

Caracterização e Avaliação da Viabilidade de Enlaces Satelitais de Órbita Baixa Terrestre para Provisão de Internet em Eventos Temporários

Gabriel A. Campos¹, Igor R. Alves¹, Igor M. Moraes¹,
Nicollas R. de Oliveira¹, Diogo M. F. Mattos¹

¹ LabGen/MídiaCom – TET/IC/PPGEET/UFF
Universidade Federal Fluminense (UFF)
Niterói, RJ – Brasil

Abstract. *The advancement of satellite Internet in Brazil has been driven by the limitations of 5G, especially in remote areas. Among the adoption opportunities, the provision of connectivity for temporary and short-term events stands out, where installing permanent infrastructure is not economically justified, and traditional wireless connectivity alternatives face difficulties due to high latency and instability. This paper characterizes and evaluates the feasibility of low Earth orbit (LEO) satellite links for providing the Internet in temporary and short-term events. The study considers a real-world use scenario during an academic conference in Brazil, where connectivity, infrastructure, and scalability metrics were analyzed. The results indicate that LEO connectivity presented stable bandwidth and latencies below 50 ms at a lower cost than a dedicated radio link. It reinforces the technology's viability for temporary applications and contributes to optimizing the planning of LEO networks.*

Resumo. *O avanço da Internet via satélite no Brasil tem sido impulsionado pelas limitações do 5G, especialmente em áreas remotas. Dentre as oportunidades de adoção, destaca-se a provisão de conectividade para eventos temporários e de curta duração, em que a instalação de infraestrutura permanente não se justifica economicamente e as alternativas de conectividade sem fio tradicionais enfrentam dificuldades devido à alta latência e instabilidade. Este artigo caracteriza e avalia a viabilidade de enlaces satelitais de órbita baixa terrestre (LEO) para a provisão de Internet em eventos temporários e de curta duração. O estudo considera um cenário real de uso durante uma conferência acadêmica no Brasil, na qual foram analisadas métricas de conectividade, infraestrutura e escalabilidade. Os resultados indicam que a conectividade LEO apresentou largura de banda estável, além de latências abaixo de 50 ms, com um custo significativamente inferior ao de um enlace dedicado de rádio. Isso reforça a viabilidade da tecnologia para aplicações temporárias e contribui para a otimização do planejamento de redes baseadas em satélites de órbita baixa.*

1. Introdução

O avanço da internet via satélite no Brasil tem sido impulsionado pelas limitações do 5G, especialmente em áreas remotas, com um crescimento de 38% no último ano

Este trabalho foi realizado com recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, RNP, Prefeitura de Niterói/FEC/UFF (Edital PDPA 2020) e INCT ICONIOT. Ferramentas de Inteligência Artificial Generativa, incluindo ChatGPT, Grammarly e Llama3.1, foram empregadas na revisão textual deste trabalho.

e mais de meio milhão de assinantes¹. A tecnologia de redes de acesso à Internet via satélites de órbita baixa terrestre (*Low Earth Orbit* - LEO) tem se destacado pela maior banda disponível e menor latência, quando comparado com redes de acesso à Internet via satélites geoestacionários, e menor necessidade de infraestrutura, quando comparada a redes de acesso baseadas em fibras ópticas, tornando-se uma alternativa viável à banda larga convencional. Além do uso doméstico, a adoção da tecnologia cresce nos setores agropecuário e industrial, consolidando-se como uma solução promissora para ampliar a conectividade em regiões de difícil acesso ou com pouca infraestrutura [Guimarães et al., 2013]. Assim, a crescente adoção de redes de acesso à Internet via satélites de órbita baixa tem impulsionado a expansão desse mercado devido ao seu baixo custo de contratação, baixa exigência de infraestrutura e qualidade de serviço comparável à de redes de acesso à Internet convencionais [Ma et al., 2023]. Os serviços via satélite eliminam a necessidade de uma malha de cabeamento terrestre extensa, oferecendo uma alternativa viável para diversas aplicações, especialmente em áreas remotas ou de difícil acesso [Ma et al., 2023].

Dentre os potenciais nichos de mercado para provedores de Internet por satélites de órbita baixa, destaca-se a provisão de conectividade para eventos temporários e de curta duração, em que a instalação de infraestrutura permanente não se justifica do ponto de vista econômico, evitando investimentos elevados em custos de capital e operacionais relacionados à instalação de redes ópticas e obras civis [Mohan et al., 2024]. Tradicionalmente, esse nicho tem sido atendido por provedores de Internet via rádio, os quais frequentemente enfrentam desafios relacionados à alta latência, falhas intermitentes devido a condições atmosféricas adversas e altos custos de contratação de enlaces dedicados [Laniewski et al., 2024]. Dessa forma, explorar o uso de enlaces satelitais de órbita baixa tende a ser uma solução viável em termos de confiabilidade e custo-benefício [Gongora-Torres et al., 2022].

Este artigo caracteriza e avalia a viabilidade de enlaces satelitais de órbita baixa para provisão de Internet em eventos temporários e de curta duração. Para tanto, o estudo avalia um enlace LEO contratado do principal provedor de serviço de Internet via satélite no Brasil, utilizado para atender à conferência IEEE CloudNet 2024², realizada entre os dias 27 e 29 de novembro de 2024 no Rio de Janeiro, Brasil³. O evento contou com a participação de aproximadamente 90 pessoas, registrando picos de mais de 100 dispositivos conectados simultaneamente à rede sem fio do local. O estudo avalia a viabilidade da conectividade via LEO para os participantes do evento, além de propor a estimação do enlace necessário para atender a um número variável de participantes. Adicionalmente, o trabalho descreve e discute a montagem da infraestrutura necessária para suportar o evento e garantir qualidade de serviço.

Os resultados obtidos indicam que a conectividade LEO apresentou largura de banda estável ao longo do evento, com médias de *download* de aproximadamente 200 Mb/s e *upload* de 10 Mb/s. A latência manteve-se dentro de um intervalo aceitável

¹Disponível em <https://oglobo.globo.com/economia/tecnologia/noticia/2025/03/17/com-5g-limitado-internet-via-satelite-avanca-no-brasil-e-supera-meio-milhao-de-assinantes.ghtml>.

²Disponível em: <http://cloudnet2024.ieee-cloudnet.org/>.

³Os dados analisados neste trabalho são agregados e anônimos, sem registro de informações pessoais ou análise individualizada do uso da rede.

para aplicações interativas, com valores variando entre 35 ms e 50 ms, sendo comparável ao desempenho reportado na literatura para redes terrestres em condições similares. Em comparação a estudos prévios sobre redes LEO [Ma et al., 2023], os resultados reforçam a viabilidade dessa tecnologia para aplicações temporárias, além de indicar melhorias possíveis na gestão do tráfego e alocação de recursos. Esses resultados contribuem para a compreensão do potencial das redes LEO como redes de acesso à Internet para eventos temporários e podem servir de referência para futuras implementações.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. Uma arquitetura e redes de acesso via satélites de órbita baixa é explicada na Seção 2. A Seção 3 apresenta a solução de conectividade proposta e discute a coleta de dados. A Seção 4 apresenta os resultados. A Seção 5 discute os trabalhos relacionados. A Seção 6 conclui o artigo.

2. Enlaces Satelitais de Órbita Baixa Terrestre

A órbita baixa terrestre (*Low Earth Orbit* - LEO) representa uma alternativa promissora para redes de comunicação via satélite. Diferentemente dos satélites em órbita geostacionária (*Geosynchronous Equatorial Orbit* – GEO), que operam a 35.786 km de altitude, os satélites LEO estão posicionados entre 500 km e 2.000 km da superfície terrestre. Essa menor distância reduz significativamente a latência, tornando essa abordagem adequada para aplicações que exigem baixa latência, como videoconferências e jogos *online*. Estruturalmente, uma rede satelital LEO é composta por uma constelação de satélites que operam de forma coordenada para garantir cobertura global. Cada satélite funciona como um nó, retransmitindo dados entre terminais terrestres ou outros satélites. A comunicação entre satélites e estações em solo geralmente ocorre em bandas de frequência K_a , enquanto a comunicação bidirecional entre satélites e terminais de usuário utiliza bandas K_u [Laniewski et al., 2024]. Em comparação com redes GEO, as redes LEO oferecem vantagens como: (i) menor latência, devido à proximidade dos satélites e consequente redução do tempo de propagação do sinal; (ii) maior largura de banda, possibilitando taxas de transferência superiores para *upload* e *download*; e (iii) cobertura global, incluindo áreas remotas e regiões não atendidas por infraestruturas terrestres.

A dinâmica orbital dos satélites LEO impõe desafios técnicos significativos [Tiwari et al., 2023]. O primeiro está relacionado à alta velocidade orbital desses satélites, resultando em janelas de conectividade limitadas para os terminais terrestres. Isso exige *handovers* frequentes entre satélites, o que pode introduzir variações na latência e na vazão da rede. A gestão eficiente desses *handovers* é essencial para manter uma experiência de usuário estável e de alta qualidade. O segundo desafio decorre da variabilidade no desempenho das redes LEO. Condições atmosféricas podem impactar a propagação do sinal, enquanto a geometria da constelação afeta a cobertura e a disponibilidade de satélites em determinadas regiões. A demanda local também pode gerar congestionamento da rede, comprometendo a qualidade do serviço.

Recentemente, diversas grandes empresas, como SpaceX, OneWeb, Telesat e Amazon, passaram a oferecer acesso à Internet em escala global, impulsionadas pela redução significativa nos custos de lançamento de satélites. Entre essas iniciativas, um exemplo é o Starlink, serviço de acesso à Internet banda larga da SpaceX, que utiliza uma infraestrutura como a ilustrada na Figura 1. Para acessar a Internet via Starlink, os

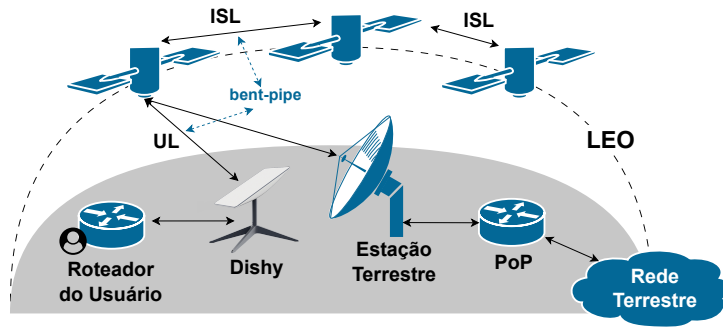


Figura 1. Estrutura de conexão *bent-pipe* da Starlink. O tráfego de dados percorre o terminal do cliente (*dishy*), um ou mais satélites em órbita baixa terrestre (LEO) por meio de enlaces intersatelitais (ISLs), até alcançar a estação terrestre (GS) mais próxima. A partir desse ponto, os dados ingressam na infraestrutura terrestre da Internet por meio de um ponto de presença (PoP), interconectando a rede satelital à rede terrestre.

usuários precisam de um terminal denominado *dishy*, que estabelece comunicação com os satélites visíveis acima de 25° de elevação. Essa comunicação ocorre por meio de antenas *phased-array* operando na banda K_u , formando o enlace de usuário (*User Link* – UL). Os satélites Starlink detêm múltiplas antenas subdivididas em feixes, permitindo conexão simultânea com vários terminais e retransmissão dos dados para uma estação terrestre (*Ground Station* – GS) por meio de enlaces em banda K_a . Quando o terminal e a estação terrestre estão dentro da cobertura de um único satélite, a conexão segue um modelo *bent-pipe* direto. Caso contrário, os satélites utilizam enlaces ópticos intersatelitais (*Inter-Satellite Links* – ISLs) para retransmitir os dados entre si, formando um *bent-pipe* estendido. Por fim, as estações terrestres encaminham o tráfego recebido dos satélites para os pontos de presença (*Points of Presence* – PoPs) da Starlink, que encaminham os pacotes até o destino final por meio da infraestrutura terrestre da Internet [Mohan et al., 2024, Tieby et al., 2024].

3. Coleta e Análise de Dados Reais

A análise de desempenho apresentada neste artigo abrange dois cenários. No primeiro, o enlace satelital LEO foi avaliado em testes laboratoriais realizados no Laboratório MídiaCom da Universidade Federal Fluminense, em Niterói. No segundo, analisou-se o desempenho do enlace sob carga de trabalho variável durante a conferência IEEE CloudNet 2024, com a rede de acesso instalada no Hotel Pestana Rio Atlântica, em Copacabana, Rio de Janeiro. A conferência ocorreu entre os dias 27 e 29 de novembro de 2024, quando foram coletadas medidas da banda agregada acessada pelos participantes da conferência e o número de associações à rede. Apesar da distância de 9,6 km entre o laboratório e o hotel da conferência, ambos estão na mesma área de cobertura da rede LEO, não impactando a comparação dos resultados.

O cenário de captura dos dados em laboratório contou com a instalação da antena no telhado do prédio do laboratório, sem obstruções para a visada dos satélites, e o roteador de acesso à rede LEO foi conectado diretamente por cabo de cobre UTP CAT6 à estação de trabalho responsável por realizar os testes. O cenário de captura dos dados na conferência IEEE CloudNet é expresso na Figura 2 [Lopez et al., 2017]. A infraestrutura de rede utilizada na conferência foi projetada para garantir conectividade estável e segmentação eficiente do tráfego de dados. O acesso à Internet foi estabelecido por meio

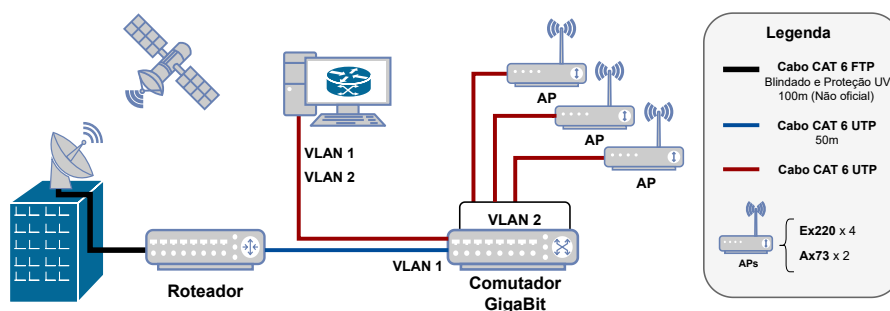


Figura 2. Topologia da infraestrutura de rede implantada na conferência IEEE CloudNet 2024, com segmentação em VLANs, cabeamento estruturado e acesso via enlace LEO. O cabo entre a antena e o roteador, não oficial, foi validado previamente em testes laboratoriais para garantir conectividade estável em maiores distâncias.

do enlace via satélite, cuja recepção ocorreu em um roteador central responsável pelo encaminhamento do tráfego para a rede interna. Esse roteador estava interligado a um comutador *Gigabit* Ethernet, que desempenhou um papel fundamental na distribuição dos pacotes e na segmentação da rede em VLANs. Foram definidas duas VLANs: a VLAN 1, utilizada para dispositivos da rede de acesso ao roteador LEO conectados por meio de cabos de rede, e a VLAN 2, destinada à rede de distribuição sem fio, facilitando a separação de tráfego e a aplicação de políticas de qualidade de serviço (QoS). Essa segmentação ajudou a otimizar a alocação de largura de banda e a minimizar interferências entre diferentes aglomerações de usuários nas salas de conferência.

A distribuição do sinal para os dispositivos conectados sem fio foi realizada por meio de múltiplos pontos de acesso (*Access Points* - APs) posicionados e conectados ao comutador através de cabos de rede estruturados. A interligação dos equipamentos utilizou diferentes tipos de cabeamento conforme a necessidade e o ambiente de instalação. Para conexões externas que exigiam maior resistência às intempéries, foram empregados cabos CAT 6 FTP com blindagem e proteção UV, enquanto nas interligações internas foram utilizados cabos CAT 6 UTP, garantindo um equilíbrio entre desempenho e flexibilidade. Ressalta-se que o cabo utilizado na conexão entre a antena e o roteador cliente da rede LEO não é oficial provido pelo fabricante. Devido à necessidade de uma distância superior à suportada pelos cabos fornecidos pelo fabricante, optou-se pela validação do uso de um cabo CAT6 FTP, com conectores blindados, 100% cobre e bitola AWG 23. Esse cabo possui seção transversal maior que a do cabeamento oficial, o que reduz a resistência ao longo do comprimento e permite estender a distância entre a antena e o roteador cliente para até 100 m, sem perdas de conectividade identificáveis.

A infraestrutura contava com um conjunto de quatro pontos de acesso TP-Link AX1800 e dois TP-Link Archer Ax73, proporcionando cobertura nas salas de conferência e suportando um grande número de conexões simultâneas. Todos os pontos de acesso usados operam em banda dupla (2.4 GHz e 5 GHz) e utilizam Wi-Fi 6. Os pontos de acesso foram configurados para a alocação dinâmica de canal e com o mesmo SSID para facilitar o *handover* de usuários entre pontos de acesso. Esse arranjo foi projetado para oferecer estabilidade na transmissão de dados e garantir a melhor experiência de conectividade aos participantes do evento. Dessa forma, a rede sem fio não foi um gargalo na conectividade dos usuários à Internet.

O roteador empregado na rede é um Mini PC Lenovo ThinkCentre M70q, equi-

pado com um processador Intel Core i7-10700T de 10^a geração, com 8 núcleos, 16 *threads* e frequência de até 4,50 GHz. O roteador possui 32 GB de memória RAM DDR4 (2667 MHz) e um SSD NVMe de 512 GB para armazenamento de alto desempenho. O roteador integra um adaptador de rede Intel Ethernet Connection (11) I219-V, com controlador Gigabit Ethernet integrado, que oferece uma taxa de transferência de 1 Gb/s. Este adaptador utiliza o *driver* e1000e no Linux. Para otimizar o desempenho do adaptador de rede, diversas funções do controlador foram descarregadas para a CPU. As funções incluem: (i) GSO (*Generic Segmentation Offload*), que permite ao adaptador segmentar pacotes de grande tamanho; (ii) GRO (*Generic Receive Offload*), que combina pacotes recebidos de pequeno tamanho em pacotes maiores; (iii) TSO (*TCP Segmentation Offload*), que segmenta pacotes TCP de grande tamanho; (iv) terceirização do cálculo de *checksum* de transmissão (TX) e recepção (RX), que permite ao adaptador calcular ou verificar *checksums* dos pacotes; (v) terceirização de VLAN na recepção (RX VLAN) e transmissão (TX VLAN), que processa etiquetas de VLAN no adaptador de rede; e (vi) SG (*Scatter-Gather*), que lida com dados não contíguos em memória. A desativação dessas funções implica um aumento na carga da CPU, uma vez que o processamento dessas operações é transferido para o sistema operacional em vez do adaptador de rede, mas permite que o adaptador alcance taxas de transferência próximas à taxa nominal. Durante a conferência, foram capturados dados agregados de consumo de banda nos dois primeiros dias (27 e 28 de novembro), além de dados de associação dos dispositivos à rede. Esses dados de associação referem-se aos registros de atividades (*logs*) do Protocolo de Configuração Dinâmica de Estação (*Dynamic Host Configuration Protocol* — DHCP).

4. Resultados Experimentais

Os resultados experimentais são apresentados para os dois cenários avaliados. Os primeiros resultados focam a avaliação experimental no Laboratório MídiaCom. A Figura 3 mostra o desempenho do enlace satelital, destacando suas variações ao longo do dia. Os dados foram coletados durante três dias consecutivos por meio de testes periódicos de banda, realizados a cada 10 minutos pela estação de teste conectada diretamente ao roteador LEO. Os testes utilizaram o serviço *SpeedTest by Ookla*⁴. A Figura 3(a) mostra as variações ao longo do dia observadas nas taxas de *download* e *upload*, enquanto a Figura 3(b) apresenta os resultados relativos à latência na rede LEO. Observa-se uma flutuação significativa na taxa de *download*, com valores máximos próximos a 250 Mb/s e mínimos em torno de 50 Mb/s, indicando considerável variação na capacidade de transmissão ao longo do dia durante o período analisado. Em contrapartida, a taxa de *upload* se mostrou relativamente estável, mantendo-se em aproximadamente 20 Mb/s, com pequenas oscilações. A latência apresentou estabilidade considerável, variando entre 38 ms e 45 ms ao longo do dia, sugerindo uma resposta consistente da rede, mesmo diante das variações na banda disponível. Essa estabilidade da latência é um indicativo importante da eficiência do sistema em manter comunicações com baixa latência, essencial para aplicações sensíveis ao tempo. Todas as medições de banda e latência foram realizadas usando o mesmo servidor de referência localizado em Niterói, RJ.

Os resultados experimentais apresentados na Figura 4 caracterizam a latência observada em uma comunicação via enlace satelital LEO para acesso à Internet, considerando diferentes servidores distribuídos ao redor do mundo. Os testes foram realizados

⁴Disponível em <https://www.speedtest.net/>.

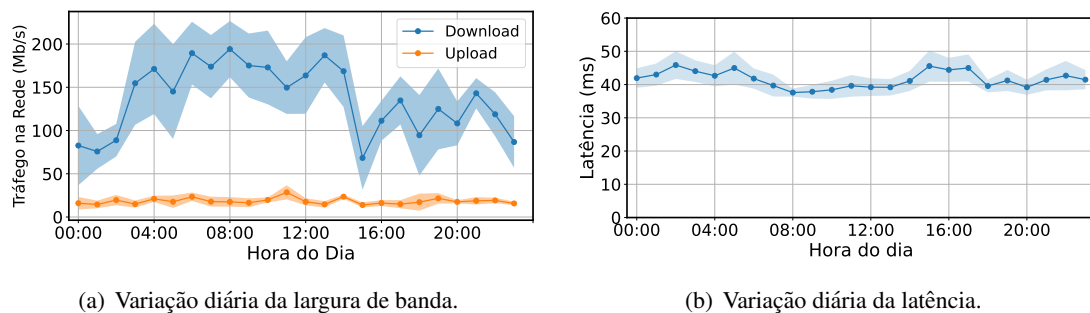
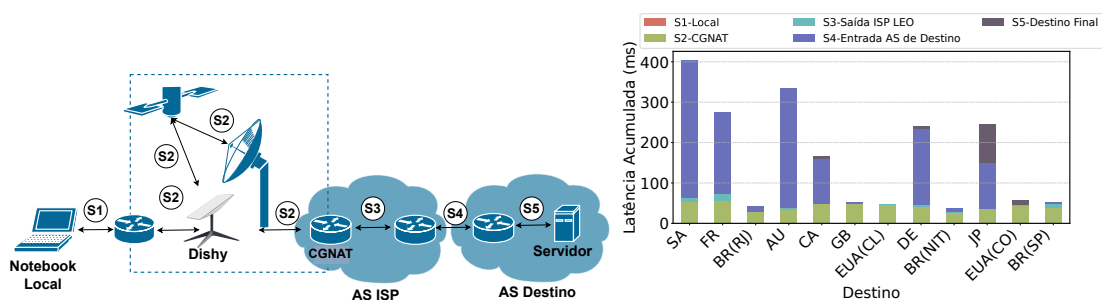


Figura 3. Caracterização diária do enlace satelital. As medições foram realizadas durante três dias e os resultados são mostrados como valores médios e o intervalo de variação definido por valores máximos e mínimos medidos.

utilizando a ferramenta *MTR* (*My Traceroute*⁵), e os valores de latência apresentados são tempos médios de ida e volta, obtidos após 10 rodadas de medições consecutivas para cada destino. A Figura 4(a) identifica cinco segmentos distintos (*S1* a *S5*) ao longo da rota entre a estação de teste local e o servidor remoto, cada um contribuindo para a latência total registrada. O segmento *S1* representa a latência até o roteador local; *S2* representa o tempo até o dispositivo de tradução de endereços privados para endereços IP públicos (*Carrier Grade NAT* - CGNAT), que é o primeiro endereço remoto a responder ao *traceroute*; *S3*, a latência desde a rede local até a saída do tráfego do sistema autônomo (*Autonomous System* - AS) do provedor de serviço de Internet (*Internet Service Provider* - ISP) LEO; *S4*, o tempo até a chegada do tráfego ao AS de destino; e, finalmente, *S5* caracteriza a latência correspondente à resposta fornecida pelo servidor remoto. Vale ressaltar que a latência *S2* é o valor mais refinado possível de se obter para estimar o tempo de propagação dos pacotes no enlace satelital. A Figura 4(b) mostra que a latência acumulada varia significativamente em função da localização geográfica do servidor remoto. Observa-se que destinos mais próximos geograficamente, como São Paulo (BR-SP), Rio de Janeiro (BR-RJ) e Niterói (BR-NIT), possuem latências totais menores, em torno de 100 ms, com contribuições relativamente reduzidas nos segmentos intermediários (*S3*, *S4* e *S5*). Por outro lado, destinos mais distantes, como África do Sul (SA), França (FR) e Austrália (AU), apresentam latências significativamente superiores, ultrapassando, em alguns casos, os 300 ms. Nessas situações, grande parte da latência acumulada concentra-se nos segmentos finais, especialmente em *S4* e *S5*, correspondentes à entrada no AS do destino e à resposta final do servidor remoto. Esses resultados destacam que, apesar da eficiência da rede LEO em manter baixas latências nos segmentos iniciais (*S1*, *S2* e *S3*), a distância geográfica e fatores externos associados à rota internacional exercem influência determinante sobre o tempo total de resposta. Dessa forma, aplicações altamente sensíveis à latência tendem a ser mais afetadas pela localização dos servidores remotos do que pelo acesso à Internet através de redes LEO.

O segundo cenário visa a avaliação do desempenho do uso do enlace satelital no provimento de acesso à Internet para a IEEE CloudNet 2024. Durante a realização da conferência, não houve qualquer relato de dificuldades dos participantes em acessar a Internet ou de redução da qualidade de serviço percebida pelos participantes. As Figuras 5(a) e 5(b) ilustram o tráfego de rede durante a conferência nos dois primeiros dias, revelando padrões distintos que se correlacionam com a programação do evento. No dia 27, o

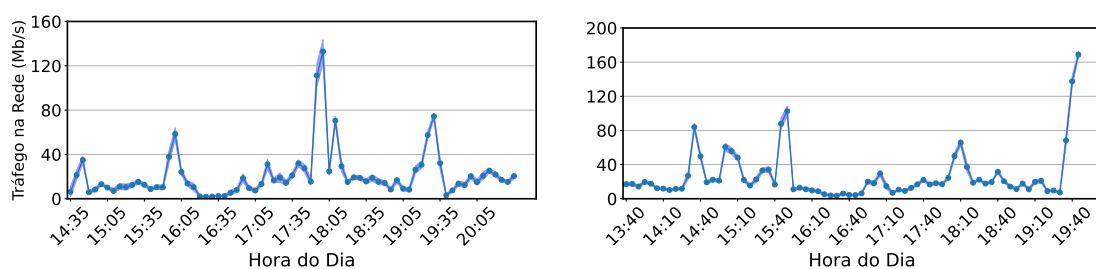
⁵Disponível em <https://www.bitwizzard.nl/mtr/>.



(a) Cenário de avaliação da latência na rede LEO. (b) Latência para diferentes servidores no mundo.

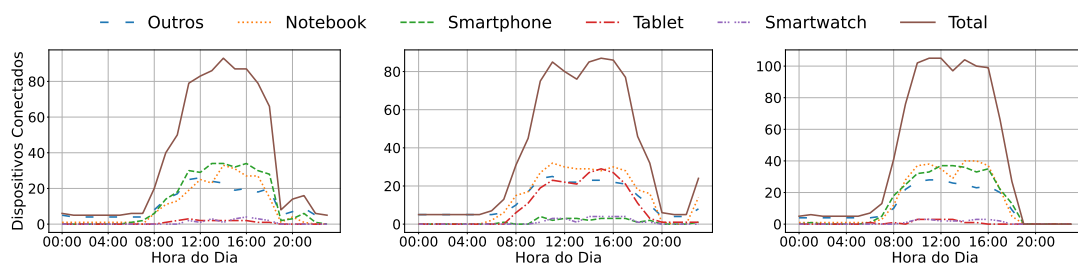
Figura 4. Caracterização da latência de comunicação a partir de um enlace satelital de acesso à Internet para diferentes servidores no mundo. S_1 é latência até o roteador local; S_2 , a latência até o *Carrier Grade NAT* (CGNAT); S_3 , latência até a saída do tráfego da os sistema autônomo (AS) do ISP LEO; S_4 é a latência até a entrada do tráfego no AS de destino e, por fim, S_5 é a latência da resposta do servidor de destino.

tráfego manteve-se relativamente estável, com picos notáveis às 17h35 e 18h05, sugerindo momentos de alta atividade, possivelmente relacionados a palestras e mesas redondas. Em contraste, o dia 28 exibiu maior variação no tráfego, com múltiplos picos entre 14h40 e



(a) Tráfego real na rede (27/11).

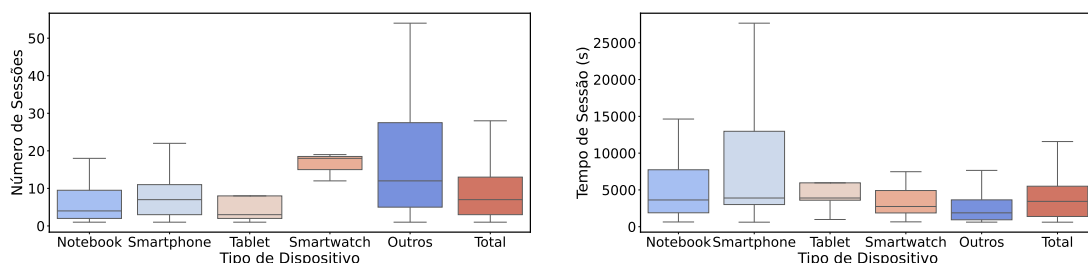
(b) Tráfego real na rede (28/11).



(c) Clientes conectados (27/11).

(d) Clientes conectados (28/11).

(e) Clientes conectados (29/11).



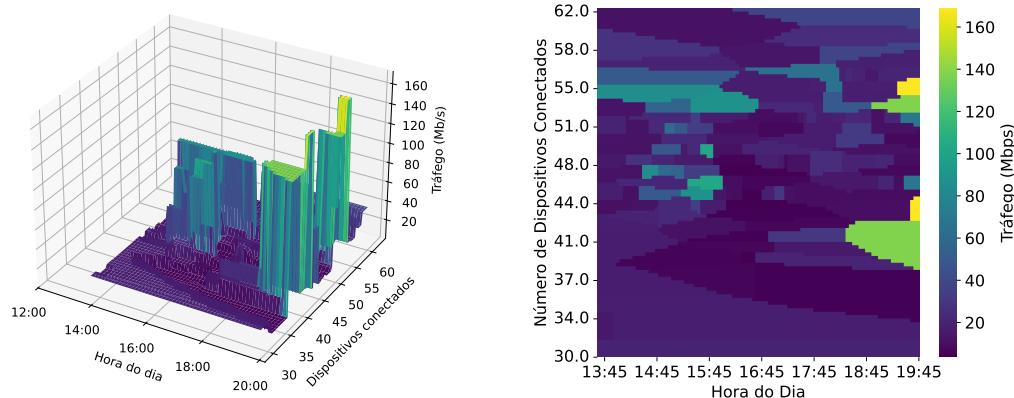
(f) Número de sessões por dispositivo.

(g) Tempo de sessão por dispositivo.

Figura 5. Caracterização do tráfego real e da conectividade dos clientes ao longo dos três dias consecutivos (27 a 29/11). (a) e (b) apresentam a variação do tráfego real medido na rede durante os dias 27 e 28/11. (c), (d) e (e) mostram o número de clientes simultaneamente conectados à rede, agrupados por tipo de dispositivo para cada dia. (f) e (g) ilustram a distribuição do número e o tempo médio das sessões por dispositivo.

15h40 e um aumento significativo próximo às 19h40, em razão do fluxo de participantes em deslocamento para o jantar da conferência. As Figuras 5(c), 5(d) e 5(e) ilustram o tipo e a variação na quantidade de dispositivos conectados durante a conferência, revelando um padrão consistente ao longo dos três dias. O número total de dispositivos aumentou rapidamente a partir das 8 h, atingindo um pico entre 12 h e 16 h, seguido por uma queda acentuada após as 18 h. *Smartphones* e notebooks dominaram as associações, com um volume significativo de acessos simultâneos. Dispositivos como *tablets*, *smartwatches* e outros dispositivos apresentaram um número de associações à rede da conferência relativamente baixo e estável durante todo o período. Esse comportamento sugere que a maior demanda por conectividade ocorreu durante as sessões principais do evento, refletindo o uso intensivo da rede para atividades acadêmicas e interações *online*. Outro ponto de destaque é que no dia 29 de novembro ocorreu o maior número de associações simultâneas, chegando a registrar 108 dispositivos associados simultaneamente. Ao todo, foram registrados 177 dispositivos únicos que se conectaram à rede da conferência.

Os resultados apresentados nas Figuras 5(f) e 5(g) evidenciam padrões distintos de conectividade entre os tipos de dispositivos avaliados na rede. *Notebooks* destacam-se com sessões mais longas, indicando uso contínuo e prolongado, enquanto *smartphones* e *tablets* apresentam duração intermediária e número moderado de sessões. Por outro lado, *smartwatches* têm o menor número de sessões e o menor tempo médio de conexão, sugerindo uso esporádico e pontual. Dispositivos classificados como *Outros* são aqueles que não foram identificados como nenhum tipo anterior e exibem comportamentos bastante diversos. Essas diferenças ressaltam perfis específicos de uso da rede relacionados ao tipo de dispositivo utilizado pelos usuários.



(a) Representação tridimensional do tráfego.

(b) Projeção dos dados em mapa de calor.

Figura 6. Caracterização considerando o tráfego medido em função do número de dispositivos conectados e da hora do dia. (a) Destaca-se a variação ao longo do tempo e com o aumento do número de clientes conectados à rede. (b) Visualização das regiões com maiores intensidades de tráfego.

Os resultados apresentados na Figura 6 destacam que os maiores valores de tráfego registrados entre os dias 27 e 28 estão diretamente associados a períodos com elevado número de dispositivos conectados, particularmente entre 18 h e 20 h, atingindo picos superiores a 140 Mb/s. Esses picos de utilização correspondem às atividades que concentraram maior número de participantes simultâneos, resultando em maior uso da rede, demonstrando que o enlace responde adequadamente às demandas geradas pelo evento.

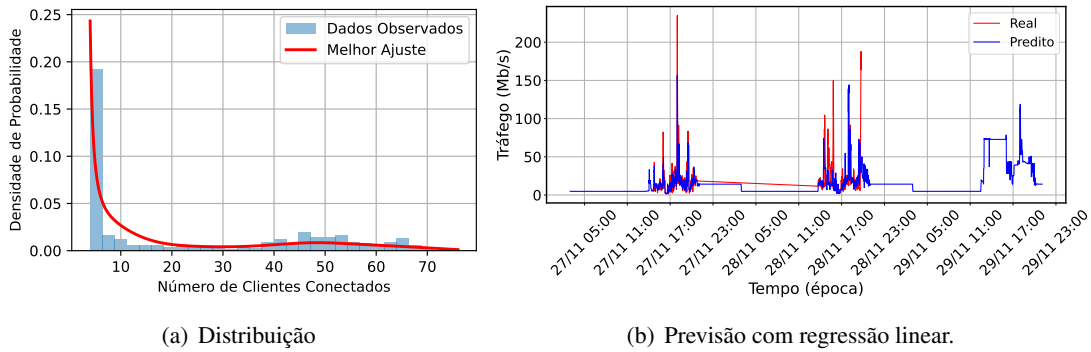


Figura 7. Análise estatística e modelo de previsão de demanda de tráfego. (a) A distribuição do número de clientes, ajustada pelos métodos de Pareto e KDE, demonstrou uma alta concentração em poucos clientes e uma cauda longa, indicando uma distribuição desigual no uso da rede. (b) Ao comparar o tráfego real com o tráfego previsto pelo algoritmo Floresta Aleatória, observou-se que o modelo acompanhou a tendência geral do tráfego, inclusive durante os picos de demanda.

A Figura 7(a) apresenta a distribuição do número de clientes conectados, comparando os dados observados com um ajuste utilizando a distribuição de Pareto e a suavização por KDE (*Kernel Density Estimation*). A densidade de probabilidade mostra uma alta concentração de valores em pequenos números de associações, com uma queda acentuada à medida que o número de clientes conectados aumenta. Esse comportamento sugere que, na maior parte do tempo, poucos clientes estavam ativos simultaneamente, enquanto situações de alta concorrência foram menos frequentes. O ajuste pela distribuição de Pareto captura essa característica, indicando uma distribuição fortemente assimétrica com uma cauda longa, típica de sistemas em que poucos eventos possuem grande impacto na carga total. Por fim, desenvolveu-se um modelo preditivo baseado em aprendizado de máquina para estimar a demanda de tráfego de rede durante a conferência. Para essa análise, foram avaliadas três abordagens: Floresta Aleatória, uma Rede Neural Híbrida e Regressão Linear. A Figura 7(b) exibe a comparação entre o tráfego de rede real e o tráfego previsto pelo modelo baseado no algoritmo Floresta Aleatória. O gráfico evidencia a capacidade do modelo em capturar os padrões de tráfego, especialmente os picos de alta intensidade. No entanto, algumas discrepâncias podem ser observadas, principalmente nos dias 27 e 28, embora a tendência geral do tráfego ainda seja bem representada.

5. Trabalhos Relacionados

A utilização de constelações de satélites em órbita baixa terrestre (LEO), especialmente a rede Starlink, tem gerado grande interesse acadêmico devido ao seu potencial em fornecer conectividade global de baixa latência e alta capacidade. As pesquisas recentes concentram-se na análise de desempenho, caracterização da qualidade de serviço, do impacto da mobilidade nos enlaces satelitais e segurança dessas redes.

Ma *et al.* analisam as características de rede das constelações de satélites LEO, com foco na Starlink, avaliando sua viabilidade como infraestrutura para conectividade global [Ma et al., 2023]. A metodologia envolveu medições sistemáticas realizadas por usuários finais em cenários variados, destacando desafios como latências elevadas e instabilidades, particularmente em cenários móveis e regiões remotas. Pekhterev apresenta estimativas detalhadas da largura de banda do Starlink, baseadas em dados públicos e declarações oficiais [Pekhterev, 2021]. Seu estudo evidencia desafios importantes relacionados à cobertura global e capacidade de atender à demanda crescente dos usuários.

Tiwari *et al.* exploram profundamente as características de latência da rede Starlink, usando uma infraestrutura real na Europa [Tiwari et al., 2023]. O estudo destaca grandes variações nas latências extremas e propõe modelos preditivos baseados em aprendizado de máquina, obtendo melhorias significativas na qualidade da experiência em *streaming* de vídeo. Talbi *et al.* analisam o desempenho de constelações LEO com medições distribuídas globalmente em cinco estações terrestres [Talbi et al., 2023]. Os resultados destacam diferenças significativas de desempenho dependendo da localização das estações terrestres e revelam o forte impacto do efeito Doppler nas comunicações. Ullah *et al.* avaliam o desempenho do terminal Starlink FHP na Finlândia, comparando cenários estacionários e móveis [Ullah et al., 2025]. O estudo revela que, embora mantenha baixa latência e alta taxa de transmissão em condições estacionárias, o desempenho em movimento é prejudicado por obstruções físicas e variações no canal de comunicação.

Em contraste aos trabalhos anteriores, o presente artigo se destaca por explorar especificamente a viabilidade do uso de enlaces LEO em um contexto prático e real, como eventos temporários e de curta duração, que demandam rápida instalação, alta escalabilidade e conectividade estável. Os resultados obtidos reforçam as conclusões gerais presentes na literatura, como baixa latência e alta capacidade das redes LEO, mas vão além ao demonstrar a aplicabilidade e custo-benefício superior em relação às alternativas tradicionais, especialmente em cenários dinâmicos e de demanda variável, contribuindo para preencher uma importante lacuna prática.

6. Conclusão

O avanço da tecnologia de redes de acesso à Internet via satélite tem sido impulsionado pelas limitações das infraestruturas terrestres, especialmente em cenários que demandam conectividade temporária e por curto período e, portanto, a instalação de redes fixas não é economicamente viável. A provisão de conectividade para eventos de curta duração apresenta desafios significativos, como a necessidade de infraestrutura de alta capacidade, baixa latência e escalabilidade para acomodar variações na demanda. Esse artigo avaliou a viabilidade do uso de enlaces satelitais de órbita baixa (*Low Earth Orbit* - LEO) para fornecer acesso à Internet durante eventos temporários, analisando métricas de desempenho, confiabilidade e custo-benefício. Para tanto, o artigo analisou e caracterizou o uso da rede sem fio disponibilizada na conferência IEEE CloudNet 2024, realizada em novembro de 2024 no Rio de Janeiro, Brasil. Durante o evento, os participantes da conferência tiveram acesso à rede sem fio com conectividade provida por um provedor de Internet líder em conectividade por satélite de órbita baixa terrestre no Brasil. Os resultados indicam que a conectividade LEO apresentou largura de banda estável, latências abaixo de 50 ms e um custo significativamente inferior ao de um enlace de rádio dedicado⁶, reforçando sua viabilidade para aplicações temporárias. Os resultados também reforçam que a experiência de aplicação de conectividade via satélite para eventos temporários pode ser aplicada ao escalar o número de estações em solo de acordo com a previsão de clientes a serem atendidos. Como trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento de tráfego e alocação dinâmica de recursos para otimizar o desempenho das redes baseadas em satélites de órbita baixa para atender eventos com pico de utilização de banda e necessidade de baixa latência.

⁶O custo do enlace de rádio dedicado com capacidade de 100 Mb/s foi orçado em R\$ 7.500,00, enquanto a contratação do enlace LEO foi realizada por, aproximadamente, R\$ 250,00, sem fidelização.

Referências

- Gongora-Torres, J. M., Vargas-Rosales, C., Aragón-Zavala, A. e Villalpando-Hernandez, R. (2022). Link budget analysis for LEO satellites based on the statistics of the elevation angle. *IEEE Access*, 10:14518–14528.
- Guimarães, P. H. V., Ferraz, L. H. G., Torres, J. V., Mattos, D. M. F., Andrés F., M. P., Andreoni L., M. E., Alvarenga, I. D., Rodrigues, C. S. C. e Duarte, O. C. M. B. (2013). Experimenting content-centric networks in the future internet testbed environment. Em *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, p. 1383–1387.
- Laniewski, D., Lanfer, E., Meijerink, B., van Rijswijk-Deij, R. e Aschenbruck, N. (2024). WetLinks: A large-scale longitudinal Starlink dataset with contiguous weather data. Em *2024 8th Network Traffic Measurement and Analysis Conference (TMA)*, p. 1–9. IEEE.
- Lopez, M. A., Silva, R. S., Alvarenga, I. D., Rebello, G. A. F., Sanz, I. J., Lobato, A. G. P., Mattos, D. M. F., Duarte, O. C. M. B. e Pujolle, G. (2017). Collecting and characterizing a real broadband access network traffic dataset. Em *2017 1st Cyber Security in Networking Conference (CSNet)*, p. 1–8.
- Ma, S., Chou, Y. C., Zhao, H., Chen, L., Ma, X. e Liu, J. (2023). Network characteristics of LEO satellite constellations: A Starlink-based measurement from end users. Em *IEEE INFOCOM 2023-IEEE Conference on Computer Communications*, p. 1–10. IEEE.
- Mohan, N., Ferguson, A. E., Cech, H., Bose, R., Renatin, P. R., Marina, M. K. e Ott, J. (2024). A multifaceted look at Starlink performance. Em *Proceedings of the ACM Web Conference 2024*, p. 2723–2734.
- Pekhterev, S. (2021). The bandwidth of the Starlink constellation... and the assessment of its potential subscriber base in the USA. *SatMagazine*, 11:54–57.
- Talbi, D., Gal, Z. e Sztrik, J. (2023). Low latency and high-speed communication service with LEO satellite constellation. Em *2023 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, p. 251–256. IEEE.
- Tieby, N., Khoury, J. e Bou-Harb, E. (2024). Characterizing and analyzing LEO satellite cyber landscape: A Starlink case study. Em *ICC 2024-IEEE International Conference on Communications*, p. 1352–1357. IEEE.
- Tiwari, S., Bhushan, S., Taneja, A., Kassem, M., Luo, C., Zhou, C., He, Z., Raman, A., Sastry, N., Qiu, L. et al. (2023). T3P: Demystifying low-earth orbit satellite broadband. *arXiv preprint arXiv:2310.11835*.
- Ullah, M. A., Heikkinen, A., Uitto, M., Höyhty, M., Anttonen, A., Mikhaylov, K. e Lind, T. (2025). Starlink in Northern Europe: A new look at stationary and in-motion performance. *arXiv preprint arXiv:2502.15552*.