

Interface Programável via NETCONF para Orquestração Dinâmica de Parâmetros de SLA em SDPON

C. Mineto[†], N. B. da Silva^{†,§}, J. A. Sousa Maciel[†], L. G. Maciel Riveros[†], T. Sutili[†], R. C. Figueiredo[†]

[†]Soluções em Fotônica e Quântica, CPQD, Campinas, São Paulo, Brasil

[§]Departamento de Física, UFLA, Lavras, Minas Gerais, Brasil

Resumo—Este trabalho demonstra a viabilidade de uma interface programável em Python para gerência de equipamentos ópticos físicos via protocolo NETCONF em redes ópticas passivas definidas por software (SDPON). A solução permite superar a rigidez de interfaces proprietárias, viabilizando a orquestração dinâmica de perfis SLA e a extração de telemetria em tempo real por meio de modelos de dados YANG. Validada em ambiente experimental com tráfego real, a interface apresentou estabilidade na manipulação de parâmetros de rede e na coleta de métricas entre camadas, potência óptica, taxa de transmissão/recepção e latência. Os resultados confirmam a eficácia da comunicação software-hardware no arranjo experimental proposto, estabelecendo uma base viável para a automação de técnicas de fatiamento de rede e de sistemas de gerência autônomos.

Palavras-Chave—NETCONF, YANG, interface em Python, fatiamento da rede, equipamentos ópticos físicos, SDPON.

Abstract—This work demonstrates the feasibility of a programmable Python interface for managing physical optical equipment via the NETCONF protocol in software-defined passive optical networks (SDPON). The solution overcomes the lack of flexibility of proprietary interfaces, enabling the dynamic orchestration of SLA profiles and the extraction of real-time telemetry through YANG data models. Validated in an experimental environment with real traffic, the interface demonstrated stability in the manipulation of network parameters and in the collection of metrics between layers, optical power, transmission/reception rate, and latency. The results confirm the effectiveness of software-hardware communication, establishing a valid foundation for the automation of network slicing and autonomous management systems.

Keywords—NETCONF, YANG, Python interface, network slicing, physical optical equipment, SDPON.

I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas passivas (PON – *Passive Optical Networks*) tradicionais apresentam limitações significativas quanto à interoperabilidade entre fabricantes e à agilidade na configuração dinâmica de recursos [1]. O crescimento exponencial da demanda por largura de banda e a diversificação dos serviços digitais têm pressionado as arquiteturas atuais a evoluírem para modelos mais flexíveis e

programáveis [2]. Nesse contexto, a arquitetura das redes 5G demanda o uso de técnicas de fatiamento da rede (*network slicing*), permitindo a coexistência de serviços com requisitos heterogêneos, como o *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB) e o *Ultra-Reliable Low Latency Communications* (uRLLC), sobre uma mesma infraestrutura física [3]. Para viabilizar essa segmentação na camada de acesso óptico, as redes PON definidas por software (SDPON – *Software-Defined Passive Optical Network*) surgem como um elemento crítico no ecossistema de xHaul de redes móveis [4].

Neste contexto, o trabalho utiliza tecnologias emergentes para automatizar configurações limitadas por gerências proprietárias. A integração entre NETCONF e YANG viabiliza a programabilidade e o provisionamento dinâmico da rede [5], permitindo reconfigurar fatias lógicas dinamicamente e superar as limitações de latência e escalabilidade dos protocolos legados [6, 7]. Sendo assim, foi desenvolvida uma interface que facilita a extração de parâmetros críticos de telemetria e o ajuste em tempo real de perfis de SLA (*Service Level Agreement*). A viabilidade técnica desta interface é demonstrada por meio de um arranjo experimental que utiliza o Apache JMeter para emular cenários de disputa de banda e estresse de tráfego. Os dados operacionais coletados permitem inferir o desempenho e validar a estabilidade da comunicação entre as aplicações desenvolvidas em software e dispositivos reais instalados em laboratório, estabelecendo uma base de dados para futuros sistemas de gerência autônoma otimizada por inteligência artificial.

Sendo assim, na Seção II é apresentada a metodologia utilizada para desenvolver a análise proposta. Na Seção III são discutidos os resultados obtidos por meio de tais métodos. E, por fim, na Seção IV são apresentadas as conclusões baseadas nos resultados alcançados e perspectivas para trabalhos futuros.

II. METODOLOGIA

Com a intenção de automatizar o arranjo experimental para fatiamento de rede, no presente trabalho foram desenvolvidos algoritmos para a coleta e o envio de dados em uma rede SDPON utilizando equipamentos plugáveis fabricados pela Venko. Tais equipamentos, além de possuírem interface web proprietária, permitem a exploração de arquiteturas de

Os autores podem ser contatados através do email: cmineto@cpqd.com.br. Este trabalho foi financiado pelos órgãos FUNTTEL/Finep (auxílio 0943/23) e CNPq (bolsas 305559/2026-5 e 300726/2025-2). Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório Integrador Sisfoton-MCTI (auxílio CNPq 440220/2021-1).

código aberto. Neste trabalho optou-se pelo desenvolvimento de *scripts* em Python utilizando a biblioteca *ncclient* para interação via protocolo NETCONF, dado o interesse na integração futura dos códigos aqui desenvolvidos com soluções de diferentes fabricantes e na implementação de funções de otimizações inteligentes voltadas ao desempenho do usuário em redes ópticas abertas e desagregadas.

Na Figura 1 é ilustrado o cenário experimental utilizado, no qual um *switch* de alta performance atua como o *backplane* de conectividade para os elementos da rede. A OLT (*Optical Line Terminal*), em formato de módulo plugável Tibit Microplug operando sobre a norma XGS-PON (ITU-T G.9807.1 com taxas simétricas nominais de até 10 Gbps em *downstream* e *upstream*), está conectada ao *switch* via interface de 10 Gbps. A rede de acesso óptico é estabelecida a partir da OLT, passando por um *splitter* passivo que distribui o sinal para as ONUs (*Optical Network Unit*), também plugáveis. Ressalta-se que o *switch* desempenha a função de agregação física e segregação lógica de tráfego, intermediando a conexão entre a OLT e a ONU (via camada óptica) e a conexão da ONU com o cliente final e o servidor. Esta topologia foi adotada para viabilizar o uso de transceptores plugáveis, permitindo o isolamento de tráfego via VLANs (*Virtual Local Area Networks*) e garantindo que as medições de telemetria e estresse de carga, originadas no servidor e nas máquinas virtuais (VMs) de gerência e cliente, percorram o caminho de dados planejado.

Tendo em vista o cenário apresentado, a coleta dos dados para análise ocorre em intervalos fixos de tempo (por exemplo, a cada 5 segundos), capturando métricas de estado da ONU por meio do nó do modelo YANG `/bbf-pon-state/pon-state/onu` (Módulo Broadband Forum TR-385 / Venko PON). Adicionalmente,

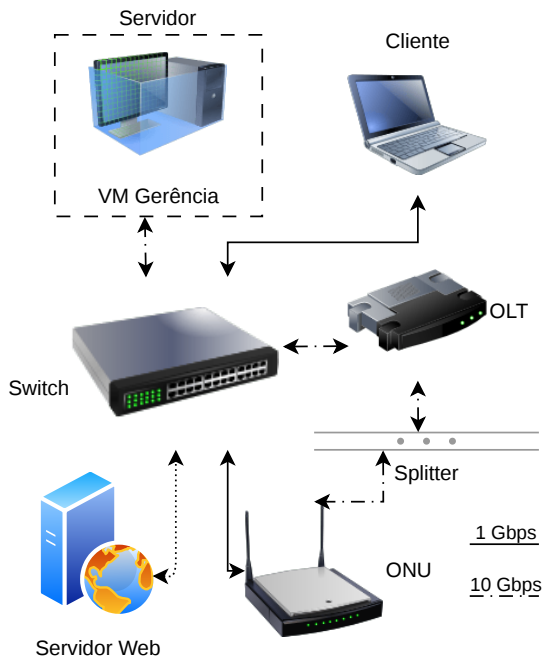


Fig. 1. Topologia da rede experimental baseada em equipamentos plugáveis e segmentação por VLANs.

TABELA I
VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PERFIL SLA.

Parâmetros \ Cenário	SLA Baixo	SLA Médio	SLA Alto
Downstream Guaranteed Rate [Mbps]	2	50	200
Downstream Best Effort Rate [Mbps]	10	200	1000
Upstream Fixed Rate [Mbps]	1	10	50
Upstream Guaranteed Rate [Mbps]	2	20	100
Upstream Best Effort Rate [Mbps]	10	100	500
Upstream Priority	1	4	7
Upstream Maximum Grant Period	20	10	5

desenvolveu-se uma função para extrair e alterar as configurações de serviços da OLT e da ONU, permitindo a modificação dinâmica dos perfis de SLA, conforme valores apresentados na Tabela I. O detalhamento dos nós YANG manipulados via NETCONF para a execução do controle e monitoramento é apresentado na Tabela II. O algoritmo desenvolvido em Python foi estruturado de forma modular para garantir a repetibilidade do experimento. Na implementação proposta, a função *editar* é responsável pela reconfiguração do SLA através dos nós de *Bandwidth Assignment* no banco de dados *running* da OLT. Paralelamente, a função *provisionar* executa o mapeamento de serviços via empilhamento de *tags* VLAN. Em tal função, foi utilizado o comando *merge* do NETCONF para associar à ONU um perfil de SLA e configurar as *tags* de VLAN de serviço e cliente (S-VLAN e C-VLAN) em tempo de execução, simulando um cenário em ambiente real de provedor (ISP) onde os serviços são ativados via software (SDN).

Com foco em atividades futuras visando otimizações baseadas em Inteligência Artificial (IA) e vislumbrando a construção de um *dataset*, criou-se também a função *coletar* responsável por obter métricas avançadas da rede, na qual se realiza o *parsing* do XML retornado pela OLT, isolando métricas críticas como: (i) nível de potência óptica na recepção, para monitorar a integridade do enlace; (ii) tempos médios de resposta da interface de gerenciamento e controle entre OLT e ONU, para verificar a latência de controle, ou seja, o tempo de processamento do DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*); e (iii) taxas de transmissão e recepção, para acompanhar a vazão real de dados. Adicionalmente, a automação foi programada para alternar entre os perfis de SLA de forma cíclica. Diferentemente de trabalhos anteriores, este algoritmo integra a potência óptica ao monitoramento de vazão. A correlação direta entre as camadas física e de controle possibilita ao modelo preditivo distinguir se as degradações no sistema são causadas por restrições de SLA ou de falhas físicas no enlace, como conectores sujos ou curvaturas na fibra.

Por fim, a coleta foi estruturada em um *loop* contínuo para garantir a variância estatística. Cada cenário de SLA foi mantido por 50 ciclos de amostragem. O intervalo entre amostras foi de 500 ms, permitindo capturar microvariações de latência (*jitter*) que ocorrem durante o tráfego intenso do software usado para medir tais parâmetros citados

TABELA II
DETALHAMENTO DOS NÓS E MÓDULOS DO MODELO YANG UTILIZADOS VIA NETCONF.

Módulo YANG	Caminho do Nó (Node Path)	Função Operacional
bbf-pon-state	/pon-state/onu-state/onu/statistics	Telemetria de Potência Óptica Received (dBm), Latência do Plano de Controle DBA/OMCI
venko-sla-profile	/pon/sla-profiles/sla-profile	Configuração de Banda Fixa, Garantida e Best-Effort, Ajuste de Prioridade e Max Grant Period
bbf-vlan-management	/pon/onus/onu/olt-service/pon-network	Associação de S-VLAN/C-VLAN ao Perfil de SLA

anteriormente. Para os testes de estresse na rede, utilizou-se o software *open source* Apache JMeter (versão 5.6.3 para Ubuntu). O objetivo dos testes foi validar os perfis de serviço (SLAs) previamente configurados em um ambiente com múltiplas instâncias de usuários virtuais (*threads*), que solicitam cargas de dados em intervalos de tempo definidos, permitindo, assim, simular a concorrência inerente aos SLAs em redes PON. A modelagem de tráfego foi realizada por meio do *plugin Ultimate Thread Group*, o qual possibilitou definir uma taxa de transmissão fixa para cada requisição. No trabalho aqui apresentado, adotou-se o valor de 500 kB, criando uma margem operacional para evitar a desconexão das ONUs por excesso súbito de carga.

Para a avaliação da rede, os planos de teste de *upstream* e *downstream* foram configurados com um perfil de carga idêntico, visando a comparabilidade dos resultados. Empregou-se o elemento *Constant Throughput Timer* para fixar uma cadência de 60 amostras por minuto por *thread*. Com a execução de 100 *threads* simultâneas, obteve-se um fluxo agregado de 100 requisições por segundo direcionadas à ONU. Ambos os cenários seguiram um cronograma total de 5 minutos e 55 segundos, compreendendo ao todo 10 segundos de *delay* inicial, 10 segundos de aumento progressivo (*ramp-up*), 5 minutos de estresse contínuo e 30 segundos de finalização progressiva (*ramp-down*). No *upstream*, utilizou-se o método HTTP Request (POST), enquanto no *downstream* empregou-se o método GET em conjunto com o servidor Nginx no *host* de destino. Por fim, elaborou-se um cenário de teste bidirecional, executando as requisições de *upstream* e *downstream* simultaneamente, mantendo-se os parâmetros supracitados.

O Pseudocódigo 1 apresenta os dados de entrada e passos que foram usados para a execução do código. Foi necessário criar uma lista com cenários constando diferentes perfis de SLA: um perfil de nível de prioridade baixo com latência instável e alta; um nível médio que, em comparação ao anterior, melhora a latência sem sobrecarregar a rede (ambos perfis atendem a um *slice* de eMBB em redes 5G); e um nível alto com latência ultra-baixa e banda alta, permitindo que a ONU transmita sem necessidade de requisição constante de permissão (atendendo a um cenário de uRLLC em redes 5G). Conforme apresentado na Linha #5, inicialmente estabelece-se a comunicação com o banco de dados operacional da OLT, o qual contém informações estáticas do funcionamento do sistema. Neste caso, é usado um tempo de pausa para que o

arranjo experimental tenha tempo de estabilizar antes de fazer a próxima leitura. Para garantir isso, é feita a separação da função de edição do SLA do provisionamento do serviço na ONU, conforme a Linha #7, de forma que o perfil já esteja disponível no hardware antes do tráfego ser vinculado. Da Linha #9 em diante, é feita a coleta das métricas, processo que ocorre ao mesmo instante para todas as métricas, permitindo uma correlação precisa entre tais parâmetros.

Algorithm 1 Automação de Coleta e Provisionamento de Rede SDPON

Entradas:

C : Lista de cenários de SLA (Baixo, Médio, Alto)

N : Número de ciclos de amostragem por cenário

T : Tempo de estabilização pós-configuração

Processos:

```

1: Conectar ao controlador da OLT via protocolo NETCONF
2: while Verdadeiro ... do
3:   for cenario = 1, 2, ..., c do
4:     Extrair parâmetros de c: Banda Fixa e Garantida, Prioridade
5:     Executar a alteração do perfil SLA: atualizar o banco de dados operacional da OLT
6:     Aguardar T segundos para estabilização do algoritmo DBA
7:     Executar o provisionamento da ONU: Mapear VLANs e vincular o novo perfil SLA
8:     for i ..., N do
9:       Capturar as métricas: Potência Óptica, Latência, Banda efetiva de transmissão e recepção
10:      Salvar dados capturados em arquivo CSV estruturado
11:      Aguardar intervalo de amostragem
12:    end for
13:  end for
14: end while
15: Ao finalizar o envio dos pacotes o usuário interrompe o loop

```

III. RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de automação via NETCONF na gestão dinâmica de recursos em redes SDPON e a sensibilidade das métricas de desempenho aos ajustes de SLA, como pode ser observado na Figura 2 que

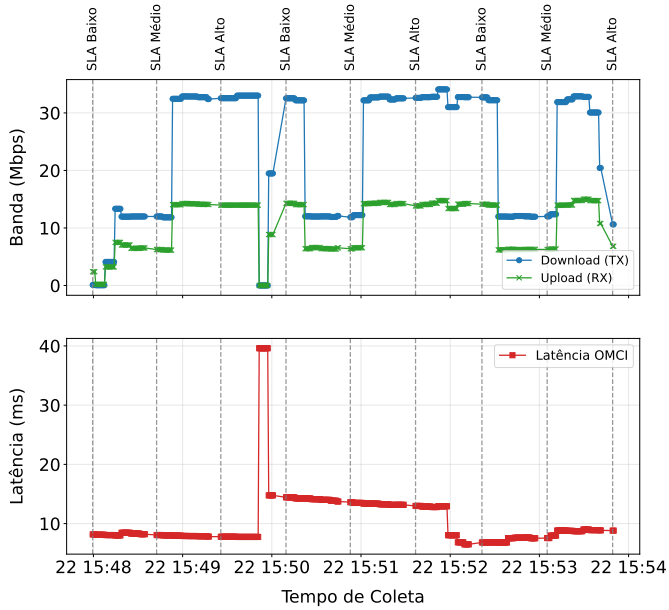


Fig. 2. Análise temporal para o tráfego de dados na direção de *downstream*, de taxa em Mbps e latência em ms pelo tempo de coleta das amostras. As demarcações pontilhadas verticais delimitam as transições de cenários (SLA baixo, SLA médio e SLA alto).

apresenta o cenário em que o tráfego de dados é direcionado para *downstream*. Observa-se que, após um período de operacionalização e estabilização das configurações, o fluxo dos dados sofre variações de acordo com os perfis de SLA (baixo, médio e alto) associados às configurações de banda fixa de *upstream*, cujos instantes de alteração do perfil são representados pelas linhas tracejadas verticais. Além disso, nota-se que no perfil de SLA baixo a taxa de transferência de *downstream* estabiliza em aproximadamente 11 Mbps. Ao aplicar o perfil médio e o perfil alto, a rede atinge níveis de vazão superiores ao perfil baixo, próximos a 33 Mbps. O fato de um mesmo limite superior de vazão ter sido aferido para os perfis de média e alta SLA está associado a limitações das técnicas de geração de tráfego introduzidas pelo componente *HTTP Header Manager* do Apache JMeter. Como a capacidade máxima de escoamento do arranjo experimental é menor do que os tetos provisionados para os perfis médio e alto (1 Gbps), ambos os cenários saturaram no limite máximo de geração de tráfego *downstream* da infraestrutura do teste. Por sua vez, a latência permaneceu estável, com exceção de um pico, gerado por uma oscilação na rede de internet, fora do controle do arranjo aqui proposto. Tal estabilidade sugere que o tráfego *downstream* tem baixo impacto no canal de controle, dado o caráter *broadcast* do GPON.

As métricas coletadas para o cenário de *upstream* são apresentadas na Figura 3, cenário no qual passa a haver maior impacto do agendamento de pacotes para atribuição de *slots* temporais pela OLT para a subida dos dados. Apesar da variação total da latência ser inferior a 2 ms, observa-se que nos perfis de SLA baixo, onde a banda fixa é mínima, a latência apresenta maior variabilidade (*jitter*) e valores médios mais elevados. Como efeito da prioridade e do período máximo de alocação de *slots*, por exemplo, no SLA alto, vê-se que o aumento de um e a redução do outro,

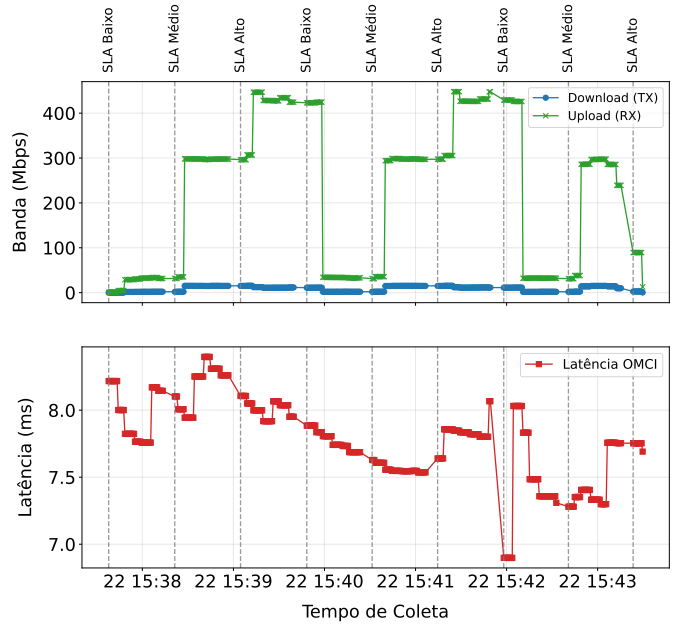


Fig. 3. Análise temporal para o tráfego de dados na direção de *upstream*, de taxa em Mbps e latência em ms pelo tempo de coleta das amostras. As demarcações pontilhadas verticais delimitam as transições de cenários (SLA baixo, SLA médio e SLA alto).

respectivamente, acarretam uma latência estável em patamares inferiores, validando a premissa de que a reserva de banda fixa reduz a sobrecarga no processo de requisição/alocação.

Ao avaliar numericamente o comportamento da latência do plano de controle e encaminhamento (média e desvio-padrão) obtida a partir das amostras coletadas em cada cenário experimental, observa-se que, no sentido de *upstream*, a

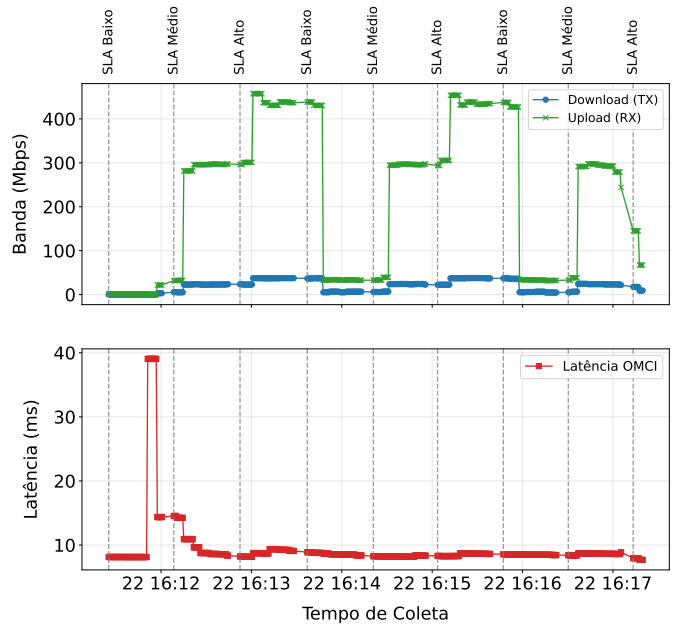


Fig. 4. Análise temporal para o tráfego de dados bidirecional, *upstream* e *downstream*, de taxa em Mbps e latência em ms pelo tempo de coleta das amostras. As linhas tracejadas verticais delimitam a troca dinâmica de contexto (SLA baixo, SLA médio e SLA alto) para ambos os tráfegos.

elevação da banda fixa do SLA reduz o desvio-padrão (*jitter*) de 0,35 ms para 0,13 ms. Já no cenário bidirecional sob estresse contínuo, a transição do SLA Baixo para o SLA Alto promove uma queda na latência média de 10,48 ms para 8,59 ms, e uma redução acentuada do desvio-padrão de 7,32 ms para 0,43 ms, evidenciando a eficácia da priorização de banda garantida no agendamento do algoritmo DBA.

Por fim, analisou-se um cenário em que o fluxo de pacotes foi bidirecional, ou seja, considerando os tráfegos *upstream* e *downstream* simultaneamente, como apresentado na Figura 4. Com a ONU sob estresse, verifica-se que ao iniciar a transmissão dos dados em ambos os sentidos para atingir a carga máxima, 400 Mbps, houve um pico na latência, evidenciando a saturação dos *buffers* de processamento da ONU e a disputa por recursos do plano de controle. Mas, apesar das variações de desempenho lógicas, decorrentes do SLA, a potência óptica se manteve constante em aproximadamente -15.35 dBm, vide Figura 5, descartando-se degradações físicas durante os testes.

De forma geral, é possível verificar nas três figuras anteriores o degrau de subida na curva de banda, que valida o tempo de estabilização previsto na metodologia. E a clara distinção entre as curvas de latência e banda nos três perfis de SLA valida o banco de dados coletado como uma base para o treinamento de modelos de aprendizado supervisionado, capazes de prever a qualidade de experiência (QoE) do usuário final, haja vista que tais dados foram coletados por meio de um arranjo experimental, registrando o comportamento de equipamentos físicos, apesar de estarem em um ambiente de bancada. Adicionalmente, verifica-se que a taxa máxima de *downstream* obtida, em ambos os testes, foi em torno de 35 Mbps, que pode ser explicada por limitações físicas que a interface de saída do sistema encontrou ou pela configuração do simulador de tráfego utilizado (Apache), não conseguir superar. Por outro lado, no sentido de *upstream*, a taxa máxima configurada no Apache foi alcançada, atingindo aproximadamente 450 Mbps. Entretanto, esse valor só foi alcançado para o perfil de SLA alto, enfatizando o impacto da configuração do perfil de SLA na taxa de transmissão do sistema. Por fim, para o cenário em que foram trafegados dados apenas no sentido de subida, foram registradas as menores latências. Com isso, pode-se supor que para a OLT em uso, o processamento dos pacotes na descida ou a concorrência de *buffer* impacta mais o tempo de resposta do canal do que o agendamento de subida pelo algoritmo DBA.

IV. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a viabilidade do desenvolvimento de uma interface de controle escrita na linguagem Python para a gerência programável de equipamentos ópticos XGS-GPON (ITU-T G.9807.1) via protocolo NETCONF. A interface construída oferece a granularidade e a velocidade necessárias para a automação de redes em ambientes SDPON. A eficácia da comunicação via NETCONF foi validada pela capacidade de realizar alterações dinâmicas e granulares nos perfis de SLA e, simultaneamente, extrair métricas operacionais diretamente do hardware. O sucesso na manipulação de nós específicos do

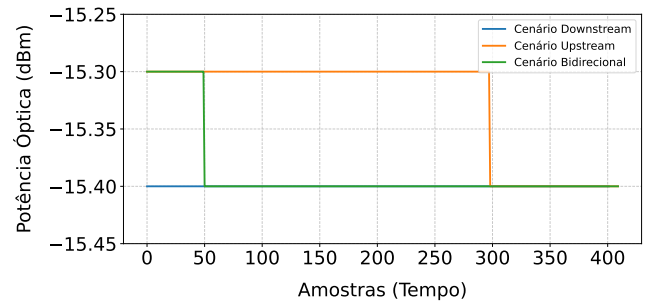


Fig. 5. Comparativo da potência óptica coletada para os três cenários de estudo com variações do perfil SLA para o fluxo de dados nas direções *downstream*, *upstream* e bidirecionais.

modelo YANG para configurar bandas garantidas, prioridades e períodos de concessão de subida, sem a necessidade de intervenção manual ou reinicialização de serviços, confirma a validade do protocolo para a orquestração de redes de acesso modernas.

Para garantir a integridade dos resultados, o nível de potência óptica recebida foi monitorado e manteve-se estável em torno de -15.35 dBm em todos os cenários. Confirmando, dessa forma, que as variações observadas em latência e banda são decorrentes exclusivamente dos perfis de SLA e da carga de tráfego, o que descarta a influência de fatores físicos externos, tais como microcurvaturas nas fibras.

Em suma, a interface proposta estabelece uma fundação sólida para a evolução de redes ópticas passivas em direção a redes autônomas e *multi-vendor*. Como trabalhos futuros, pode-se explorar o uso desses dados para o treinamento de redes neurais recorrentes (como *Long Short-Term Memory*) voltadas à predição de congestionamento antes da degradação da experiência do usuário final, bem como a expansão da arquitetura para cenários com múltiplas ONUs concorrentes em um mesmo enlace óptico.

REFERÊNCIAS

- [1] Z. Loncarevic, S. Stankovic, and R. Petrovic, "A Comprehensive Analysis of Vendor-Neutral Network Management Strategies," in *2024 32nd Telecommunications Forum (TELFOR)*, 2024, pp. 1–4, doi: 10.1109/TELFOR63250.2024.10819040.
- [2] S. Cruzes, "Telemetry and Agentic AI: Foundations for Optical Network Automation," *IEEE Access*, vol. 14, pp. 8800–8838, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3649768.
- [3] S. Marinova and A. Leon-Garcia, "Intelligent O-RAN Beyond 5G: Architecture, Use Cases, Challenges, and Opportunities," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 27 088–27 114, 2024.
- [4] J. B. D. Souza, L. G. M. Riveros, W. Maurício, T. Suttili, C. Mineto, J. A. S. Maciel, F. H. C. Neto, and M. Silva, "Poster: Performance Analysis of 5G O-RAN Fronthaul Beyond Theoretical Distance Limits," in *2025 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2025, pp. 1–3, doi: 10.1109/ISCC65549.2025.11326053.
- [5] M. Dallaglio, N. Sambo, F. Cugini, and P. Castoldi, "YANG Models for Vendor-Neutral Optical Networks, Reconfigurable through State Machine," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 8, pp. 170–178, 2017.
- [6] Z. Liu, Y. Lin, and F. Chen, "Optimization of Dynamic Bandwidth Allocation in PONs Based on LSTM Traffic Prediction," in *2025 5th International Conference on Communication Technology and Information Technology (ICCTIT)*, 2025, pp. 1–5.
- [7] A. Awad Abdellatif, A. Abo-Eleneen, A. Mohamed, A. Erbad, N. V. Navkar, and M. Guizani, "Intelligent-Slicing: An AI-Assisted Network Slicing Framework for 5G-and-Beyond Networks," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 20, no. 2, pp. 1024–1039, 2023.