

Testbed Open RAN 5G: Uma Avaliação da Sensibilidade ao Atraso na Interface *Open Fronthaul*

Maykon Renan Pereira da Silva, Ezequiel Reis Tavares, Gustavo Dias de Oliveira,
Flávio Henrique Teles Vieira, e Flávio Geraldo Coelho Rocha

Resumo—As redes *Open RAN*, com sua proposta de desagregação e interfaces abertas, são fundamentais para viabilizar a inovação e a interoperabilidade nas gerações pós-5G. Dentre suas interfaces, o *fronthaul* (O-FH) se destaca por sua sensibilidade à latência, sendo crítico para o desempenho global da rede. No entanto, há uma lacuna na literatura quanto a avaliações experimentais dessa interface em cenários realistas. Neste contexto, este trabalho apresenta o *testbed Open RAN* do Centro de Excelência em Redes Inteligentes Sem Fio e Serviços Avançados (CERISE-UFG), que fornece uma infraestrutura para experimentação com redes desagregadas. Utilizando esse ambiente, foram realizados testes práticos que avaliam o impacto da latência na interface O-FH, considerando diferentes configurações MIMO. Os resultados de vazão mostram que a degradação de desempenho varia conforme a configuração MIMO adotada. Os resultados de latência foram confrontados com os requisitos definidos nos padrões da O-RAN Alliance, confirmando o alto grau de exigência dessa interface para o sucesso de implementações práticas.

Palavras-Chave—5G, *Open RAN*, *Open Fronthaul*, *Testbed*

Abstract—Open RAN networks, with their proposal of disaggregation and open interfaces, are fundamental for enabling innovation and interoperability in post-5G generations. Among these interfaces, the fronthaul (O-FH) stands out due to its latency sensitivity, being critical to the overall network performance. However, there is a gap in the literature regarding experimental evaluations of this interface in realistic scenarios. In this context, this work presents the Open RAN testbed of the Centro de Excelência em Redes Inteligentes Sem Fio e Serviços Avançados (CERISE-UFG), which provides an infrastructure for experimentation with disaggregated networks. Using this environment, practical tests were conducted to assess the impact of latency on the O-FH interface, considering different MIMO configurations. Throughput results show that performance degradation varies according to the adopted MIMO configuration. Latency results were compared against the requirements defined by O-RAN Alliance standards, confirming the high level of demand of this interface for the success of practical implementations.

Keywords—5G, *Open RAN*, *Open Fronthaul*, *Testbed*

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por maior capacidade, menor latência, maior diversidade de serviços e controle inteligente das redes de comunicações móveis está impulsionando a necessidade de inovação da Rede de Acesso por Rádio (*Radio Access Network*

Os autores fazem parte do Centro de Excelência em Redes Inteligentes Sem Fio e Serviços Avançados (CERISE), sediado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia-GO, Brasil, e-mail: maykonrenan@discente.ufg.br, ezequielrtavares@discente.ufg.br, gustavodias@ufg.br, flavio_vieira@ufg.br, flavio-ogger@ufg.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Brasil – Código Financiamento 001, e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

– RAN) [1], [2]. Diante desses desafios, a arquitetura *Open RAN* da O-RAN Alliance [3] emerge como solução inovadora. Fundamentada em uma gNB com componentes interoperáveis, desagregados e conectados por interfaces abertas, a rede *Open RAN* permite que as operadoras tenham flexibilidade na escolha de equipamentos e soluções de fornecedores diversos. As interfaces padronizadas asseguram a interoperabilidade *multi-vendor*, fomentando a concorrência e o avanço tecnológico [4].

Os *testbeds* experimentais desempenham um papel indispensável para o avanço efetivo e a validação prática da arquitetura *Open RAN*. Tais plataformas oferecem ambientes controlados, realistas e replicáveis, essenciais para ir além das simulações de rede, que, embora úteis, muitas vezes não capturam com fidelidade o comportamento real do *hardware* ou as complexas nuances do canal de comunicação sem fio [5]–[8]. É importante notar que, embora seja possível desenvolver protótipos e realizar provas de conceito para funcionalidades 5G específicas utilizando Rádios Definidos por *Software* (*Software Defined Radios* – SDRs), a implantação de um *testbed Open RAN* é uma tarefa complexa que demanda atendimento aos requisitos definidos pela documentação da O-RAN Alliance.

Isto é particularmente crítico no contexto da implementação da Interface *Fronthaul* Aberto (*Open Fronthaul Interface* – O-FH). Essa interface conecta a Unidade Distribuída O-RAN (*O-RAN Distributed Unit* – O-DU) à Unidade de Rádio O-RAN (*O-RAN Radio Unit* – O-RU), sendo a interface com requisitos mais rigorosos dentro da arquitetura *Open RAN*, dentre os quais pode-se destacar: os requisitos de sincronização temporal (na casa dos microssegundos); a gestão dos Planos de Controle, Usuário e Sincronização (*Control, User, and Synchronization Planes* – C/U/S-Plane) conforme especificados para o *split* funcional 7.2x da O-RAN Alliance; e a necessidade de assegurar a interoperabilidade fim a fim em uma interface que opera com alta taxa de dados e é particularmente sensível à latência.

Trabalhos Relacionados. Nesse contexto, surgem na comunidade científica *testbeds* 5G e *Open RAN* criados com o objetivo de apoiar a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias em diferentes casos de uso. Dentre eles, destacam-se: o Colosseum, uma plataforma de emulação de espectro de rádio, projetada para permitir a pesquisa e desenvolvimento de redes sem fio de próxima geração, especialmente 5G, *Open RAN* e redes dirigidas por Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence* – IA) [9]; o 5G SMART, uma plataforma focada em aplicações industriais com 5G, com forte integração com redes privadas e computação de borda [10]; o IEEE 5G/6G *Innovation Testbed*, uma plataforma de testes para experi-

mentação em tecnologias emergentes 5G/6G, incluindo *Open RAN*, IA, Ondas Milimétricas (*millimeter Waves* – mmWave) e integração com redes ópticas [11]; a plataforma PAWR, formada pelos *testbeds* POWDER, COSMOS, AERPAW e ARA, é uma iniciativa para pesquisa experimental em redes sem fio avançadas e *Open RAN* [12], [13]; por fim, o Open-RAN@Brasil, um *testbed* nacional de experimentação para controle e gestão de infraestruturas de redes programáveis compostas por equipamentos abertos e desagregados, fornecidos por diferentes fabricantes [14].

Contribuições. Apesar das plataformas existentes, persiste uma lacuna importante no que tange à investigação experimental detalhada da sensibilidade da O-FH ao atraso, particularmente em cenários que empregam componentes comerciais diversos. A compreensão do impacto da latência nesse enlace crítico é fundamental para o desenvolvimento e popularização de redes *Open RAN*. Nesse contexto, além desse trabalho detalhar a implantação de um *testbed Open RAN*, ele apresenta uma avaliação de desempenho da O-FH sob diferentes níveis de atraso, avaliando o impacto direto na conectividade e vazão de uma rede 5G *Open RAN*, assim como conduzindo análises dos resultados obtidos em comparação com os requisitos da O-RAN Alliance para o *Open Fronthaul*.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção II apresenta a arquitetura lógica e física do *testbed Open RAN*; a Seção III descreve a metodologia experimental utilizada para avaliar o impacto da latência na interface O-FH; a Seção IV apresenta os resultados obtidos da avaliação do desempenho da O-FH sob diferentes níveis de atraso em uma rede *Open RAN*; por fim, a Seção V apresenta as conclusões e perspectivas futuras.

II. IMPLANTAÇÃO DO TESTBED OPEN RAN

A. Arquitetura

A Figura 1 mostra de forma detalhada a arquitetura lógica e física do *testbed Open RAN*, onde é possível visualizar como os componentes da rede estão conectados por interfaces padronizadas pela Projeto de Parceria de Terceira Geração (3rd Generation Partnership Project – 3GPP) e O-RAN Alliance.

O *testbed Open RAN* utiliza o Projeto Open5GS como núcleo da rede 5G [15]. O Open5GS é um projeto de código aberto baseado majoritariamente na linguagem C e desenvolvido para construir e gerenciar redes móveis 4G/5G. O Open5GS contém diversas funções de rede, dentre as quais destacam-se duas: no Plano de Controle (*Control Plane* – CP), a Função de Gestão de Acesso e Mobilidade (*Access and Mobility Management Function* – AMF) é responsável pelo gerenciamento de conexão e mobilidade do Equipamento de Usuário (*User Equipment* – UE) e, no Plano de Usuário (*User Plane* – UP), a Função do Plano do Usuário (*User Plane Function* – UPF) é responsável por transportar pacotes de dados do usuário entre a gNB e a rede externa.

Em relação à RAN, o *testbed* utiliza o projeto srsRAN 5G [16]. A srsRAN oferece suporte a desagregação da RAN, onde a Unidade de Banda Base (*Baseband Unit* – BBU) é dividida em diferentes unidades funcionais, adotando efetivamente o paradigma de desagregação proposto pela O-RAN Alliance.

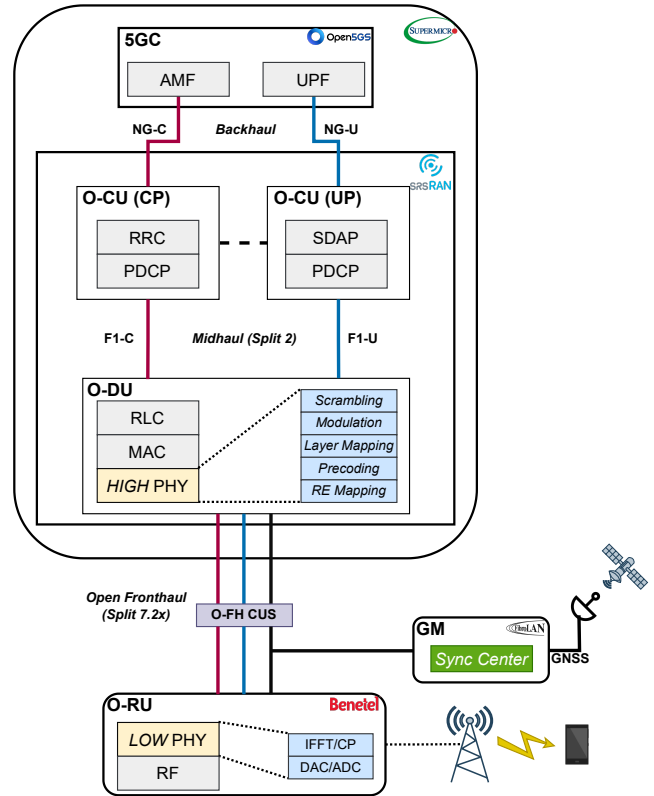


Fig. 1. Arquitetura lógica e física do *testbed Open RAN*.

A RAN é dividida em CU, DU e RU (denominadas Unidade Centralizada O-RAN (*O-RAN Centralized Unit* – O-CU), O-DU e O-RU nas especificações da O-RAN Alliance). Essa divisão lógica permite que diferentes funcionalidades sejam implantadas em diferentes locais da rede, bem como em diferentes plataformas de *hardware*. A O-CU e a O-DU se comunicam via interface F1-C (CP) e F1-U (Plano de Usuário (*User Plane* – UP)) em um *split* lógico conhecido como *midhaul*. A O-CU e o núcleo se comunicam pelas interfaces NG-C e NG-U via *backhaul*, como mostra a Figura 1.

A O-CU implementa as camadas superiores da RAN: a camada de Controle de Recursos de Rádio (*Radio Resource Control* – RRC), que gerencia o ciclo de vida da conexão entre a RAN e o UE; a camada de Protocolo de Adaptação de Dados de Serviço (*Service Data Adaptation Protocol* – SDAP), que gerencia a Qualidade de Serviço (*Quality of Service* – QoS) dos fluxos de tráfego; e a camada de Protocolo de Convergência de Dados de Pacote (*Packet Data Convergence Protocol* – PDCP), que lida com reordenação, duplicação de pacotes e criptografia. Já a O-DU possui funcionalidades da Camada Física (*Physical Layer* – PHY), mais precisamente a *High-PHY*, além das camadas de Controle de Acesso ao Meio (*Medium Access Control* – MAC) e Controle de Enlace de Rádio (*Radio Link Control* – RLC). As operações dessas três camadas da O-DU (*High-PHY*, MAC e RLC) são tipicamente sincronizadas. A camada RLC, por exemplo, após processar os dados vindos das camadas superiores, entrega-os à camada MAC na forma de Unidade de Dados de Protocolo (*Protocol Data Unit* – PDU) da RLC. A MAC, subsequentemente, utiliza

essas PDUs da RLC para construir blocos de transporte que são encaminhados para processamento pela camada física.

B. Open Fronthaul

O O-FH atua como o enlace físico que conecta uma O-DU a uma ou várias O-RUs dentro da mesma gNB. As especificações desta interface, conforme definidas pela O-RAN Alliance, são fundamentais, pois permitem a distribuição das funcionalidades da camada física entre a O-RU e a O-DU, bem como o controle das operações da O-RU a partir da O-DU. Para a divisão das funcionalidades da camada física, a O-RAN Alliance selecionou uma configuração específica dentre aquelas propostas pela 3GPP: o *split 7.2x*. Este *split* representa um equilíbrio entre a simplicidade da O-RU e as taxas de dados e latência exigidas na interface entre O-RU e O-DU. No *split 7.2x*, a O-RU executa funcionalidades da *Low-PHY*, como por exemplo, Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT), adição/remoção de Prefixo Cíclico (*Cyclic Prefix* – CP) e operações de Radiofrequência (*Radio Frequency* – RF). Ao utilizar poucas funções de processamento na O-RU, a arquitetura *Open RAN* torna a unidade de rádio economicamente mais atrativa do que outros *splits* funcionais de outros organismos internacionais, como é o caso do *split 6* defendido pela *Small Cell Forum* (SCF) [17]. A interface O-FH é dividida logicamente em três planos: o CP, responsável pelo controle e gerenciamento em tempo real da operação do O-FH; o UP, responsável pela transmissão dos dados de usuário (amostras Amostradas em Fase e Quadratura (*In-phase and Quadrature samples* – IQ)); e o Plano de Sincronização (*Synchronization Plane*), responsável pela sincronização de tempo e frequência entre a O-RU e O-DU.

C. Sincronismo

No *testbed*, o sincronismo é fornecido pelo *switch* Falcon-RX por meio do Protocolo de Tempo Preciso (*Precision Time Protocol* – PTP) combinado com Ethernet Síncrona (*Synchronous Ethernet* – SyncE), sendo distribuído através da rede de transporte, como mostra a Figura 1. Essa sincronização é essencial para o funcionamento correto de técnicas como o Duplexação por Divisão no Tempo (*Time Division Duplexing* – TDD), que exige *jitter* extremamente baixo e precisão na ordem de nanossegundos. Ao integrar o Falcon-RX à arquitetura *Open RAN*, o sinal de sincronismo é primeiramente obtido via Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* – GNSS) pelo Falcon-RX, e posteriormente, é encaminhado para a O-DU e a O-RU, que ajustam seus relógios internos com base nesse sinal. Isso permite que a transmissão das IQs pelo UP e as mensagens de sinalização do CP ocorram de forma sincronizada e sem degradação no desempenho da rede.

D. Equipamentos

A Figura 2 apresenta o *testbed Open RAN* com todos os componentes físicos interconectados. A configuração ilustrada representa uma implementação prática de uma rede 5G baseada na arquitetura *Open RAN*, utilizando equipamentos comerciais de múltiplos fornecedores.

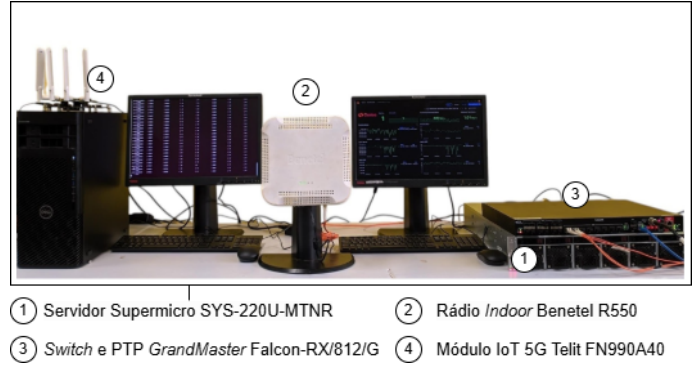


Fig. 2. *Testbed Open RAN* e todos seus componentes interconectados.

- 1) **Servidor Supermicro SYS-220U-MTNR:** responsável por executar os componentes principais da RAN: O-CU, O-DU; e o Núcleo da Rede (*Core Network*). Conta com dois processadores Intel Xeon Gold 6348 (28 núcleos e 56 *threads* cada, totalizando 56 núcleos e 112 *threads*), 256 GB de memória DDR4 ECC REG (8 módulos de 32 GB), dois SSDs SATA Samsung PM893 de 480 GB, interfaces de rede com suporte a 1/10/40 GbE.
- 2) **Rádio Indoor Benetel R550:** responsável pela conversão digital-analógica, transmissão e recepção de sinais de RF, recebendo o sinal do CP e do UP via protocolo Interface de Rádio Pública Comum Aprimorada (*enhanced Common Public Radio Interface* – eCPRI) e sincronismo via PTP (IEEE 1588v2). Essa O-RU opera na banda *n78* e possui suporte à arquitetura desagregada no *split 7.2x*, suporte a Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (*Multiple Input Multiple Output* – MIMO) 4T4R e capacidade de 100 MHz de Largura de Banda (*Bandwidth* – BW).
- 3) **Switch e PTP GrandMaster Falcon-RX/812/G:** fornece sincronismo entre O-DU e O-RU via PTP. Essencial para garantir alinhamento temporal na transmissão de símbolos usando Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* – OFDM) e funcionamento apropriado do *fronthaul*.
- 4) **Módulo 5G Telit FN990A40:** utilizado como UE no *testbed*, possibilita a realização de testes de conectividade, medições de vazão e latência.

III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesta Seção é descrita a metodologia experimental utilizada para avaliar o impacto da latência na interface O-FH. O atraso é adicionado à interface O-FH via *console linux* na O-DU. A interface O-FH é um enlace sensível à latência, ou seja, pequenos atrasos adicionais nessa interface produzem grandes efeitos negativos para o desempenho da rede *Open RAN* em termos de vazão, perda de dados, e até mesmo desconexões do UE. A latência média registrada na interface O-FH do *testbed Open RAN* foi de 130 microssegundos, valor que está dentro dos requisitos estabelecidos pelos órgãos de padronização, onde a latência máxima permitida é de 250 microssegundos [18]. Logo, o objetivo da avaliação é verificar como o *testbed Open RAN* 5G se comporta em termos de conexão e vazão

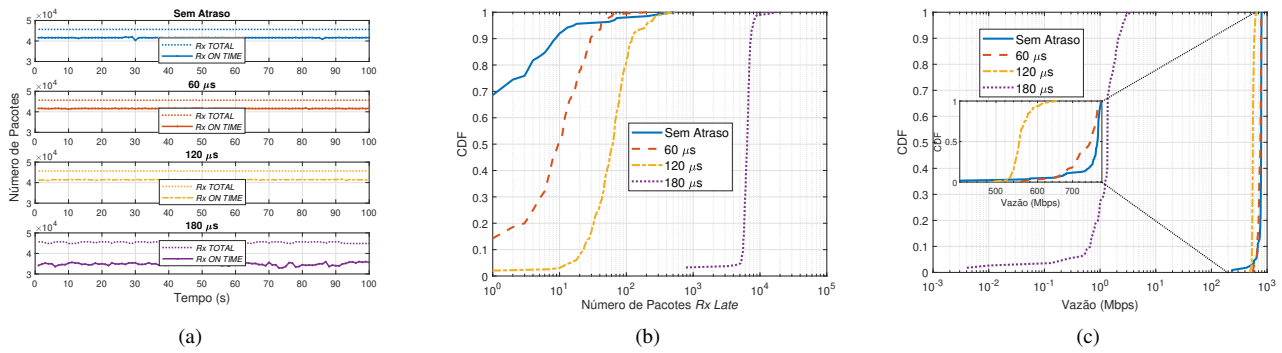


Fig. 3. Resultados obtidos para a variação do atraso inserido na interface O-FH na configuração MIMO 2T2R.

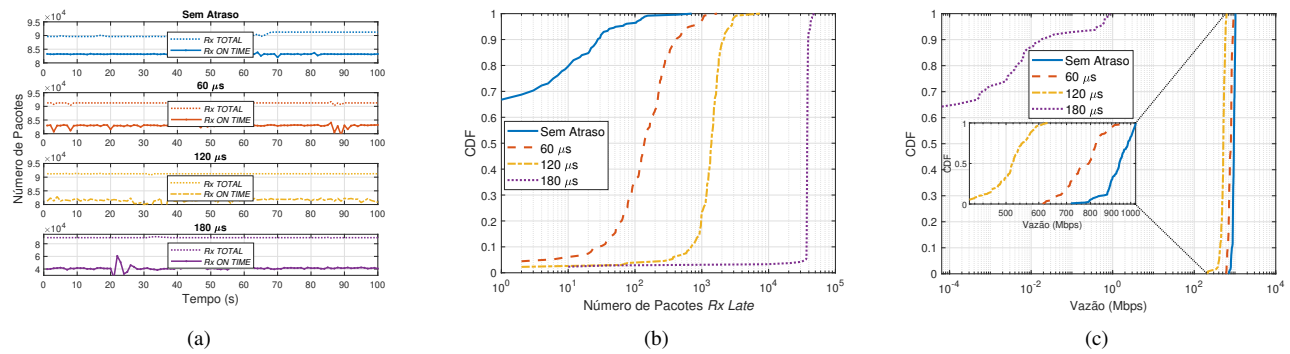


Fig. 4. Resultados obtidos para a variação do atraso inserido na interface O-FH na configuração MIMO 4T4R.

ao adicionar valores de atraso progressivamente ao O-FH. Para tanto, foram adicionados valores na faixa de 60 a 180 microssegundos em dois cenários de rede: MIMO 2T2R e 4T4R.

Os experimentos foram conduzidos utilizando o *iperf3* como gerador de tráfego *Downlink* (DL) entre o núcleo da rede (Open5GS) e o módulo 5G da Telit. Utilizou-se a O-RU Benetel R550 operando em TDD na banda *n78* com BW de 100 MHz, espaçamento de subportadora (*Subcarrier Spacing* – SCS) de 30 kHz, e potência de transmissão de 24 dBm. Utilizando Modulação e Codificação Adaptativa (*Adaptive Modulation and Coding* – AMC), o Esquema de Modulação e Codificação (*Modulation Coding Scheme* – MCS) é ajustado adaptativamente de acordo com as condições do enlace de rádio, alocando até 256-QAM em DL em condições excelentes de canal.

Adicionalmente às medições de vazão no nível do usuário, para uma análise mais aprofundada do desempenho do próprio enlace O-FH em relação ao tráfego de pacotes, foram empregadas métricas específicas, coletadas durante um período de 100 segundos para cada cenário experimental (MIMO 2T2R e 4T4R). As principais métricas consideradas incluem o número total de pacotes recebidos pela O-RU, referido como (*Rx TOTAL*), e o número de pacotes do UP que foram efetivamente transmitidos e recebidos dentro da janela de recepção esperada, denominado (*Rx ON TIME*). A obtenção desses dados foi realizada por meio da coleta de *logs* gerados pela O-RU Benetel. Esta O-RU possui contadores internos em sua implementação de O-RAN IP que monitoram e contabilizam em tempo real o

tráfego de pacotes, tanto do CP quanto do UP, que trafegam pelo enlace O-FH.

IV. RESULTADOS

Esta Seção apresenta os resultados obtidos utilizando a metodologia da Seção III. Analisando as Figuras 3a e 4a, percebe-se que ao variar os valores de atraso inseridos no enlace O-FH, há uma redução dos pacotes UP *Rx ON TIME* em relação aos pacotes *Rx TOTAL*, o que é mais evidente na configuração 4T4R. Além disso, vale ressaltar que, Figuras 3a e 4a apresentam apenas o número de pacotes *Rx ON TIME* de UP, na análise atual, desconsiderou-se, os pacotes de CP, por isso, é possível perceber que mesmo no cenário sem inserção de atraso, há uma diferença entre o número de pacotes *Rx TOTAL* e *Rx ON TIME*, que representa os pacotes de CP *Rx ON TIME*.

As Figuras 3b e 4b apresentam o número de pacotes de UP que chegam atrasados ou foram da janela de recepção (*Rx Late*) na O-RU (também fornecidos via *logs*), sem adição de atraso e após inserção de valores de atraso na interface. Como esperado, é possível perceber como o aumento de atraso na interface causa um aumento do número de pacotes UP (*Rx LATE*), tanto no cenário 2T2R quanto 4T4R, porém, é perceptível que proporcionalmente, no 4T4R a perda de pacotes é maior que no 2T2R. Dessa forma, conclui-se que o enlace O-FH se mostra mais robusto na configuração (2T2R), isso é ratificado pelos resultados mostrados nas Figuras 3c e 4c.

As Figuras 3c e 4c mostram os valores de vazão do UE nos cenários com e sem inserção de atraso adicional nas

configurações de MIMO 2T2R e 4T4R. Analisando essas figuras, percebe-se que um atraso de 180 μs somado à latência de 130 μs do enlace O-FH, totaliza uma latência de 310 μs , valor acima do *budget* de 250 μs da interface O-FH. Para esse caso, verifica-se que a rede sofre uma degradação no desempenho considerável tanto no cenário 2T2R quanto 4T4R, com vazão máxima abaixo de 10 Mbps para os dois cenários MIMO. Por outro lado, é importante ressaltar que durante os testes realizados, apesar da degradação da vazão, a conexão entre o módulo Telit e a rede *Open RAN* 5G permaneceu estável ao longo do tempo para o cenário 2T2R, mantendo um Indicador de Qualidade de Canal (*Channel Quality Indicator* – CQI) médio em torno de 10. Já na configuração 4T4R, além da degradação da vazão, houve perda de conexão em diversos momentos ao longo dos 100 segundos, onde o UE ficava em um *loop* de conexão e desconexão com a rede, neste cenário o CQI reportado pelo UE ficou entre 0 e 2. Além disso, é possível verificar que na configuração 4T4R, a degradação no desempenho da rede é gradativa com o a inserção adicional de atraso no O-FH, onde houve uma redução de mais da metade do vazão do teste “sem atraso” (ou seja, leva-se em consideração apenas os 130 μs de latência medida) para o teste “com adição de 120 μs ”. Ao analisarmos a configuração 2T2R, houve também uma redução da vazão, porém, proporcionalmente, foi menor que no 4T4R.

Por fim, os resultados demonstram a sensibilidade da rede à latência adicional na interface O-FH. Logo, em cenários onde essa latência exceda os requisitos preestabelecidos, um controle adaptativo da configuração MIMO da O-RU poderia ser uma estratégia valiosa para preservar o desempenho da rede e a qualidade de serviço do usuário.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal investigar experimentalmente a sensibilidade da interface *Open Fronthaul* (O-FH) ao atraso e o consequente impacto na conectividade e na vazão de uma rede 5G *Open RAN*. A análise foi conduzida utilizando o *testbed Open RAN* do CERISE-UFPA, uma plataforma composta por *hardware* multi-vendor e *software* de código aberto, onde foram introduzidos atrasos controlados no enlace O-FH sob configurações MIMO 2T2R e 4T4R. Os resultados experimentais revelaram que a latência no O-FH é um fator crítico que afeta diretamente o desempenho da rede. Observou-se que, embora o aumento do atraso impacte negativamente a vazão em ambas as configurações MIMO, a configuração 2T2R demonstrou uma robustez superior em termos de manutenção da conectividade com o UE, mesmo sob condições de atraso elevado. Em contraste, a configuração 4T4R mostrou-se mais suscetível à instabilidade e a perdas de conexão nessas mesmas condições. Estes achados não apenas quantificam os limites de tolerância ao atraso no O-FH, mas também sublinham a importância de um planejamento rigoroso deste enlace ou da implementação de mecanismos adaptativos em redes *Open RAN*.

Para trabalhos futuros, a equipe tem como objetivo explorar pesquisas voltadas à otimização de redes *Open RAN* que operam sob os desafios impostos pela latência no O-FH. Linhas de investigação incluem a análise comparativa

de desempenho entre diferentes implementações de *RAN open source* (como *srsRAN* versus *OAI*) em cenários com variação de atraso no *fronthaul*. Adicionalmente, planeja-se a integração do RIC, como por exemplo *FlexRIC* e *SD-RAN*, para investigar o desenvolvimento e a avaliação de *xApps*. O foco será em aplicações que permitam, por exemplo, o controle adaptativo de configurações MIMO ou o escalonamento de recursos ciente da latência do O-FH, com o objetivo de mitigar proativamente os efeitos do atraso e otimizar a qualidade de serviço na rede.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Agarwal, R. Irmer, D. Lister, and G.-M. Muntean, “Open ran for 6g networks: Architecture, use cases and open issues,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, pp. 1–1, 2025.
- [2] M. Polese, L. Bonati, S. D’Oro, S. Basagni, and T. Melodia, “Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 1376–1411, 2023.
- [3] O.-R. Alliance, “O-RAN Architecture Description,” O-RAN Alliance, Standard O-RAN.WG1.TS.OAD-R004-v13.00, 2025.
- [4] M. Polese, M. Dohler, F. Dressler, M. Erol-Kantarci, R. Jana, R. Knopp, and T. Melodia, “Empowering the 6g cellular architecture with open ran,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 42, no. 2, pp. 245–262, 2024.
- [5] O.-R. Alliance, “O-RAN Criteria and Guidelines of Open Testing and Integration Centre,” O-RAN Alliance, Standard O-RAN.TIFG.CGofOTIC.0-v05.00, 2023.
- [6] Y. Liu and M. O. A. Kalaa, “Testbed as a regulatory science tool (trust): A testbed design for evaluating 5g-enabled medical devices,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 81 563–81 576, 2023.
- [7] I. Seskar, M. Patwary, A. Dutta, R. Chaparadza, M. Elkotab, A. P. Da Silva, and A. Goswami, “Ingr roadmap testbed chapter,” in *2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*, 2023, pp. 1–61.
- [8] A. Da Silva, M. R. Chowdhury, A. Sathish, A. Tripathi, S. F. Midkiff, and L. A. Da Silva, “Cci xg testbed: An o-ran based platform for future wireless network experimentation,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 63, no. 2, pp. 62–68, 2025.
- [9] Colosseum, “Colosseum: The Open RAN Digital Twin,” 05 2025. [Online]. Available: <https://colosseum.sites.northeastern.edu/>
- [10] 5GACIA, “5G-SMART Testbed in Bosch Semiconductor Factory,” 05 2025. [Online]. Available: <https://5g-acia.org/testbeds/5g-smart-testbed-in-bosch-semiconductor-factory/>
- [11] IEEE 5G/6G Innovation Testbed, “Your Fast Lane to 5G Innovation,” 05 2025. [Online]. Available: <https://testbed.ieee.org/>
- [12] D. Raychaudhuri, I. Seskar, G. Zussman, T. Korakis, D. Kilper, T. Chen, J. Kolodziejski, M. Sherman, Z. Kostic, X. Gu, H. Krishnaswamy, S. Maheshwari, P. Skrimponis, and C. Gutterman, “Challenge: Cosmos: A city-scale programmable testbed for experimentation with advanced wireless,” in *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ser. MobiCom ’20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [13] PAWR Project, “Platforms for Advanced Wireless Research,” 05 2025. [Online]. Available: <https://advancedwireless.org>
- [14] W. Mauricio, F. H. Costa Neto, M. Silva, R. K. Y. Aoki, E. Melão, S. Barros, F. Farias, L. Bondan, and F. M. Abinader, “Assessing nationwide distributed open ran deployments with the openran@brasil testbed,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 63, no. 2, pp. 46–52, 2025.
- [15] Open5GS Contributors, “Open5gs,” <https://open5gs.org/>, 2025, a free and open-source 5G core network implementation.
- [16] srsRAN Project, “srsran project open source ran,” <https://www.srslte.com/>, 2025, open-source 4G and 5G software radio suites developed by Software Radio Systems.
- [17] Small Cell Forum, “SCF226 About 5G nFAP v1.0,” Small Cell Forum, Informative Document SCF226, September 2020, documento SCF226 disponível para busca no site do Small Cell Forum ([scf.io](https://www.scf.io/)). Acessado em 2025-05-23. [Online]. Available: <https://www.scf.io/>
- [18] E. Municio, G. Garcia-Aviles, A. Garcia-Saavedra, and X. Costa-Pérez, “O-ran: Analysis of latency-critical interfaces and overview of time sensitive networking solutions,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 82–89, 2023.