

Redirecionamento Dinâmico de Tráfego em Rede de Transporte 5G Definida por *Software*

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

Resumo—A adoção de Redes Definidas por *Software* (SDN) é uma alternativa promissora para permitir o controle centralizado, reconfiguração dinâmica e flexibilidade no encaminhamento de tráfego em Redes 5G. Este artigo investiga o redirecionamento adaptativo de tráfego em uma rede de transporte 5G baseada em SDN, considerando diferentes tempos para a recuperação da rota principal. Com o uso da controladora ONOS, cenários com degradação progressiva da Rota 1 foram simulados e o desempenho de três caminhos foi analisado: Rota 1 (principal), Rota 2 (alternativa fixa) e Rota 3 (adaptativa por SDN). Os resultados mostram que a Rota 3 apresentou menor latência que a Rota 1 em cenários de recuperação tardia, e desempenho semelhante ou levemente inferior nos casos com recuperação precoce.

Palavras-Chave—5G, SDN, ONOS, OpenFlow, OVS.

Abstract—The adoption of Software Defined Networks (SDN) is a promising choice to enable centralized control, dynamic reconfiguration and flexibility in traffic forwarding in 5G Networks. This work investigates adaptive traffic redirection in a 5G transport network based on SDN, considering different recovery times for the primary route. Using the ONOS controller, scenarios with progressive degradation of Route 1 were simulated, and the performance of three paths was analyzed: Route 1 (primary), Route 2 (static alternative), and Route 3 (SDN-adaptive). The results show that Route 3 achieved lower latency than Route 1 in late recovery scenarios, and similar or slightly inferior performance in early recovery cases.

Keywords—5G, SDN, ONOS, OpenFlow, OVS.

I. INTRODUÇÃO

As redes 5G introduzem requisitos rigorosos de desempenho, como baixa latência, alta disponibilidade e adaptabilidade a diferentes classes de serviço. Eles são importantes para aplicações de missão crítica, como cirurgias remotas e sistemas de controle robótico industrial em tempo real [1]. Para cumprí-los, o 5G Core (5GC) adota o paradigma de Virtualização de Funções de Rede, permitindo que elementos como AMF (*Access and Mobility Management Function*) e UPF (*User Plane Function*) sejam instanciados sob demanda em recursos heterogêneos de computação. Essa elasticidade, todavia, exige mecanismos dinâmicos de transporte capazes

Rilbert Lima da Silva, Jefferson Maxmiliano O. das Mercês, Marcelo Portela Sousa e Michel Coura Dias são do Instituto Federal da Paraíba, E-mails: {rilbert.lima, jefferson.mercês}@academico.ifpb.edu.br, {marcelo.portela, michel.dias}@ifpb.edu.br. Aramis Sales Araujo, Allender Vilar de Alencar, Thiago Fonseca Meneses e Danilo F. S. Santos são da Universidade Federal de Campina Grande, E-mails: {aramis.araujo, allender.alencar, thiago.meneses, danilo.santos}@virtus.ufcg.edu.br. Este trabalho integra o Projeto IND-5, financiado pela FINEP/Brasil, com o objetivo de desenvolver e avaliar estudos de caso voltados à Indústria 4.0, por meio de redes 5G privadas.

de garantir rotas de baixa latência entre a Rede de Acesso de Rádio (RAN – *Radio Access Network*) e o 5GC [2].

Diversas ferramentas têm sido disponibilizadas para a implantação e simulação de funções virtualizadas de redes. O Free5GC é uma solução de código aberto para redes 5G, que inclui a pilha de *software* em conformidade com os padrões do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). É flexível, modular, permite a personalização de componentes conforme as necessidades específicas da rede e é compatível com sistemas operacionais de código aberto [3].

Por sua vez, o UERANSIM também é um *software* de código aberto utilizado para a simulação e testes de redes móveis 5G, que implementa componentes da RAN, como a gNodeB e o Equipamento do Usuário (UE – *User Equipment*) de forma virtualizada. Ele permite a criação de um ambiente de testes compatível com o 3GPP e com suporte a conexões para sistemas de *Core* 5G reais ou simulados [4].

As Redes Definidas por *Software* (SDN – *Software-Defined Networks*) promovem a separação entre os planos de controle e de dados, com a exposição de interfaces programáveis. Elas otimizam o projeto, implantação, manutenção e monitoramento da Rede de Transporte 5G, pois proporcionam abstração e controle centralizado sobre os elementos da rede. Durante o projeto e implantação, a SDN permite configurar topologias lógicas de forma flexível, adaptar caminhos de tráfego conforme as exigências das aplicações e implementar mudanças de configuração. Na fase de manutenção, a separação entre planos de controle e de dados simplifica a atualização de regras e facilita a correção de falhas, sem a necessidade de intervenção direta em cada dispositivo. Para o monitoramento, a SDN oferece visibilidade global do estado da rede e permite que métricas como a latência seja coletada e utilizada por aplicações de controle para tomar decisões dinâmicas [5].

Entre as controladoras SDN, o ONOS (*Open Network Operating System*) apresenta uma arquitetura distribuída escalável e resiliente. Ele centraliza a inteligência de rede e gerencia dispositivos físicos e virtuais por meio de interfaces programáveis [6]. Os autores de [5] apresentaram um arcabouço para provisionar Qualidade de Serviço e garantir latência ultrabaixa em Redes de Transporte 5G. Os experimentos utilizaram o ONOS e a plataforma Open vSwitch (OVS) [7].

Em [8], uma aplicação prática de proteção apoiada no ONOS para controlar sistemas de *backhaul* móvel com base em PON (*Passive Optical Network*), para a comutação automática, foi apresentada. O sistema foi implementado e validado em um *testbed* 5G, que também incluiu o UERANSIM, para a simulação da RAN 5G.

A diversidade de *gateways* em um cenário de satélite, utilizando ONOS, Mininet e OpenSAND foi investigada em [9]. O ONOS foi utilizado como controladora SDN, enquanto o Mininet e o OpenSAND, para a emulação da rede terrestre e satelital, respectivamente. A capacidade e a eficiência da controladora ONOS para comutar o tráfego devido às condições climáticas foram apresentadas.

Os trabalhos analisados na literatura demonstram o potencial de SDN para melhorar a qualidade e a resiliência de redes 5G. No entanto, apresentam algumas lacunas. Por exemplo, não avaliaram o desempenho das metodologias propostas em relação a diferentes cenários de recuperação e com diferentes valores de degradação da qualidade da Rede de Transporte.

Este artigo avalia o desempenho de uma infraestrutura de rede 5G implementada em ambiente virtualizado de simulação, que utiliza a controladora ONOS, no Plano de Controle, para instruir dispositivos da Rede de Transporte correspondente. O Plano de Monitoramento e Aplicação SDN é implementado por *scripts* em Python. As APIs *Northbound* e *Southbound* utilizam REST (*Representational State Transfer*) e OpenFlow, respectivamente. *Switches* OVS compõem o Plano de Encaminhamento de Dados. Diferentes tempos para a recuperação da rota principal foram considerados, assim como valores distintos de degradação dessa rota na Rede de Transporte.

As seções subsequentes estão organizadas da seguinte maneira: a Seção II descreve as características da rede 5G implementada e do ambiente experimental envolvido; a Seção III apresenta a metodologia utilizada 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 desenvolvimentos futuros.

II. ARQUITETURA DA REDE 5G IMPLEMENTADA

O ambiente da rede experimental foi projetado, montado e configurado sobre a plataforma PNETLab, uma ferramenta de código aberto, voltada para a emulação de redes e que permite a criação e o compartilhamento de laboratórios virtuais [10]. Ela foi implantada em uma VM (*Virtual Machine*), com 50 vCPUs e 50 GB de memória RAM e executada sobre o hipervisor Proxmox, versão 8.2.

A rede 5G implementada é composta por três partes principais: a RAN; a Rede de Transporte Definida por *Software* e o 5GC. A Fig. 1 ilustra a arquitetura da rede utilizada nos experimentos e também contempla algumas interfaces de comunicação, a controladora ONOS, que manipula a Rede de Transporte, e um destino de rede externa, conectado ao 5GC.

O 5GC gerencia a conectividade, mobilidade e políticas de tráfego de dados para dispositivos móveis que registram em sua base. Ele foi implementado pelo Free5GC, em que o plano de controle contempla as funções de autenticação e gerenciamento de sessão, executadas pelas funções de rede AMF e SMF (*Session Management Function*). Ambas foram implementadas em uma VM configurada com 8 vCPUs e 8 GB de memória RAM. O plano de dados é representado pela UPF e implantado de forma desagregada, em uma VM específica, com a mesma especificação de recursos.

A RAN é a porção da rede de comunicação sem fio que conecta o UE ao 5GC. Sua arquitetura pode ser implemen-

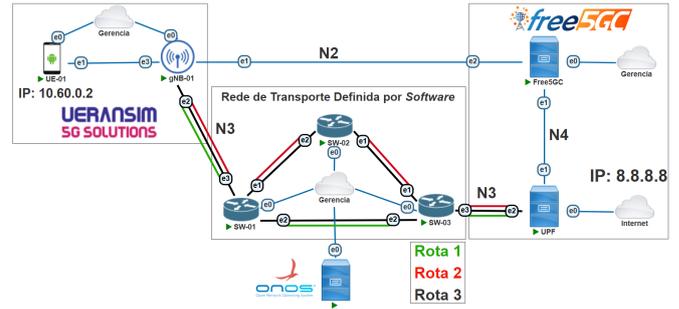


Fig. 1. Arquitetura da rede 5G, com Rede de Transporte Definida por *Software*, implementada no PNETLab.

tada de forma monolítica ou desagregada. Na primeira, as funcionalidades da RAN ficam centralizadas em uma única entidade. Por outro lado, no modelo desagregado, a RAN é dividida em Unidades Centralizadas (CUs — *Central Units*) e Unidades Distribuídas (DUs — *Distributed Units*), o que permite flexibilidade na alocação eficaz de recursos [1].

O *software* UERANSIM foi utilizado para emular a RAN, em que o UE e a gNodeB foram alocados com 8 vCPUs e 8 GB de memória RAM. Apesar de o UERANSIM executar originalmente essas funções de maneira integrada, em VM única, a implementação desagregada foi realizada na arquitetura de simulação desenvolvida, de modo a representar cenários mais realistas de uma rede 5G.

Por meio da interface N2, a RAN (diretamente na CU) conecta à AMF, que é capaz de gerenciar a mobilidade, acesso e sinalização nas células envolvidas. Para o plano de dados, a RAN conecta à UPF pela interface N3, que designa o tráfego de dados do usuário para redes externas, como a Internet [1]. O tráfego é encapsulado usando o protocolo GTP-U (*GPRS Tunneling Protocol – User Plane*), que permite múltiplos túneis simultâneos. A Fig. 2 apresenta uma captura de pacotes realizada na interface e2 de SW-01, por meio da ferramenta Wireshark, e destaca a alcançabilidade em Camada de Rede, com origem no UE-01 e destino ao IP do DNS do Google, localizado na Internet.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
17	4.968411	10.60.0.1	8.8.8.8	GTP <ICMP>	142	Echo (ping) request
18	5.022151	8.8.8.8	10.60.0.1	GTP <ICMP>	142	Echo (ping) reply

Fig. 2. Captura de pacotes realizada com o *software* Wireshark.

Para viabilizar a comunicação entre UPF e RAN, uma Rede de Transporte foi implementada, composta por três *switches* OVS, cada um configurado com 2 vCPUs e 4 GB de memória RAM. O OVS é uma plataforma de código aberto e tem gerenciamento por interface de linha de comando. A versão utilizada nos experimentos foi a 2.13.8 [11].

Essa Rede de Transporte utiliza o paradigma de SDN, em que os *switches* OVS recebem instruções para os encaminhamentos e a controladora SDN influencia no redirecionamento dinâmico do tráfego com base nas condições da rede. Isso é consequência do desacoplamento dos planos de Controle e de Encaminhamento de Dados, de modo que o segundo é viabilizado pelos *switches* OVS e o Plano de Controle é

operacionalizado pela controladora SDN ONOS, versão 3.0, que utiliza 6 vCPUs e 6 GB de memória RAM.

Na arquitetura SDN implementada, o protocolo OpenFlow, versão 1.3, opera na API *Southbound*, ao passo que o REST opera na API *Northbound*. A Fig. 3 apresenta uma tabela de fluxos direcionada a um dos *switches* OVS, programada na controladora ONOS. Esses fluxos são responsáveis por instruir o *switch* a encaminhar o tráfego por determinada interface, caso as condições desejadas sejam atendidas.

STATE	PACKETS	DURATION	FLOW PRIORITY	TABLE NAME	SELECTOR	TREATMENT	APP NAME
Added	0	580	50000	0	ETH_TYPE:IPV4 IPV4_SRC:192.168.80.1/32 IPV4_DST:192.168.80.2/32	imm(OUTPUT1), clearedfalse	Rota 2
Added	0	610	50000	0	ETH_TYPE:IPV4 IPV4_SRC:192.168.90.2/32 IPV4_DST:192.168.90.1/32	imm(OUTPUT2), clearedfalse	Rota 1

Fig. 3. Regras de fluxos programadas no ONOS para manipular o encaminhamento de tráfego por interfaces específicas.

O Plano de Monitoramento e Aplicação da arquitetura SDN foi implementado por meio de um *script* em Python, que continuamente mede a latência de comunicação de dois diferentes caminhos, disponibilizados na Rede de Transporte. A Rota 1, representada em verde, na Fig. 1, possui menos saltos de roteamento e é definida como a escolha de caminho principal na Rede de Transporte. A Rota 2, representada em vermelho, possui mais saltos de roteamento e maior latência do que a Rota 1, quando ambas funcionam em seu estado padrão (sem degradação de desempenho do caminho principal). Os valores padrão de latência configurados para a Rede de Transporte são: 5 ms para a Rota 1; e 10 ms para a Rota 2.

A Fig. 4 ilustra o comportamento padrão de ambos os caminhos, em que os valores de latência média fim-a-fim foram de 8,43 ms e 13,90 ms, para as Rotas 1 e 2, respectivamente. Como a medição é realizada de modo fim-a-fim, então valores adicionais aos atribuídos à Rede de Transporte são contabilizados (por exemplo, 5 ms vs. 8,43 ms, na Rota 1).

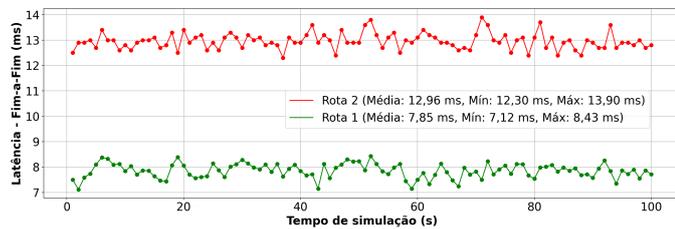


Fig. 4. Referência de desempenho padrão de latência fim-a-fim para as Rotas 1 e 2, atribuídas à Rede de Transporte.

III. METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

A latência de comunicação fim-a-fim (em RTT – *Round Trip Time*) entre o UE-01 e um destino na UPF foi avaliada para três diferentes caminhos, que utilizam as Rotas 1 a 3 da Rede de Transporte. A Rota 3 é regida pela estratégia SDN utilizada e apresenta comportamento dinâmico, enquanto combinação das Rotas 1 e 2, de acordo com as condições de variação da

qualidade da rede. Os experimentos foram planejados de modo que a Rota 1 apresente degradação variável de desempenho (que resulta em aumento de latência), ao passo que a Rota 2 mantém as condições iniciais estáveis. O roteamento simétrico foi utilizado, de forma que os caminhos da comunicação de ida e volta passam pelos mesmos dispositivos de rede.

O *script* desenvolvido em Python calcula a latência a cada cinco pacotes transmitidos por ambas as rotas. Caso a latência na Rota 1 ultrapasse o limiar definido de 15 ms, o tráfego correspondente à Rota 3 passa a ser redirecionado pela Rota 2. Isso é possível pois o Plano de Aplicação SDN acessa a API REST do ONOS e insere as novas regras de fluxo necessárias para a mudança de rota. Em seguida, o ONOS comunica com os *switches*, por OpenFlow, o que permite que os dispositivos redirecionem o tráfego conforme as novas regras definidas. O tráfego da Rota 3 retorna à Rota 1 quando a latência desta alcança valores inferiores ao limiar estabelecido.

Cada experimento durou 100 s e cinco cenários foram utilizados. No Cenário A, a Rota 1 permanece com desempenho degradado durante os 95 s finais da simulação, ou seja, essa rota não apresenta recuperação de desempenho. Para os quatro cenários restantes, a Rota 1, na Rede de Transporte, apresenta diferentes tempos para que a recuperação de desempenho aconteça. No B, a recuperação ocorre aos 80 s de experimento. No C, ela ocorre aos 60 s e os cenários D e E, contam com 40 e 20 s para a recuperação de desempenho, respectivamente.

Outra variável é o valor do aumento de latência para a Rota 1 durante os períodos de degradação das condições de comunicação. Cinco valores também foram utilizados: 15 ms; 20 ms; 25 ms; 30 ms; 35 ms e eles foram combinados nas execuções dos cinco cenários descritos anteriormente. Logo, 75 resultados de avaliação de desempenho foram obtidos.

Na Fig. 5, a Rota 1 teve sua degradação forçada na Rede de Transporte, em um valor de 25 ms, mas conseguiu recuperar desempenho aos 80 s. A Rota 2 demonstrou estabilidade, durante os 100 s de simulação. A Rota 1 apresentou comportamento próximo ao padrão (5 ms), nos cinco primeiros segundos e nos últimos 20 s de simulação. Do segundo 6 ao 80, a latência fim-a-fim do caminho que utiliza a Rota 1, na Rede de Transporte, sofreu o impacto da degradação de 25 ms. A Rota 3 acompanhou a Rota 1 até o 10º segundo, em que o monitoramento identificou a degradação e ela passou a acompanhar a Rota 2. Graças à continuidade do monitoramento e visão global da rede, a Rota 3 consegue acompanhar a tendência da Rota 1, pouco após à recuperação.

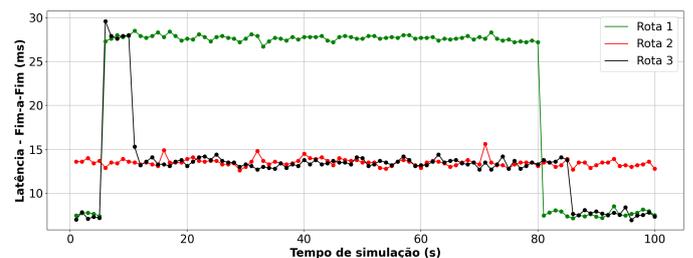


Fig. 5. Latência das rotas utilizadas na avaliação de desempenho. Para esse exemplo, a degradação da Rota 1 foi forçada em 25 ms e a recuperação de desempenho aconteceu após 80 s.

Na maioria dos cenários analisados, o teste de Shapiro-Wilk [12] retornou $p < 0,000001$, em que p representa a probabilidade de os dados se ajustarem a uma distribuição normal. Valores significativamente baixos ($p < 0,05$) indicam violação da normalidade, como observado nas amostras de latência, nos experimentos. Logo, a avaliação de desempenho utilizou a Mediana e o Intervalo Interquartil (IQR – *Interquartile Range*) para caracterizar tendência central e dispersão dos dados, respectivamente.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 6 representa a avaliação de desempenho no Cenário A, em que a Rota 3 demonstrou superioridade em relação à Rota 1, em latência central. Enquanto a Rota 1 apresentou medianas que variaram de 17,6 ms a 37,7 ms, a Rota 3 manteve a mediana próxima de 13,4 ms, com IQRs reduzidos (≤ 1 ms). Entretanto, a Rota 3 apresentou uma quantidade média de *outliers* igual a 13,4, contra 8,8, da Rota 1, e 5,8, da Rota 2.

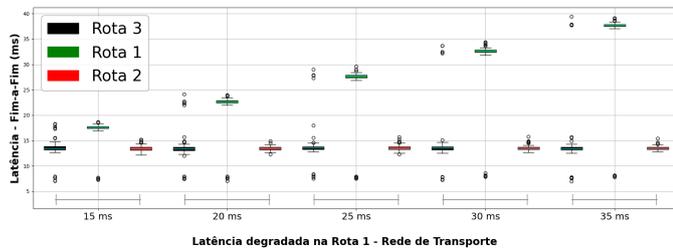


Fig. 6. Latência fim-a-fim vs. qualidade degradada da Rota 1, na Rede de Transporte, para o Cenário A. O desempenho da Rota 3 é superior, apesar de um maior número de *outliers*.

Os resultados dos experimentos sobre o Cenário B estão apresentados na Fig. 7. As medianas de latência fim-a-fim da Rota 1 permanecem elevadas, com variação de 17,7 ms a 37,5 ms. Além disso, o número de *outliers* da Rota 1 também permaneceu considerável, com média de 25,0 por nível de degradação. A Rota 3, por sua vez, apresentou mediana consistentemente inferior à da Rota 1 em todos os níveis de degradação, com valores entre 13,45 e 13,70 ms, representando uma melhora de até 63,47% em relação à Rota 1 no cenário de maior degradação. Ademais, o valor médio de IQR da Rota 3 (0,84 ms) foi cerca de 6,37 vezes menor do que o da Rota 1 (5,35 ms).

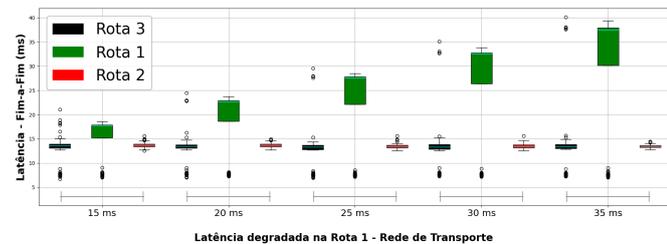


Fig. 7. Latência fim-a-fim para o Cenário B. A Rota 3 supera o desempenho da Rota 1, embora apresente maior variabilidade em relação à Rota 2.

Esse comportamento reflete a capacidade do sistema SDN de identificar a deterioração do caminho principal e redirecionar o tráfego por rotas alternativas de forma autônoma.

Todavia, a Rota 3 apresentou maior quantidade média de *outliers* (26,6) do que a Rota 2 (3,6) e também valor médio superior de IQR (0,49 ms, para essa rota de *backup*). Ou seja, apesar de ter oferecido menor latência, também esteve sujeita a flutuações pontuais de desempenho.

Para o Cenário C, a análise da Fig. 8 demonstra que a latência da Rota 1 permanece elevada (mediana de até 37,5 ms) e altamente variável (IQR de até 29,89 ms), refletindo o impacto duradouro da fase degradada, ainda que sem *outliers*. A Rota 3 apresentou mediana inferior e variabilidade reduzida, destacando-se como alternativa mais eficiente e estável. Já a Rota 2 manteve desempenho constante, com mediana ligeiramente mais alta que a Rota 3, mas menor IQR.

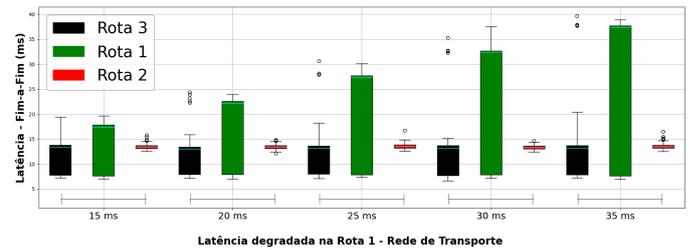


Fig. 8. Desempenho para o Cenário C, com aumento da dispersão de latência fim-a-fim da Rota 3, ainda que menor do que o da Rota 1.

Na Fig. 9, que representa o desempenho do Cenário D, é possível observar uma inversão nos valores centrais: a mediana da Rota 1 teve um mínimo igual a 7,86 ms, levemente inferior ao da Rota 3 (7,90). No entanto, a variabilidade da Rota 1 aumentou, com valores de IQR sob crescimento linear, conforme o nível de degradação, atingindo até 29,94 ms. A mediana da Rota 2 apresentou valores próximos a 13,55 ms, em todas os valores de qualidade degradada da Rota 1.

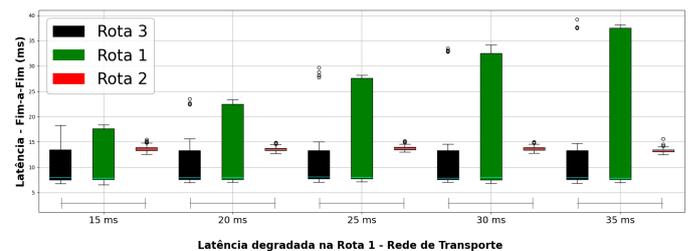


Fig. 9. Latência fim-a-fim para o Cenário D, com maiores valores de mediana para a Rota 2, ainda que mais estável do que as Rotas 1 e 3.

No Cenário E, a Rota 1 atinge seu melhor desempenho: medianas abaixo de 8,1 ms e IQRs reduzidos ($< 1,2$ ms). A Rota 3 supera o desempenho da Rota 2, com latência mediana quase 6 ms inferior, o que evidencia a sua capacidade de adaptação. Contudo, quando comparada à Rota 1, a Rota 3 apresenta uma mediana mais alta e maior variabilidade, o que demonstra que, embora eficaz, a resposta do plano de controle SDN não conseguiu acompanhar integralmente a recuperação da Rota 1. A Fig. 10 ilustra esses resultados.

Embora a Rota 2 ofereça estabilidade, sua latência padrão é superior à da Rota 1, em condições normais. Optar por ela de maneira permanente, significaria sacrificar desempenho desnecessariamente. Já a Rota 3, gerenciada por SDN, adota

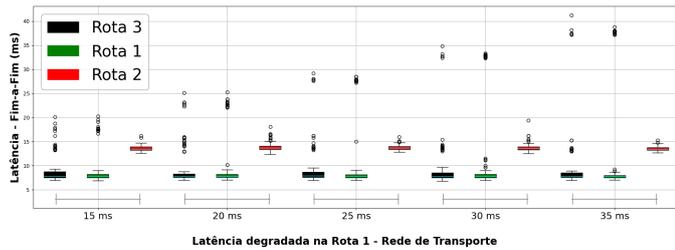


Fig. 10. No Cenário E, a Rota 3 apresenta desempenho superior ao da Rota 2, entretanto, levemente inferior ao da Rota 1.

uma abordagem adaptativa que permite usufruir da menor latência possível (Rota 1) sempre que viável, migrando para rotas mais estáveis (como a Rota 2) apenas quando necessário. Essa estratégia garante desempenho ideal com resiliência, o que é comprovado pelos baixos valores de mediana e IQR observados nos experimentos.

À medida que o tempo para a recuperação da Rota 1 diminui, a Rota 3 melhora o desempenho em relação à Rota 2. Por outro lado, ao aumentar o tempo para a recuperação da Rota 1, a Rota 3 melhora o desempenho em relação à Rota 1. A Rota 1 apresentou maiores valores de variabilidade de latência na maioria dos cenários.

Apesar de a arquitetura SDN, com plano de controle centralizado e API *Southbound* baseada em OpenFlow, oferecer flexibilidade e controle global da rede, essa abordagem pode não ser suficientemente responsiva para redes 5G, em cenários de rápida recuperação, ou de desempenho intermitente.

V. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho avaliou o desempenho de uma rede de transporte SDN sob diferentes tempos de recuperação da Rota 1, em um ambiente 5G simulado. Os resultados mostraram que a Rota 3, configurada dinamicamente via SDN, ofereceu melhor desempenho que a Rota 1 nos cenários com recuperação tardia e desempenho próximo ou levemente inferior nos cenários com recuperação precoce. Em comparação à Rota 2, a Rota 3 apresentou latência mais baixa, porém com maior variabilidade e presença de outliers pontuais. Os valores de IQR demonstraram que a Rota 3 foi mais estável que a Rota 1, e a mediana de latência foi inferior nos cenários críticos. A Rota 2 manteve estabilidade estatística, mas com latência elevada, o que limita sua viabilidade como alternativa principal. A combinação de controle SDN com estratégias adaptativas é eficaz, embora limitada por atrasos de resposta do plano de controle.

Trabalhos futuros envolvem a combinação de diversos parâmetros de simulação da rede, como variações em valores de latência em diferentes partes da rede, assim como de tráfego com qualidade intermitente. Há a expectativa também de adotar *switches* programáveis com suporte à linguagem P4 (*Programming Protocol-independent Packet Processors*) [13], de modo a permitir que parte da lógica de decisão, atualmente centralizada no controlador SDN, seja deslocada para o plano de dados. A proposta não visa romper com os princípios de SDN, mas sim, evoluir a arquitetura em direção a uma forma híbrida e mais responsiva, em que o plano de controle continua responsável pela lógica global, enquanto o plano de dados se

torna capaz de executar autonomamente regras contextuais e reações locais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FINEP/Brasil número de bolsa Ref. 2826/22 com recursos financeiros do FNDCT/MCTI, e apoiado pelo CENTRO DE COMPETÊNCIA EMBRAPPI VIRTUS EM *HARDWARE* INTELIGENTE PARA INDÚSTRIA - VIRTUS-CC, com recursos financeiros do PPI *hardware* BR da bolsa MCTI número 055/2023.

REFERÊNCIAS

- [1] Larry Peterson e Oğuz Sunay. *5G Mobile Networks: A Systems Approach*. Synthesis Lectures on Network Systems. Morgan & Claypool Publishers, 2020.
- [2] Erik Dahlman, Stefan Parkvall e Johan Skold. *5G NR The Next Generation Wireless Access Technology*. 2ª ed. Academic Press, 2020.
- [3] Min Wook Kang e Yun Won Chung. “An Open Source Implementation for Supporting ICN in 5G Core Network”. Em: *15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. 2024, pp. 1942–1943.
- [4] Visuvanathan Elavel et al. “5G UE Simulation”. Em: *International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics, Ubiquitous Communication, and Computational Intelligence (RAEEUCCI)*. 2023, pp. 1–5.
- [5] Sofiane Messaoudi, Adlen Ksentini e Christian Bonnet. “SDN Framework for QoS provisioning and latency guarantee in 5G and beyond”. Em: *IEEE 20th Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*. 2023, pp. 587–592.
- [6] Ioannis Koulouras et al. “Assessment of SDN Controllers in Wireless Environment Using a Multi-Criteria Technique”. Em: *Information* 14.9 (2023), p. 476.
- [7] Sachin Sharma. *A Practical Guide to Software Defined Networking Using Open VSwitch*. Hoboken, NJ: John Wiley e Sons Limited, 2022, p. 600.
- [8] Tri Trinh et al. “A Flexible and Cost-Efficient Protection Scheme for SDN-Based 5G Backhaul Network”. Em: *21st International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering*. 2024, pp. 35–39.
- [9] Mario Minardi et al. “SDN for Gateway Diversity Implementation in Satellite Networks”. Em: *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. 2021, pp. 1–5.
- [10] PNETLab. *Lab is Simple*. [Acessado em: 11 abr. 2025]. 2025. URL: <https://pnetlab.com/>.
- [11] OVS. *openvswitch*. [Acessado em: 30 abr. 2025]. 2025. URL: <https://www.openvswitch.org/>.
- [12] Samuel Sanford Shapiro e Martin Bradbury Wilk. “An analysis of variance test for normality (complete samples)”. Em: *Biometrika* 52.3/4 (1965), pp. 591–611.
- [13] Athanasios Liatifis et al. “Advancing SDN from OpenFlow to P4: A Survey”. Em: *ACM Computing Surveys* 55.9 (2023), pp. 1–37.