3.40 suporta mecanismos para uso de múltiplas PHY e a realização de trocas entre os enlaces. Na versão ns-3.41 (02/2024), foi adicionado suporte para uso do MLO no modo EMLSR. Na versão ns-3.43 (10/2024), o sistema de coleta de logs do MLO foi aprimorado para permitir monitorar cada PHY separadamente [14]. No ns-3.44 (03/2025), foi adicionada uma nova fonte de rastreamento (*trace source*) ao EMLSR, que é acionada quando o PHY principal troca de canal para operar em outro link e fornece informações sobre o motivo do início da troca. Também foi adicionado o suporte para troca de quadros de Solicitação de Sondagem MLO. A cada atualização, são adicionadas correções de erros e melhorias para os modos do MLO.

A implementação do STR consiste na associação de múltiplas instâncias das camadas L-MAC, PHY e do canal, com o objetivo de representar os múltiplos APs/STAs associados ao AP MLD/non-AP MLD, bem como os respectivos canais de cada enlace, como na Fig. 1. Usuários mais experientes com o ns-3 podem implementar outras estratégias de acesso MLO ou implementar diferentes estratégias de gerenciamento do tráfego entre os enlaces.

As Entidades que se repetem para cada enlace são *WifiPhy*, *FrameExchangeManager* e *ChannelAccessManager* [14].

O EMLSR no ns-3 permite associar um conjunto de *links* com alguns parâmetros especiais de operação, tais como: o tempo de transição entre *links* (*EmlsrTransitionDelay*) e o tempo para tentativas de uso do canal em um *link* (*MediumSyncDelay*), entre outros.

IV. DESCRIÇÃO DO CENÁRIO DE AVALIAÇÃO

As simulações apresentadas neste artigo foram realizadas na versão 3.43 do ns-3. O *script* de simulação foi construído com base no exemplo *wifi-eth-network* (disponível no ns-3).

O cenário de comunicação consiste em uma BSS 802.11be com um AP MLD e um ou mais STA MLDs (non-AP MLDs), de modo que os dispositivos STA MLDs são dispostos em uma

posição fixa a uma distância de 1 m do AP MLD. A simulação não utilizou algoritmo de adaptação de taxa e foi configurada com enlaces *downlink* com tráfego UDP (*User Datagram Protocol*) *full buffer*. Pacotes de 700 bytes são enviados com intervalos ajustados em função do número de enlaces, do intervalo de guarda e do número de usuários, para que a rede esteja sempre transmitindo em sua capacidade máxima de tráfego. Os outros parâmetros do *script* foram utilizados nos seus valores padrão. Todos os *scripts* de simulação e montagem dos gráficos são disponibilizados em <https://github.com/vicentesousa/ns-3-wi-fi-7>.

Três modos de operação de transmissão foram considerados nas simulações: o SLO (*Single Link Operation*), que representa um dispositivo com apenas um *link*, tal qual os dispositivos legados em redes 802.11be; e os modos MLO STR e EMLSR, descritos nas seções anteriores.

Os modos de operação MLO possuem dois ou três *links*, a fim de observar a diferença do número de *links* na utilização de cada modo. Cada *link* está em uma banda diferente (6, 5 e 2,4 GHz), mas o primeiro enlace foi sempre utilizado na banda de 2,4 GHz. O intervalo de guarda escolhido foi 800 ns e a largura de banda foi 40 MHz para todos os *links*. A Tabela II apresenta os parâmetros que foram variados nas simulações.

TABELA II: Parâmetros da campanha de simulação.

Parâmetro	Valor
Número de STA MLDs	1 e 5
MCS	0 a 13
Modos Transmissão	SLO, STR e EMLSR
Número de <i>links</i>	1, 2 e 3
Frequências	6, 5 e 2,4 GHz

O objetivo desse estudo foi observar, em condições ideais de transmissão sem fio, como os modos de transmissão implementados no ns-3 (STR e EMLSR) se comportam ao variar o número de STAs, considerando diferentes esquemas de modulação e codificação (MCS) e configurações dos enlaces MLO.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados dois conjuntos de experimentos. No primeiro, o SLO foi comparado com os modos MLO, variando a MCS para 1 e 5 STAs. Também foi possível comparar o desempenho do MLO com dois e três *links*. O segundo conjunto de experimentos avalia, além do *throughput*, o atraso e a taxa de perda de pacotes (*Packet Loss Ratio* - PLR) para o MLO transmitindo com a MCS 13 para 1, 5, 10 e 30 STAs.

A Fig. 4 apresenta *throughput* agregado (soma dos bits recebidos com sucesso de todos os STAs dividido pelo tempo de simulação). São mostrados 14 conjuntos de barras, um conjunto para cada MCS, composto de 5 barras de cores diferentes, uma cor para uma configuração distinta de modo de transmissão. Enquanto o SLO foi configurado em 2,4 GHz, os modos MLO EMLSR e o MLO STR foram configurados de duas formas: 2,4 + 5 GHz (dois *links*) e 2,4 + 5 + 6 GHz (três *links*).

A Fig.4a apresenta os resultados com apenas um STA MLD, o que representa uma comunicação sem concorrência pelo canal. Nessa condição, o STR apresentou um desempenho

superior aos demais modos de transmissão, entregando aproximadamente o dobro e triplo de *throughput* em relação ao SLO, quando usados dois e três enlaces, respectivamente. Quanto ao EMLSR, percebe-se que seu desempenho foi semelhante, independente do número de enlaces, além de apresentar valores próximos, ou até um pouco menores em relação ao SLO, devido ao uso de apenas um rádio por vez e à necessidade de intervalos de transição entre os *links*.

Já a Fig. 4b mostra os resultados quando existem 5 STA MLDs, equivalente a uma comunicação com concorrência pelo canal. Desta vez, todos os modos MLO apresentam desempenho superior ao SLO, similar ao apresentado em [3]. Ao comparar o STR e o EMLSR, é possível ver desempenhos próximos entre si, apesar de ainda haver uma pequena superioridade do STR em relação ao EMLSR. Com mais STAs, o EMLSR proporciona mais opções de enlaces aos STAs e os múltiplos *links* do EMLSR podem ser utilizados simultaneamente por STAs diferentes, beneficiando o *throughput* agregado.

Para o segundo conjunto de simulações, foram mantidas as mesmas configurações da rede com transmissão em MCS 13, mas para um maior número de STA MLDs. O alvo agora são métricas por STA MLD (*throughput*, latência e a PLR por STA MLD). A Fig. 5 apresenta três sub-figuras, uma para cada métrica. Cada figura tem 4 conjuntos de barras, um conjunto para cada carga do sistema (número de STAs), composto de 3 barras de cores diferentes, uma cor para uma configuração distinta de modo de transmissão. Enquanto o SLO foi configurado em 2,4 GHz, os modos MLO EMLSR e o MLO STR foram configurados com três *links*: 2,4 + 5 + 6 GHz.

A Fig. 5a mostra que, quanto maior o número de dispositivos, mais os *throughputs* do STR e do EMLSR se aproximam, apesar de ainda serem superiores ao SLO. Ao observar o *delay* na Fig. 5b para um STA, o STR apresenta menor atraso e o EMLSR chega a mostrar maior atraso que o SLO, devido ao tempo gasto entre as transições de *links*. Porém, quando existe contenção devido ao maior número de STAs, os desempenhos dos modos MLO são superiores ao SLO, e se assemelham com o aumento do número de STAs. Se comparados os resultados da Fig. 5c, a PLR é maior no EMLSR para 1 STA, devido à perda de pacotes ao mudar de *link*, mas novamente se assemelham para redes com mais dispositivos.

VI. CONCLUSÕES

O Wi-Fi é um padrão bastante difundido e a adição do MLO no Wi-Fi 7 traz um novo recurso com muitas oportunidades de aperfeiçoamento em comparação às versões anteriores, sendo assim, um objeto relevante de estudo. Esse artigo traz uma comparação de desempenho dos principais modos de operação MLO, mostrando a perspectiva da gerência de *links*. O simulador ns-3 foi usado como ferramenta de prototipagem e teste dos diferentes modos. Como principal contribuição, foram realizadas simulações para comparar o desempenho entre os modos STR e EMLSR, revelando particularidades em relação ao número de STAs.

A partir da investigação realizada, foi possível mostrar a superioridade dos modos MLO em relação ao uso de um enlace único, tanto em relação ao *throughput*, atraso e taxa de perda de pacotes. Também foi possível observar que os modos

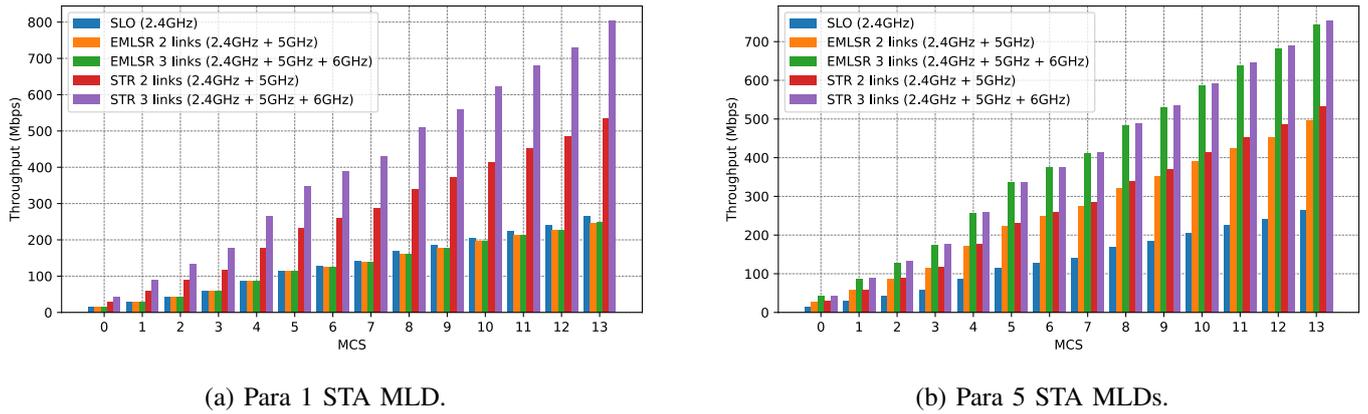


Fig. 4: Throughput agregado dos modos SLD, MLO STR e MLO EMLSR para diferentes MCSs e números de STAs.

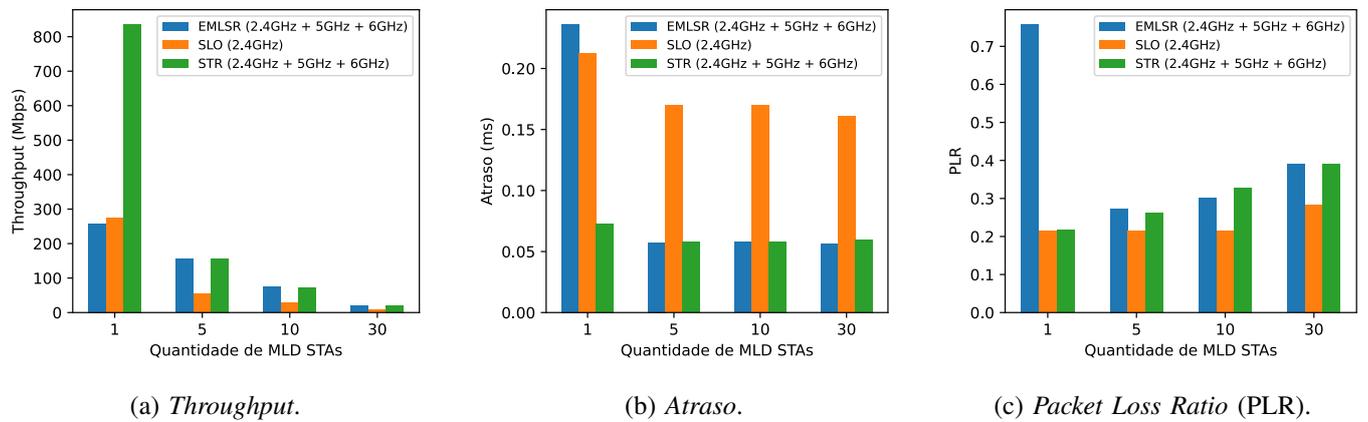


Fig. 5: Métricas dos STAs dos modos SLO, MLO STR e MLO EMLSR.

têm desempenho similar quando o número de STAs cresce. Além disso, vale destacar que o suporte ao MLO no ns-3 ainda está em desenvolvimento na versão 3.43, o que implica em limitações na configuração dos modos de operação utilizados. Estudos futuros incluem a avaliação dos modos de operação em condições realistas de tráfego (por exemplo, mobilidade e adaptação de enlace) e por outras métricas, por exemplo, consumo de energia.

REFERÊNCIAS

[1] “IEEE Approved Draft Standard for Inform. Technology–Telecomm. and Inform. Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT),” *IEEE P802.11be/D7.0*, August 2024, pp. 1–1089, 2024.

[2] “Wi-fi 7 Market Size | Mordor Intelligence — mordorintelligence.com,” <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/wi-fi-7-market>, 2025, acessado em: 19-05-2025.

[3] M. Carrascosa-Zamacois, G. Geraci, E. Knightly, and B. Bellalta, “Wi-fi multi-link operation: An experimental study of latency and throughput,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 32, no. 1, pp. 308–322, 2023.

[4] M. Carrascosa-Zamacois, G. Geraci, L. Galati-Giordano, A. Jonsson, and B. Bellalta, “Understanding multi-link operation in wi-fi 7: Performance, anomalies, and solutions,” in *2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2023, pp. 1–6.

[5] W. Murti and J.-H. Yun, “Multi-link operation with enhanced synchronous channel access in ieee 802.11be wireless lans: Coexistence issue and solutions,” *Sensors*, vol. 21, no. 23, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/23/7974>

[6] C. Chen, X. Chen, D. Das, D. Akhmetov, and C. Cordeiro, “Overview and performance evaluation of wi-fi 7,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 12–18, 2022.

[7] 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.

[8] C.-L. Tai, S. K. Venkateswaran, and R. Sivakumar, “Equitas: Fairness-aware dynamic link selection for emlsr operation in ieee 802.11 be,” in *2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring)*. IEEE, 2024, pp. 1–6.

[9] V. Paroshin, I. Levitsky, V. Loginov, and E. Khorov, “Aggregation algorithm to increase throughput of multi-link wi-fi 7 devices,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 13, no. 12, pp. 3484–3487, 2024.

[10] K. Huang, L. Huang, Y. Quan, H. Du, C. Luo, L. Lu, and R. Hou, “Multi-link channel access schemes for ieee 802.11 be extremely high throughput,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 46–51, 2022.

[11] 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.

[12] L. Kwon and E.-C. Park, “Contention-less multi-link synchronous transmission for throughput enhancement and heterogeneous fairness in wi-fi 7,” *Sensors*, vol. 24, no. 11, p. 3642, 2024.

[13] A. Sinha, R. Stuhlfauth, and F. Schmitt, “In-device coexistence interference,” *Microwave Journal*, vol. 59, no. 6, pp. 96–106, 2016.

[14] “ns-3 wi-fi module: Design documentation,” <https://www.nsnam.org/docs/release/3.43/models/html/wifi-design.html>, acessado em: 24-05-2025.

[15] “ns-3 network simulator,” <https://www.nsnam.org/>, acessado em: 19-05-2025.

[16] G. C. Furlanetto, “Geração de simuladores de filas para diferentes contextos com estudo de casos para redes de computadores,” 2016.

[17] T. Henderson, “Wi-fi models and new features,” 2024, acessado em 2 de maio de 2025. [Online]. Available: [url\[https://www.nsnam.org/tutorials/consortium24/wns3-2024-wi-fi-update-final.pdf\]](http://https://www.nsnam.org/tutorials/consortium24/wns3-2024-wi-fi-update-final.pdf)