

Core 5G Open Source com RAN Comercial: Uma Avaliação de Desempenho em Rede 5G Privativa

Jefferson Maxmiliano O. das Mercês, Rilbert Lima da Silva, Marcelo Portela Sousa, Aramis Sales Araujo, Allender Vilar de Alencar, Thiago Fonseca Meneses, Michel Coura Dias e Danilo F. S. Santos

Resumo— Este trabalho avalia o desempenho de uma rede 5G privativa composta por um *core open source* (Open5GS) e uma Rede de Acesso de Rádio (*Radio Access Network*, RAN) comercial. Experimentos foram realizados com diferentes configurações de *hardware*, sob a análise de métricas como taxa de transmissão e latência. Os resultados demonstram que o desempenho da rede implementada está associado à frequência de processamento da CPU, em que o *core* 5G opera. O cenário com processador de maior frequência apresentou ganho de até 175,93% na taxa de *download*, ainda que sob o uso de um menor número de núcleos de processamento.

Palavras-Chave— Redes 5G Privativas, Open5GS, Avaliação de Desempenho.

Abstract— This work evaluates the performance of a private 5G network composed of an open source core (Open5GS) and a commercial Radio Access Network (RAN). Experiments were conducted using different hardware configurations, analyzing metrics such as throughput and latency. The results demonstrate that the performance of the implemented network is associated with the CPU processing frequency where the 5G core operates. The scenario with the highest frequency processor showed a gain of up to 175,93% in download rate, even when using a lower number of processing cores.

Keywords— Private 5G Networks, Open5GS, Performance Evaluation.

I. INTRODUÇÃO

As redes 5G privativas operam em infraestruturas dedicadas, personalizadas e viabilizam aplicações industriais com alto desempenho. Elas operam em ambientes específicos, controlados por uma organização e são mais seguras do que as redes públicas. Também podem ser implementadas em modo híbrido, ou entregues por *network slicing* (NS) [4].

Essas redes utilizam funções virtualizadas (*Virtual Network Functions*, VNFs), em que componentes do Núcleo de Rede 5G (5G Core Network, 5GC), como a *Access and Mobility Management Function* (AMF) e a *User Plane Function* (UPF), são virtualizados, e não possuem forte dependência de um *hardware* dedicado. Portanto, essas funções são alocadas sobre recursos de *hardware* arbitrário, ou seja, um servidor que não possui componentes especializados para redes 5G e que podem executar outras aplicações em paralelo [3].

Jefferson Maxmiliano O. das Mercês, Rilbert Lima da Silva, Marcelo Portela Sousa e Michel Coura Dias são do Instituto Federal da Paraíba, E-mails: {jefferson.oliveira, rilbert.lima}@academico.ifpb.edu.br e {marcelo.portela, michel.dias}@ifpb.edu.br. Aramis Sales Araujo, Allender Vilar de Alencar, Thiago Fonseca Meneses e Danilo F. S. Santos são do Núcleo VIRTUS, da Universidade Federal de Campina Grande, E-mails: {aramis.araujo, allender.alencar, thiago.meneses, danilo.santos}@virtus.ufcg.edu.br.

Assim como o 5GC, a Rede de Acesso de Rádio (*Radio Access Network* – RAN) integra a arquitetura das redes 5G. Pesquisas técnicas têm avaliado o desempenho de ambos, com a integração de plataformas virtualizadas *open source* [1]. Por exemplo: o Open5GS [12] e o free5GC [11], para funções específicas de *core*; o UERANSIM e o OpenAirInterface, para as funções de RAN.

Em [10], Mamushiane et al. testaram a carga da UPF em redes 5G, por meio do Open5GS e do UERANSIM. Eles avaliaram a eficiência da UPF em termos de utilização da CPU sob diferentes cargas de tráfego, tanto no plano de controle, quanto no plano de usuário. Os resultados indicam que a implementação da UPF no Open5GS suporta até 200 conexões de dados simultâneas, com 17% de uso de CPU, e 200 conexões de tráfego de controle, com 15% de uso da CPU.

Já no artigo [13], uma avaliação de desempenho da transmissão de vídeo em redes 5G privativas é apresentada, com foco em aplicações de visão computacional para a Indústria 4.0. Uma infraestrutura baseada no free5GC e no OpenAir-Interface foi implementada, com o objetivo de analisar a comunicação de vídeos a partir de um dispositivo final para um servidor de borda. O estudo mede a quantidade de quadros enviados em resoluções variadas e analisa as taxas de transmissão por meio da ferramenta iPerf3 [8]. Os resultados indicam uma média de 94 Mbps, para o *downlink*, e 21 Mbps para o *uplink*.

Por fim, no artigo [9], testes de taxa de transmissão foram realizados em uma arquitetura de NS 5G, utilizando soluções *open source*, como o OpenStack, free5GC, UERANSIM e Tacker. Lee et al. avaliam o desempenho da rede em múltiplos cenários, incluindo medições de taxas de transmissão em *uplink* e *downlink* por meio das ferramentas iPerf3 e Speedtest. Os resultados demonstram que a comunicação direta entre máquinas virtuais atinge valores próximos de 1 Gbps, enquanto a comunicação via UPF registra redução, com um valor máximo de 635 Mbps.

Os trabalhos revisados da literatura revelam uma lacuna: os testes de transmissão de dados com *core* de rede 5G foram realizados exclusivamente com uma única configuração de *hardware*, sem considerar variações entre dispositivos disponíveis na indústria. Essa abordagem restrita inviabiliza uma análise comparativa mais robusta, importante para compreender como diferentes configurações de *hardware* influenciam o desempenho de redes baseadas em 5GC *open source*.

Neste artigo, o desempenho de uma rede 5G privativa é avaliado, com base em um *core open source* (Open5GS)

e em uma RAN comercial, do provedor de soluções em Telecomunicações Comba Telecom [2]. O método de avaliação consiste na análise das taxas de transmissão em *downlink* e em *uplink* por meio do uso das ferramentas iPerf3 [8] e LibreSpeed [5]. Para a operação do Open5GS, três *hardware* com diferentes características de frequência de processamento foram utilizados.

As seções subsequentes estão organizadas da seguinte maneira: a Seção II descreve os parâmetros da rede 5G privativa implementada e avaliada neste artigo; a Seção III apresenta a infraestrutura e metodologia utilizadas para a avaliação de desempenho; a Seção IV apresenta os resultados e discussões sobre os experimentos realizados. A Seção V conclui o trabalho e traz perspectivas de produções futuras.

II. PARÂMETROS DA REDE 5G PRIVATIVA

O Open5GS é um projeto *open source* para a implementação de *core* de rede 5G e permite a criação de redes privadas ou ambientes de teste para pesquisa e desenvolvimento. Sua arquitetura modular suporta tanto o modo *Non-Standalone* (NSA), que integra componentes para as redes 4G e 5G, quanto o *Standalone* (SA), seguindo a Arquitetura Baseada em Serviços (*Service-Based Architecture* - SBA) definida pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP). Sua instalação e uso são simplificados por pacotes pré-compilados para distribuições como Ubuntu e Debian, além de suportar implantações em contêineres via Kubernetes ou OpenShift, o que a torna versátil para ambientes de nuvem. A rede 5G privativa avaliada neste artigo é do tipo SA e utiliza o Open5GS na versão 2.7.2, implementado em contêineres Docker [6].

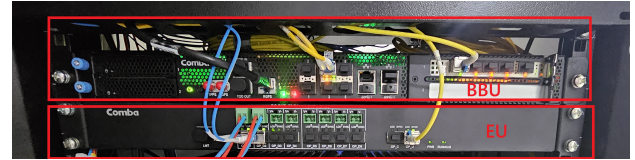
A RAN gerencia a conectividade sem fio entre o Equipamento do Usuário (*User Equipment* – UE) e o 5GC. Nesta arquitetura, a RAN da empresa Comba Telecom utilizada é composta de: uma *Baseband Unit* (BBU) (modelo ENB-5186A-II2), uma unidade de *Switch Fronthaul* (modelo ENB-5110E-II2) e uma unidade de rádio (*Radio Unit* – RU) (modelo ENB-5125D20R). A BBU conecta o Open5GS ao *Switch Fronthaul*. Nela, os seguintes parâmetros da rede 5G podem ser definidos: frequência de operação; *Public Land Mobile Network* (PLMN); largura de banda; e potência do sinal transmitido. Por sua vez, o *Switch Fronthaul*, conecta a BBU à RU, informa parâmetros de irradiação da rede 5G e fornece alimentação elétrica à RU.

A BBU suporta uma taxa nominal de *download* de 1,5 Gbps, com modulação 256-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), e *upload* de 285 Mbps, com modulação 64-QAM. A RU opera na banda 5G NR N78 (3300 MHz – 3800 MHz), com *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) 4T4R (4 transmissores e 4 receptores) e largura de banda de 100 MHz para cada par de antena. O esquema *Time Division Duplex* (TDD) 7D2U foi utilizado, em que uma estrutura de 7 símbolos para *downlink* e 2 símbolos para *uplink*, por *slot*, prioriza o tráfego assimétrico com ênfase no *downlink*. Para a conexão dos UEs ao Open5GS, o PLMN de identificador 00101 foi definido. Esse PLMN é reservado para fins de teste e desenvolvimento, conforme especificado pelas normas do 3GPP, e foi configurado de forma integrada no Open5GS, na RAN e nos cartões SIM utilizados no ambiente experimental.



(a) Unidade de Rádio.

(b) UEs.



(c) BBU e Switch Fronthaul.

Fig. 1: Infraestrutura da rede 5G privativa implementada.

Os seguintes dispositivos foram utilizados como UEs: um *smartphone* Samsung, do modelo Galaxy S23 Ultra¹; e um roteador Intelbras modelo GX 3000 [7]. Os experimentos foram realizados no laboratório Embedded, onde está instalada a infraestrutura da rede 5G privativa, utilizada no projeto Ind-5. A área aproximada do local dos testes é de 38 m² e a Fig. 1 ilustra os principais dispositivos utilizados nessa rede.

III. METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

A metodologia adotada para a execução dos experimentos utilizou três especificações de *hardware* distintas, conforme apresentado na Tabela I. O primeiro envolve processadores com mais núcleos e baixa frequência, típicos de servidores que são eficientes em tarefas paralelizadas, mas podem ser limitados para situações que exigem alta taxa de processamento. O segundo cenário refere-se a processadores de *workstation*, com menos núcleos do que os de servidores, mas com uma frequência de processamento intermediária, que proporciona um equilíbrio entre desempenho paralelo e taxa de processamento. O terceiro cenário envolve processadores com menos núcleos, porém com alta frequência, ideais para atividades que exigem alto poder de processamento e baixa latência, mas que podem ser limitados em tarefas que demandam paralelismo.

Os testes foram realizados com duração de 100 segundos por experimento e os resultados foram coletados e salvos em arquivos de formato texto. Um *script* em Python, para processar a métrica de taxa de transmissão, foi desenvolvido.

TABELA I: Comparação de especificações de *hardware* utilizadas nos experimentos.

Cenários	CPU	Memória RAM	Armazenamento
Cenário 1	Xeon Gold 6230 2,10GHz	630 GB	2,86 TB
Cenário 2	Core i7-6700 3,4GHz	32 GB	1 TB
Cenário 3	Core i9-14900K 5,6GHz	128 GB	1,43 TB

No Cenário 1, a implementação do *core* de rede Open5GS foi realizada sobre o hipervisor Proxmox, versão 8.2, em uma

¹<https://shop.samsung.com/br/galaxy-s23-ultra-5g-256gb/p>

Máquina Virtual (VM) com 16 núcleos virtualizados, 16 GB de memória RAM e 160 GB de armazenamento. A segunda VM, responsável pela coleta de métricas de desempenho, foi configurada com 18 vCPUs, 12 GB de memória RAM e 32 GB de armazenamento. Nessa VM, as ferramentas LibreSpeed e iPerf3 foram instaladas para a realização das medições. O iPerf3 avaliou a taxa de transferência no *downlink*. O LibreSpeed mediu as taxas de *download*, de *upload* e a latência. A utilização combinada dessas ferramentas permitiu uma melhor avaliação do desempenho e da estabilidade da rede [14].

Ainda referente ao Cenário 1, oito experimentos foram executados e organizados da seguinte maneira: com o *smartphone* Samsung S23 Ultra, dois experimentos utilizaram a ferramenta iPerf3 e dois, o LibreSpeed. A mesma metodologia foi adotada com o Intelbras GX 3000.

No Cenário 2, o Open5GS foi implementado diretamente sobre o *hardware* físico da *workstation*, sem a camada do hipervisor. Isso permitiu que o 5GC acessasse diretamente os recursos de *hardware*, como os 8 núcleos da CPU, memória, armazenamento e interfaces de rede.

Já no Cenário 3, a implementação do Open5GS ocorreu sobre o hipervisor Proxmox, versão 8.2. A configuração do *Core* incluiu 4 núcleos virtualizados, 16 GB de memória RAM e 40 GB de armazenamento.

Inicialmente, um cenário de referência (sem a utilização da RAN) foi implementado, por meio da comunicação em rede exclusivamente cabeada. As métricas de taxa de transmissão e latência (em *Round-Trip Time* – RTT) foram utilizadas. O destino foi a VM LibreSpeed e a origem, um *notebook* com as seguintes características: Windows 11, CPU 12^a Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H 2.30 GHz, 32 GB de RAM e 512 GB de armazenamento. Os indicadores de desempenho coletados servem como base comparativa para os experimentos subsequentes, realizados com a presença da RAN.

Um *switch* de modelo Dell S3048-ON² foi utilizado para realizar a comunicação entre a RAN e o Open5GS. A Fig. 2 representa a arquitetura implementada para a execução dos experimentos. Após a primeira rodada para o levantamento de referência, os três cenários propostos foram executados individualmente e de maneira sequencial. Por exemplo, uma vez que o experimento com o Cenário 1 tenha sido realizado, ele é desconectado da infraestrutura e o Cenário 2 passa a ser utilizado para a avaliação de desempenho da rede.

IV. RESULTADOS

A Fig. 3 apresenta o comportamento de taxa de transmissão obtido para o cenário de balizamento em referência de desempenho, sem o uso de RAN 5G. A ferramenta iPerf3 foi utilizada, com tráfego *User Datagram Protocol* (UDP) de 1 Gbps, para avaliar a capacidade máxima da interface de rede. De maneira complementar, a Tabela II apresenta os valores obtidos por meio da ferramenta LibreSpeed. A partir da execução dos experimentos em duas sessões e a obtenção

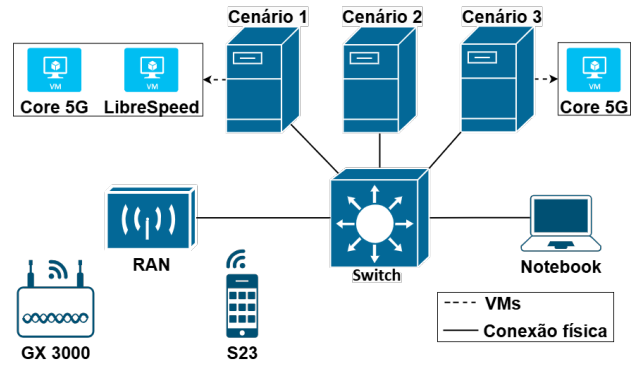


Fig. 2: Arquitetura projetada para a execução dos experimentos na rede 5G privativa.

da média entre eles, os resultados indicam que a rede consegue entregar valores de taxa de *download* e de *upload* próximos aos nominais das interfaces Gigabit Ethernet utilizadas na rede cabeada de referência.

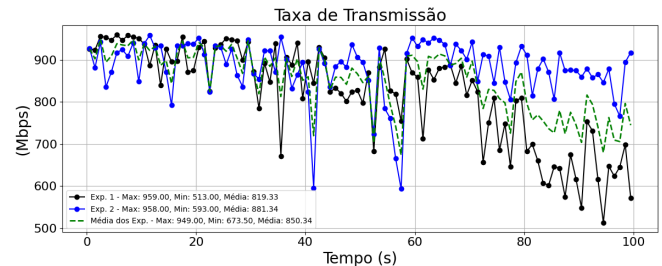


Fig. 3: Valores de referência da métrica taxa de transmissão obtidas com a ferramenta iPerf3.

TABELA II: Comparação de métricas de desempenho utilizando o LibreSpeed na rede de referência (cabeada).

Métrica	Exp. 1	Exp. 2	Média	Desvio Padrão
Download (Mbps)	1008	1002	1005	4,24
Upload (Mbps)	998,00	992,00	995,00	4,24
Latência (ms)	1,10	1,00	1,05	0,07

A. Cenário 1

Os resultados obtidos com o iPerf3, para o *smartphone* e o GX 3000, estão apresentados na Fig. 4. Os testes foram conduzidos em intervalos de tempo distintos para evitar a competição pelo uso de recursos. O *smartphone* apresentou desempenho superior na rede 5G, atingindo uma taxa média de transferência de 557,52 Mbps, enquanto o GX 3000 registrou 64,52 Mbps. A diferença de desempenho observada deriva da disparidade de especificações técnicas dos dispositivos. O *smartphone* utiliza o processador Snapdragon 8 Gen 2 (Qualcomm SM8550-AC), cuja taxa nominal de *download* alcança até 10 Gbps. Em contraste, o GX 3000 opera com capacidade máxima de 2,47 Gbps [7], valor aproximadamente quatro vezes inferior ao do *smartphone*.

²<https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/products/networking/technical-support/dell-networking-s3048-on-spec-sheet.pdf>

Com o LibreSpeed, o *smartphone* apresentou maior taxa de transmissão, tanto no *download*, atingindo valor médio de 311,50 Mbps, quanto no *upload*, com 171 Mbps. Já o GX 3000 obteve médias inferiores, de 257 Mbps no *download* e 142 Mbps no *upload*. Entretanto, o GX 3000 exibiu desempenho superior quanto à latência, com valor médio de 30,20 ms, comparado aos 32,95 ms do *smartphone*, conforme apresentado na Tabela III.

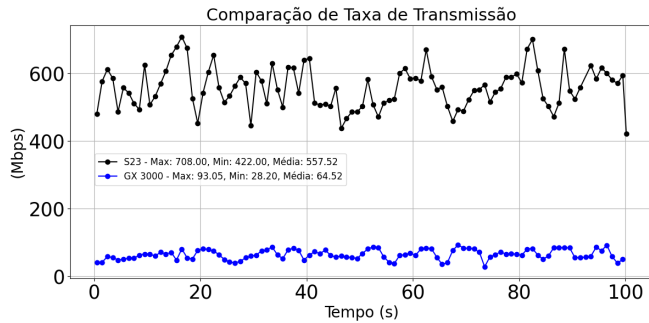


Fig. 4: Valores obtidos com o iPerf3 para os UEs S23 e GX 3000 no Cenário 1.

TABELA III: Comparação das métricas de desempenho dos experimentos com o LibreSpeed no Cenário 1.

Galaxy S23 Ultra				
Métrica	Exp. 1	Exp. 2	Média	Desvio Padrão
Download (Mbps)	307	316	311,50	6,36
Upload (Mbps)	170	172	171	1,41
Latência (ms)	36,40	29,50	32,95	4,88
GX 3000				
Métrica	Exp. 1	Exp. 2	Média	Desvio Padrão
Download (Mbps)	252	262	257	7,07
Upload (Mbps)	114	170	142	39,60
Latência (ms)	35,90	36,50	30,20	0,42

B. Cenário 2

No Cenário 2, com o Open5GS implementado em *baremetal*, a mesma metodologia de testes do Cenário 1 foi aplicada. O uso da ferramenta iPerf3 indicou um desempenho inferior ao do primeiro cenário, ao medir a taxa de transferência com o *smartphone*, que registrou uma média de 530,68 Mbps, enquanto no primeiro cenário o valor foi de 557,52 Mbps. Por outro lado, ao comparar o desempenho do GX 3000, o Cenário 2 apresentou um resultado superior, com uma média de 79,66 Mbps, em contraste com os 64,52 Mbps observados no primeiro cenário, conforme ilustrado na Fig. 5.

Conforme mostrado na Tabela IV, no segundo experimento com o LibreSpeed, a taxa de transmissão atingiu um pico de 518 Mbps e uma média de 499,5 Mbps. Além disso, a latência apresentou desvio padrão próximo a um. Já o GX 3000 obteve média de 384,50 Mbps no *download*, valor superior aos 257 Mbps registrados no Cenário 1.

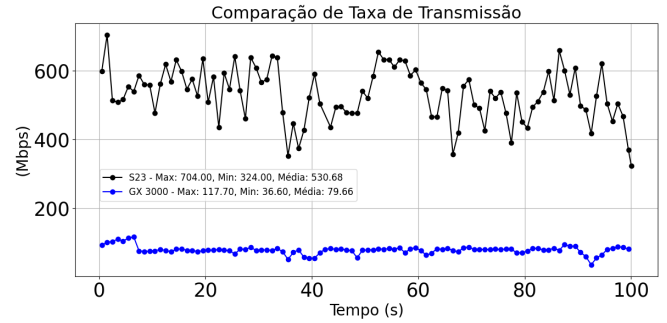


Fig. 5: Valores obtidos com o iPerf3 para os UEs S23 e GX 3000 no Cenário 2.

TABELA IV: Comparação das métricas de desempenho com o LibreSpeed no Cenário 2.

Galaxy S23 Ultra				
Métrica	Exp. 1	Exp. 2	Média	Desvio Padrão
Download (Mbps)	481	518	499,5	26,16
Upload (Mbps)	167	171	169	2,83
Latência (ms)	31,9	29,8	30,85	1,48
GX 3000				
Métrica	Exp. 1	Exp. 2	Média	Desvio Padrão
Download (Mbps)	277	292	384,50	10,61
Upload (Mbps)	167	172	169,50	3,54
Latência (ms)	23,50	37,70	30,60	10,04

C. Cenário 3

No Cenário 3, maiores taxas de transmissão para ambos os UEs foram coletadas pelo iPerf3, com destaque para o *smartphone*, que atingiu taxa máxima de 690 Mbps no *download* e média de 481,85 Mbps. O GX 3000 também apresentou desempenho superior, com média de 66,16 Mbps, valor ligeiramente acima dos 64,52 Mbps registrados no Cenário 1, conforme ilustra a Fig. 6.

Já com a ferramenta LibreSpeed, ambos os UEs apresentaram desempenho superior em comparação aos cenários anteriores. O *smartphone* alcançou 865 Mbps no *download*, com média de 859,5 Mbps. O GX 3000 registrou uma média de 725 Mbps no *download* e 178 Mbps no *upload*, com desvio padrão igual a zero, conforme a Tabela V.

Ao analisar os resultados obtidos no Cenário 3 e compará-los com os Cenários 1 e 2, uma vantagem significativa no desempenho relacionado à frequência do processador é observada. Neste cenário, há um incremento substancial na taxa de transmissão de dados em *download*, com um valor aproximado de 175,93% (em relação ao Cenário 1, com o *smartphone* e pelo LibreSpeed). Essa melhoria foi alcançada sem a necessidade de utilizar componentes especializados para aceleração de dados, como Unidade de Processamento de Dados e Placas de Interface de Redes Inteligentes (SmartNICs).

Esse resultado reforça a dependência da frequência de processamento no contexto da implementação do 5GC *open source*, destacando a importância da escolha do *hardware* para a obtenção de um desempenho ideal em cenários que envolvem

alta taxa de transferência de dados.

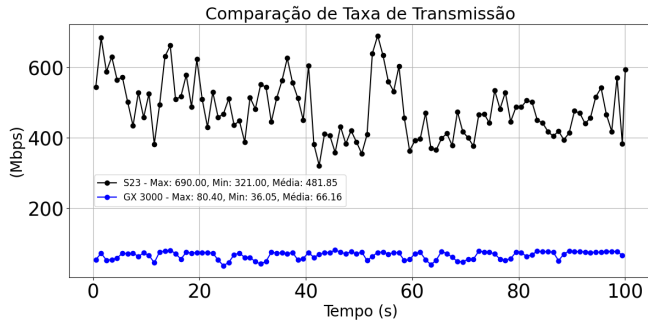


Fig. 6: Comparação de desempenho entre UEs S23 e GX 3000 no Cenário 3.

TABELA V: Comparação das métricas de desempenho com o LibreSpeed no Cenário 3.

Galaxy S23 Ultra				
Métrica	Exp. 1	Exp. 2	Média	Desvio Padrão
Download (Mbps)	854	865	859,5	7,78
Upload (Mbps)	164	184	174	14,14
Latência (ms)	32,8	27,2	30	3,96
GX 3000				
Métrica	Exp. 1	Exp. 2	Média	Desvio Padrão
Download (Mbps)	697	753	725	39,60
Upload (Mbps)	178	178	178	0
Latência (ms)	20,20	35,50	27,85	10,82

V. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma avaliação comparativa do desempenho de um 5GC *open source*, operando sobre diferentes configurações de *hardware*, em uma rede 5G privativa. Os resultados demonstraram que o desempenho do Open5GS está associado à frequência de processamento da CPU, indicando que arquiteturas com maior frequência, mesmo com menor número de núcleos, podem oferecer ganhos significativos em termos de taxa de transmissão e estabilidade da comunicação. No cenário com o melhor desempenho observado (Cenário 3), houve uma melhoria de até 175,93% em relação ao cenário de pior desempenho (Cenário 1), em taxa de *download*.

As expectativas para trabalhos futuros incluem a aplicação dessa infraestrutura de rede 5G privativa em ambientes industriais com robôs autônomos e a investigação do uso de aceleradores de rede dedicados, como as SmartNICs.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FINEP através do convênio Ref. 2826/22 com recursos financeiros do FNDCT/MCTI, e pelo CENTRO DE COMPETÊNCIA EMBRAPII VIRTUS EM HARDWARE INTELIGENTE PARA INDÚSTRIA - VIRTUS-CC, com recursos financeiros oriundos do PPI HardwareBR do MCTI, por meio do Termo de Cooperação 055/2023, firmado com a EMBRAPII.

REFERÊNCIAS

- [1] Maria Barbosa et al. “Open-Source 5G Core Platforms: A Low-Cost Solution and Performance Evaluation”. Em: *2025 International Conference on Information Networking (ICOIN)*. 2025, pp. 99–104. DOI: 10.1109/ICOIN63865.2025.10992769.
- [2] Comba Telecom. *Comba Telecom*. [Acessado em: 4 abr. 2025]. 2025. URL: <https://comba-telecom.com.br/>.
- [3] E. Dahlman, S. Parkvall e J Skold. *5G NR The Next Generation Wireless Access Technology*. 2ª ed. Academic Press, 2020.
- [4] Menachem Domb et al. “Securing 5G Networks by Mitigating Cybersecurity Risks for Transformative Applications”. Em: *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)* 19.11 (jun. de 2025), pp. 227–255. DOI: 10.3991/ijim.v19i11.54519. URL: <https://online-journals.org/index.php/i-jim/article/view/54519>.
- [5] Federico Dossena. *LibreSpeed*. [Acessado em: 4 abr. 2025]. 2025. URL: <https://github.com/librespeed/speedtest>.
- [6] Herle Supreeth. *docker_open5gs*. [Acessado em: 11 jul. 2025]. 2025. URL: https://github.com/herlesupreeth/docker_open5gs.
- [7] Intelbras. *intelbras'.compt-brroteador-5g-gx-3000*. [Acessado em: 27 mar. 2025]. 2025. URL: <https://www.intelbras.com.br/pt-br/roteador-5g-gx-3000>.
- [8] Kirth Gersen. *iPerf3*. [Acessado em: 4 abr. 2025]. 2025. URL: <https://iperf.fr/iperf-download.php>.
- [9] Kuan-Lin Lee, Chung-Nan Lee e Ming-Feng Lee. “Realizing 5G Network Slicing Provisioning with Open Source Software”. Em: *2021 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*. 2021, pp. 1923–1930.
- [10] L. Mamushiane et al. “Towards Stress Testing Open5GS Core (UPF Node) On A 5G Standalone Testbed”. Em: *2023 IEEE AFRICON*. 2023, pp. 1–6. DOI: 10.1109/AFRICON55910.2023.10293284.
- [11] National Yang Ming Chiao Tung University. *free5GC*. [Acessado em: 4 abr. 2025]. 2025. URL: <https://free5gc.org/>.
- [12] Open5GS. *Open5GS Core Network*. [Acessado em: 4 abr. 2025]. 2025. URL: <https://open5gs.org/>.
- [13] R. L. Silva et al. “Avaliação de Desempenho da Transmissão de Vídeo em uma Rede 5G Privada Utilizando Soluções de Código Aberto”. Em: *Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (2024)*. DOI: 10.14209/sbrt.2024.1571036787.
- [14] Shalitha Wijethilaka e Madhusanka Liyanage. “Survey on Network Slicing for Internet of Things Realization in 5G Networks”. Em: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 23.2 (2021), pp. 957–994. DOI: 10.1109/COMST.2021.3067807.