

# Análise Empírica do Desempenho do Tráfego em Nível de Fluxo em Enlaces de Internet via Satélite LEO

Ricardo A. S. Filho<sup>1</sup>, Lucca V. Chatack<sup>1</sup>, Igor M. Moraes<sup>1</sup>,  
Nicollas R. de Oliveira<sup>1</sup>, Diogo M. F. Mattos<sup>1</sup>

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

{igor}@ic.uff.br; {nicollas\_rodrigues, diogo\_mattos}@id.uff.br

**Abstract.** *Low Earth Orbit (LEO) satellite constellations have emerged as a promising approach to achieving global connectivity. Nevertheless, the stability of their performance under conditions of high user demand remains insufficiently explored. An ongoing research question concerns the extent to which satellite handovers and link variability affect the Quality of Experience (QoE) when a single terminal serves multiple users. This study presents an empirical evaluation of Starlink’s ability to support a scientific conference involving up to 90 simultaneous clients using it as the primary backhaul. The experiment was conducted in a real-world environment, correlating flow-level traffic profiles, satellite signal quality metrics, and edge router resource utilization within a deliberately overprovisioned local infrastructure. The findings indicate that the network successfully sustained aggregate throughput peaks exceeding 200 Mb/s while maintaining latency consistently within the 30–50 ms range.*

**Resumo.** *As redes de satélites em Órbita Baixa da Terra (Low Earth Orbit - LEO) surgiram como uma solução promissora para conectividade global, porém a estabilidade de seu desempenho sob alta demanda de usuários ainda permanece pouco explorada. Uma pergunta de pesquisa atual é com que frequência handovers satelitais e a variabilidade do enlace impactam a Qualidade de Experiência (Quality of Experience - QoE) quando um único terminal atende múltiplos usuários. Este artigo propõe uma avaliação empírica da capacidade da Starlink de suportar um evento científico com até 90 clientes simultâneos como backhaul principal. Foi conduzido um experimento em ambiente real, correlacionando perfis de tráfego em nível de fluxo, métricas de qualidade do sinal satelital e uso de recursos do roteador de borda em uma infraestrutura local intencionalmente superdimensionada. Os resultados mostram que a rede sustentou com sucesso picos de vazão agregada superiores a 200 Mb/s, mantendo a latência estável entre 30–50 ms.*

## 1. Introdução

As redes de satélites em Órbita Baixa da Terra (*Low Earth Orbit* – LEO), exemplificadas pela Starlink da SpaceX, estão se consolidando como uma infraestrutura crítica para a conectividade global, ultrapassando a marca de 9 milhões de assinantes em 2025 e expandindo-se para mais de 42 novos territórios<sup>1</sup>. Com um mercado estimado em quase USD 13 bilhões em 2026

---

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.

<sup>1</sup>Disponível em <https://techblog.comsoc.org/2025/12/30/starlink-doubles-subscriber-base-expands-to-to-42-new-countries-territories-other-markets/>.

e uma taxa de crescimento anual projetada de 11% até 2032, constelações LEO prometem ampliar significativamente o acesso à Internet em áreas remotas e em contextos de missão crítica<sup>2</sup>. Em contraste com sistemas geostacionários (GEO), como HughesNet e Viasat, caracterizados por alta latência, e com redes celulares terrestres, limitadas pela cobertura das antenas, as redes LEO oferecem latência reduzida e alta largura de banda [Hu et al. 2023]. No entanto, o rápido avanço dessa tecnologia tem evidenciado um desafio relevante: a escassez de conhecimento público, detalhado e independente sobre a estabilidade, a confiabilidade e as limitações operacionais dessas redes sob condições dinâmicas e não ideais [Liu et al. 2025]. Tais condições ideais geralmente correspondem a cenários com usuário único, ausência de mobilidade e condições climáticas favoráveis.

Embora as redes LEO apresentem vantagens claras em termos de latência e capacidade, ainda é pouco compreendido como a alta densidade de usuários e as características intrínsecas desses sistemas afetam a Qualidade de Experiência (*Quality of Experience – QoE*) em ambientes de alta demanda. Estudos recentes indicam que fatores como reconfigurações internas da rede, com *handovers* satelitais ocorrendo a cada 15 segundos, e a variabilidade ambiental podem degradar o desempenho de aplicações sensíveis, resultando em pausas de vídeo ou interrupções de áudio [Zhao et al. 2023, Zhao and Pan 2024]. Embora existam trabalhos voltados à mobilidade ou à avaliação de desempenho com usuários isolados, há uma carência de pesquisas sobre o comportamento da rede sob estresse concentrado, no qual múltiplos clientes competem simultaneamente pelos recursos de um único terminal. A incerteza quanto à capacidade das redes LEO de suportar tráfego multimídia em tempo real com alta concorrência permanece, portanto, como um desafio de pesquisa em aberto.

Este artigo apresenta uma avaliação empírica de um terminal Starlink como enlace principal de *backhaul* durante um evento científico real, suportando até 90 clientes simultâneos. A metodologia adotada baseia-se na coleta e análise correlacionada de três dimensões de dados: (i) o perfil de tráfego em nível de fluxo, (ii) métricas de qualidade do sinal fornecidas pelo terminal Starlink, incluindo Razão Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio - SNR*), latência e vazão, e (iii) métricas de uso de recursos computacionais no roteador de borda. Para assegurar a integridade dos resultados, o experimento foi conduzido sobre uma infraestrutura local intencionalmente superdimensionada, com rede de distribuição cabeada baseada em um comutador com suporte a 10 Gb/s de tráfego por porta e enlaces de fibra óptica com suporte a tráfegos de mais de 2,5 Gb/s, eliminando gargalos terrestres e isolando o enlace LEO como o principal fator limitante.

Diferentemente de trabalhos anteriores, predominantemente focados em cenários de mobilidade veicular [Lundgren et al. 2025, Laniewski et al. 2025] ou na análise de latência para usuários isolados [Kassem et al. 2022], este trabalho avalia o desempenho da rede em um ambiente estacionário de alta densidade de uso. Enquanto investigações prévias reportam degradação significativa sob movimento e variabilidade climática, os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a conectividade LEO é capaz de suportar eventos com múltiplos usuários simultâneos, com comprometimento mínimo do ambiente local, mantendo níveis de estabilidade compatíveis com aplicações acadêmicas e multimídia. A análise integrada dos componentes da rede evidencia como o sistema gerencia altas taxas de fluxo sob alta demanda, oferecendo subsídios práticos para o dimensionamento de redes temporárias baseadas em satélite.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 aborda o desafio de avaliar o desempenho de uma rede LEO em um cenário com alta densidade de usuários. A Seção 3 detalha a metodologia, incluindo a arquitetura da rede do evento e as ferramentas de coleta de dados. A Seção 4 apresenta a análise dos resultados obtidos, correlacionando métricas

---

<sup>2</sup>Disponível em <https://www.researchandmarkets.com/report/low-earth-orbiting-satellite>.

de rede e qualidade de sinal. A Seção 5 discute os trabalhos relacionados. Por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

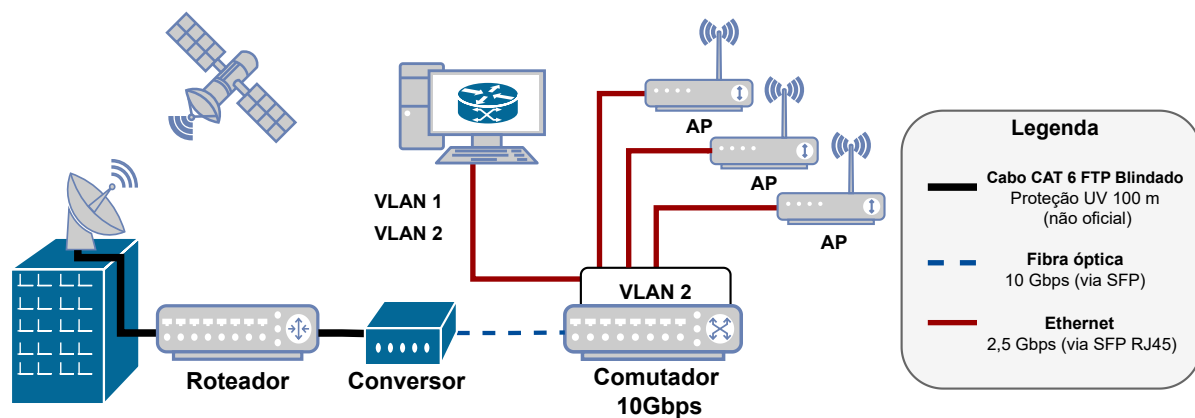
## 2. Desafios na Avaliação de QoS e QoE em Redes LEO Densas

A investigação sobre redes LEO tem sido conduzida, em grande parte, a partir de análises centradas em métricas tradicionais de qualidade de serviço ou em cenários com número reduzido de usuários, o que limita a compreensão do seu comportamento em contextos de uso coletivo [Kassem et al. 2022, Laniewski et al. 2025, Mohan et al. 2024]. Avaliações anteriores caracterizam latência, perda e vazão sob diferentes condições regionais e climáticas, além de identificarem reconfigurações periódicas da rede. No entanto, essas análises concentram-se predominantemente em navegação *web* ou em clientes isolados, desconsiderando a competição intensa por recursos quando múltiplos usuários compartilham simultaneamente um único terminal. De forma semelhante, a literatura clássica e recente sobre QoE reconhece que métricas puramente de rede são insuficientes para descrever a experiência percebida, especialmente em ambientes satelitais, mas raramente explora cenários LEO com dezenas de usuários ativos ao mesmo tempo. Esse conjunto de limitações revela uma lacuna na compreensão da relação direta entre estados locais de congestionamento, métricas de QoS e a QoE percebida em ambientes densos e multiusuário, direcionando a análise para os mecanismos dinâmicos intrínsecos à rede.

Entre esses mecanismos, as dinâmicas temporais das redes LEO, em particular os *handovers* periódicos entre satélites, assumem um papel central, embora ainda pouco compreendido sob a perspectiva da QoE coletiva. Evidências experimentais indicam que essas reconfigurações ocorrem em ciclos da ordem de 15 segundos, induzindo flutuações subsegundo em latência e vazão, com impacto mensurável em aplicações sensíveis a atraso [Mohan et al. 2024, Zhao and Pan 2024]. Resultados empíricos mostram que tais eventos são suficientes para degradar a experiência de um único usuário, como em transmissões ao vivo de baixa latência, enquanto análises estatísticas apontam para o caráter quase determinístico dessa variabilidade. Apesar disso, permanece indefinido com que frequência e severidade esses fenômenos afetam a QoE quando múltiplos usuários competem simultaneamente por um único terminal em um evento estacionário, reforçando a necessidade de caracterizações em cenários reais de alta densidade.

Adicionalmente, os cenários normalmente considerados na literatura raramente representam ambientes estacionários com elevada concentração de usuários conectados ao mesmo ponto de acesso LEO. A maior parte das análises prioriza o uso residencial com poucos dispositivos ou contextos de mobilidade veicular, nos quais a ênfase recai sobre estabilidade de conexão, impacto do terreno ou variações de sinal associadas ao movimento [Lundgren et al. 2025, Laniewski et al. 2025, Hu et al. 2023]. Trabalhos sobre redes satélite-terrestre integradas avaliam aplicações multimídia em testbeds híbridos, porém com número limitado de fluxos simultâneos e enlaces com perfis distintos, como GEO, afastando-se do cenário típico de eventos estacionários com Wi-Fi aberto alimentado por um único terminal LEO. Essa ausência de avaliações sistemáticas compromete o entendimento da capacidade efetiva do terminal como enlace de *backhaul* sob tráfego agregado elevado e levanta questionamentos sobre a adequação das métricas tradicionalmente empregadas.

Nesse contexto, a validação de modelos e métricas de QoE para cenários LEO multiusuário permanece como um desafio em aberto. A maioria dos modelos de predição existentes foi desenvolvida e validada em redes terrestres ou em ambientes laboratoriais controlados, o que torna incerta sua aplicabilidade em sistemas caracterizados por latência elevada e variabilidade rápida do enlace [Feng and Zhu 2025, Noorani et al. 2022]. Bases de dados reais de QoE em



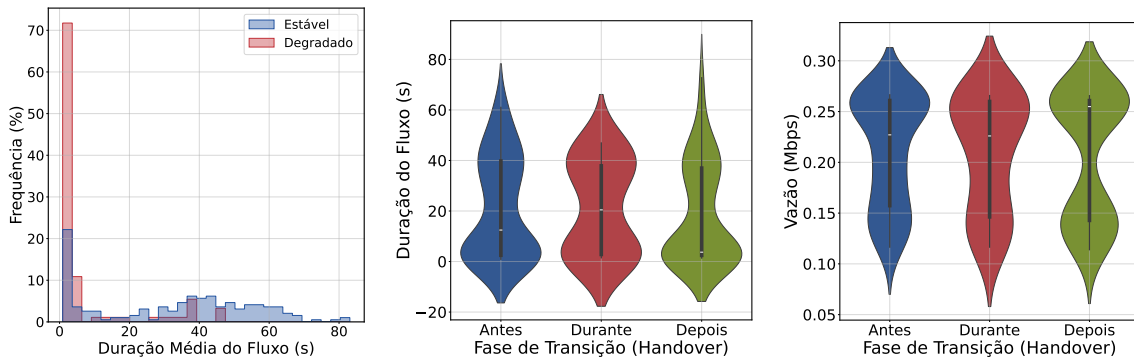
**Figura 1. Topologia da infraestrutura de rede implantada durante a conferência IEEE WD 2025. A conectividade à Internet é fornecida por um terminal Starlink, que atua como único enlace de *backhaul*. O tráfego é encaminhado por um roteador de borda e distribuído por um *switch* central, interligado por enlaces de fibra óptica. A segmentação em VLANs separa dispositivos cabeados e a rede Wi-Fi 6, composta por múltiplos pontos de acesso conectados por enlaces Ethernet, garantindo que o enlace satelital permaneça como o principal gargalo do sistema.**

redes satelitais, por sua vez, concentram-se majoritariamente em enlaces GEO ou em cenários controlados, não capturando a interação entre *handovers* periódicos, flutuações do enlace físico e competição entre múltiplos usuários em um único terminal. Esse conjunto de limitações evidencia que ainda não está claramente estabelecido como, e em que magnitude, esses fatores degradam a QoE quando um único terminal LEO atende simultaneamente múltiplos usuários em um evento estacionário, configurando o desafio central desta linha de pesquisa.

### 3. Proposta de Coleta e Processamento de Dados

Este artigo apresenta uma avaliação empírica do uso da Starlink como enlace principal de *backhaul* em um cenário real de evento científico de alta demanda. Os experimentos foram conduzidos durante a conferência IEEE Wireless Days (WD 2025), realizada entre 1 e 3 de dezembro de 2025, em Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, na qual a infraestrutura de rede suportou picos de até 90 clientes simultaneamente conectados. O ambiente foi projetado para refletir condições reais de uso coletivo, mantendo controle experimental suficiente para permitir a análise precisa do desempenho do enlace satelital.

A Figura 1 ilustra a topologia de rede implantada durante a conferência. A antena Starlink fornece conectividade à Internet a um roteador de borda, responsável pelo encaminhamento do tráfego para a rede interna do evento. Esse roteador é conectado a um conversor de mídia cobre-fibra, que realiza a interligação com o *switch* de distribuição de 10 Gb/s por meio de um enlace óptico. A partir desse *switch*, o tráfego é distribuído em duas VLANs, separando dispositivos cabeados de apoio da rede de acesso sem fio destinada aos participantes. Essa segmentação reduz interferências e permite maior controle sobre os fluxos observados. A rede sem fio é composta por múltiplos pontos de acesso Wi-Fi 6, conectados individualmente ao *switch* por enlaces Ethernet de 2,5 Gb/s, garantindo cobertura homogênea e mobilidade contínua dos usuários sem introduzir contenções na camada de acesso. O uso combinado de enlaces ópticos, alta capacidade no núcleo e segmentação lógica assegura que o enlace Starlink permaneça como o principal fator limitante do sistema. O roteador de borda, responsável pela interconexão com o enlace de *backhaul*, foi implementado utilizando um Mini PC Lenovo ThinkCentre M70q. Este equipamento atua como ponto central de encaminhamento entre a conectividade externa e a rede interna segmentada em VLANs. A plataforma é equipada com processador Intel Core i7-10700T de 10ª geração, com 8 núcleos e 16 *threads*, além de 32 GB de memória RAM DDR4



(a) Histograma da duração média dos fluxos sob diferentes condições. (b) Duração dos fluxos ao longo das fases de *handover*. (c) Vazão ao longo das fases de *handover*.

**Figura 2. Análise da dinâmica dos fluxos ao longo das fases de *handover*. Nota-se uma redução na persistência dos fluxos e maior concentração de conexões de curta duração em cenários degradados, bem como variações no comportamento da vazão durante o processo de transição.**

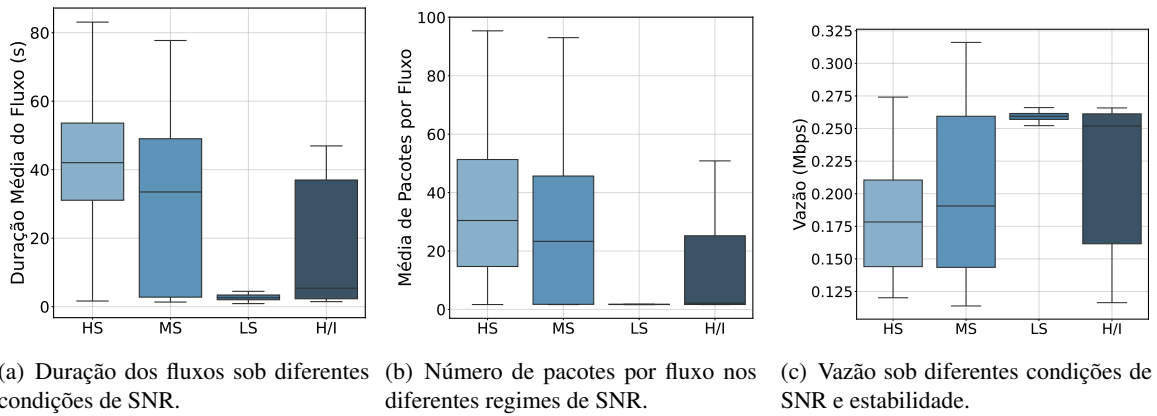
e armazenamento em SSD NVMe de 512 GB. A interface de rede utilizada é uma Intel Ethernet Connection I219-V, operando sob o *driver* e1000e no Linux. Considerando seu papel na agregação de tráfego, funcionalidades de *offloading* foram desativadas, incluindo GSO, GRO, TSO, cálculo de *checksum*, processamento de VLAN e *scatter-gather*, deslocando o processamento para a CPU. Essa configuração aumenta a carga computacional, mas proporciona maior previsibilidade no encaminhamento, permitindo operação próxima à taxa nominal da interface no cenário experimental. As métricas de fluxo foram coletadas via NetFlow exportado pelo roteador, com granularidade temporal definida. As métricas do enlace Starlink foram obtidas via API local do terminal, enquanto o uso de CPU e memória foi monitorado por ferramentas do sistema operacional. Todos os dados foram sincronizados por meio de timestamps em UTC.

A infraestrutura de rede local foi intencionalmente superdimensionada para evitar gargalos fora do domínio do enlace LEO. Para isso, foi implantada uma rede de distribuição cabeada baseada em um *switch* central de 10 Gb/s com interfaces SFP/SFP+, interligado por enlaces de fibra óptica ao roteador de borda e aos principais elementos da rede. Os enlaces de acesso utilizam Ethernet de 2,5 Gb/s, assegurando capacidade suficiente para absorver o tráfego agregado dos usuários finais. Dessa forma, eventuais degradações observadas podem ser atribuídas predominantemente ao comportamento do enlace satelital.

#### 4. Avaliação e Resultados

A metodologia de avaliação baseia-se na análise correlacionada de três dimensões complementares: (i) características de tráfego em nível de fluxo observadas na rede de acesso, (ii) métricas de desempenho em nível de enlace fornecidas pelo sistema Starlink, incluindo SNR, latência e vazão, e (iii) indicadores de utilização e encaminhamento no roteador de borda, utilizados como *proxy* para a carga efetivamente imposta ao *backhaul*. Essa abordagem multidimensional permite caracterizar de forma integrada o comportamento do enlace LEO sob condições realistas de tráfego agregado e variabilidade temporal.

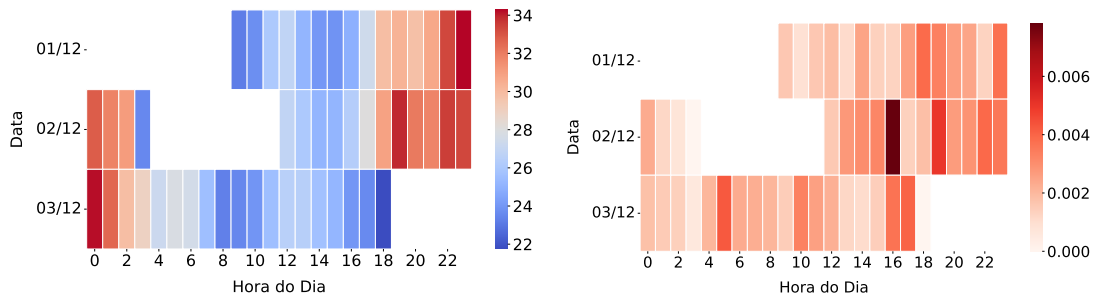
Em uma primeira análise, analisa-se como eventos de degradação do enlace e *handovers* afetam a persistência e a eficiência das conexões. A Figura 2(a) compara a distribuição da duração média dos fluxos sob condições estáveis e degradadas da rede. As condições estáveis apresentam uma distribuição mais ampla, com maior proporção de fluxos de longa duração, enquanto as condições degradadas são dominadas por conexões de curta duração concentradas próximas a zero. A sobreposição limitada entre as distribuições indica que eventos de degrada-



**Figura 3. Boxplots que relacionam métricas em nível de fluxo às condições de qualidade do enlace, incluindo cenários de SNRs alto (*HS*), médio (*MS*), baixo (*LS*) e *handover* ou instabilidade (*H/I*). A Figura (a) apresenta a distribuição da duração média dos fluxos sob diferentes regimes de SNR. A Figura (b) mostra o número médio de pacotes por fluxo nas mesmas condições. A Figura (c) ilustra as distribuições correspondentes de vazão, destacando o impacto dos níveis de SNR e de eventos de *handover* ou instabilidade sobre o comportamento do tráfego.**

ção reduzem significativamente a persistência dos fluxos, deslocando o comportamento da rede para conexões mais transitórias. Essa mudança nas condições da rede indica que, na presença de eventos de degradação, a rede opera de forma mais reativa, na qual as conexões são estabelecidas e encerradas rapidamente, em vez de serem mantidas por períodos prolongados. Sob a perspectiva de aplicações interativas e de *streaming*, essa redução na persistência dos fluxos tende a se manifestar como reinicializações frequentes de conexão, renegociação de parâmetros de transporte ou troca de servidores, mesmo quando a taxa média de perda permanece baixa. Esse comportamento evidencia que a observação exclusiva da vazão agregada não captura plenamente o impacto da variabilidade do enlace na experiência do usuário. As Figuras 2(b) e 2(c) mostram o impacto dos eventos de *handover* sobre o comportamento e o desempenho dos fluxos. A duração dos fluxos apresenta uma distribuição bimodal em todas as fases, com fluxos de curta duração e um conjunto menor de conexões mais longas. Durante o *handover*, tanto a duração quanto a vazão exibem maior dispersão e um deslocamento para valores mais baixos, indicando maior variabilidade e degradação transitória. Após o *handover*, o desempenho se recupera parcialmente, embora a variabilidade residual sugira instabilidade persistente. De modo geral, os eventos de *handover* introduzem interrupções de curto prazo que afetam a continuidade e a eficiência dos fluxos, enquanto as condições pós-*handover* tendem a restabelecer o desempenho nominal.

Paralelamente, avalia-se como diferentes regimes de qualidade do enlace afetam a dinâmica dos fluxos. As Figuras 3(a), 3(b) e 3(c) relacionam diferentes métricas em nível de fluxo a regimes definidos por níveis de SNR e por períodos de *handover* ou instabilidade. Condições de SNR elevado estão associadas a fluxos mais duradouros, maior número de pacotes e vazão relativamente estável. O regime de SNR intermediário apresenta maior dispersão em todas as métricas, com durações de fluxo e volumes de pacotes heterogêneos e picos ocasionais de vazão, indicando a alternância entre períodos de qualidade de enlace favorável e degradações transitórias. Em contraste, condições de SNR baixo resultam em fluxos de curta duração, com poucos pacotes e variabilidade limitada, refletindo conexões instáveis ou encerradas prematuramente. Períodos envolvendo *handovers* ou instabilidade exibem comportamento intermediário, com aumento da variabilidade na duração dos fluxos, na contagem de pacotes e na vazão, evidenciando as flutuações adicionais de desempenho introduzidas pela mobilidade e pela reconfiguração do



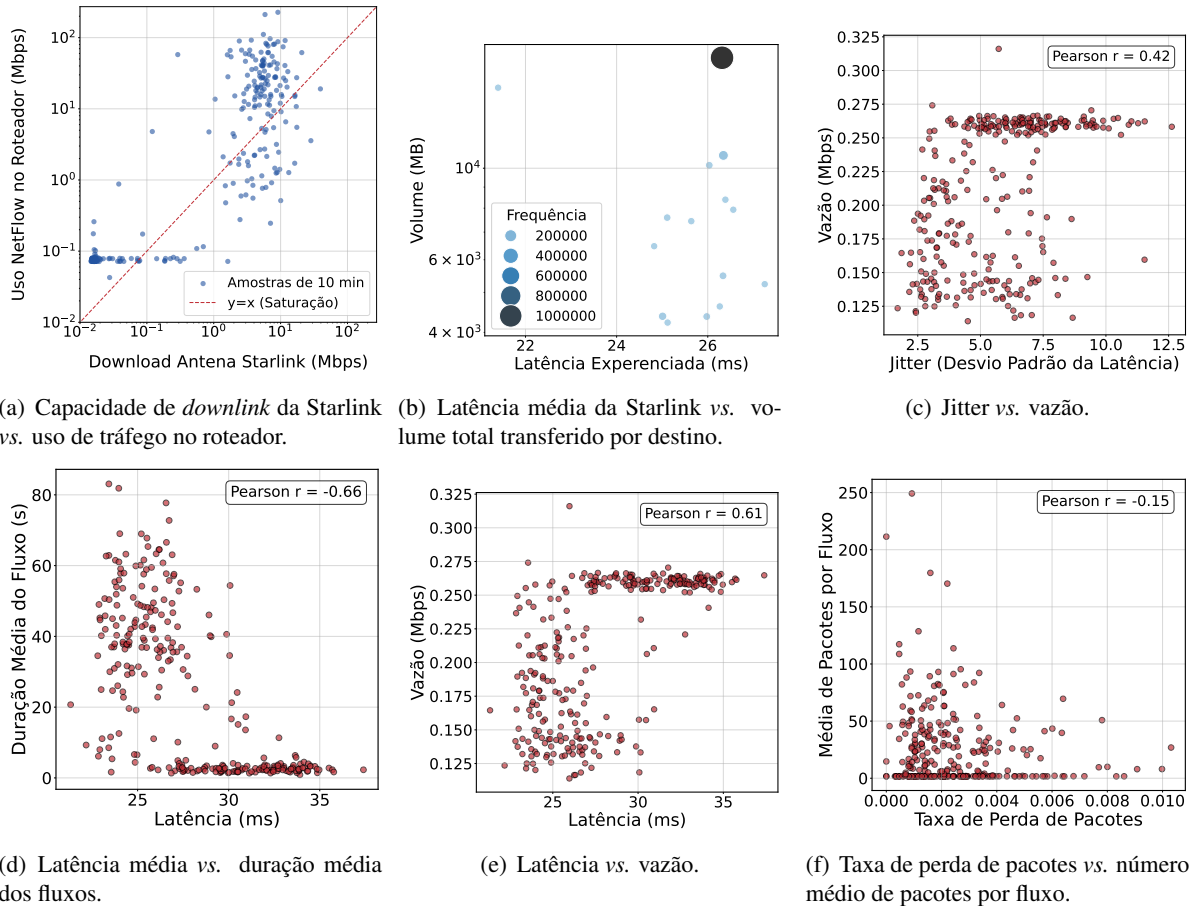
(a) Distribuição horária da latência ao longo dos dias. (b) Taxa horária de perda de pacotes ao longo dos dias.

**Figura 4. Mapas de calor da distribuição temporal da latência e da taxa de perda de pacotes ao longo dos dias e horários. Observa-se variação diurna da latência, com aumento em períodos de maior carga, e ocorrência de perdas concentradas em intervalos específicos, indicando degradações transitórias do enlace.**

enlace. De forma geral, os resultados confirmam o papel central do SNR na estabilidade da comunicação, enquanto eventos de *handover* introduzem variabilidade adicional que não pode ser explicada apenas pela qualidade média do sinal. Esses resultados indicam que os usuários podem experimentar microinterrupções na qualidade do *streaming* em janelas temporais de poucos segundos, mesmo quando os indicadores de qualidade do canal permanecem, em média, dentro de faixas consideradas favoráveis.

As Figuras 4(a) e 4(b) apresentam a evolução temporal da latência e da taxa de perda de pacotes em função da hora do dia ao longo dos períodos monitorados. Os valores de latência exibem um padrão diurno claro, com atrasos menores observados predominantemente nas primeiras horas da manhã e aumento da latência nos períodos de fim de tarde e noite. Esse comportamento sugere um efeito de carga dependente do tempo na rede, potencialmente associado a uma maior demanda de tráfego ou a condições dinâmicas do enlace. A perda de pacotes segue um padrão parcialmente correlacionado, com picos isolados ocorrendo em horários específicos, particularmente no fim da tarde, enquanto permanece próxima de zero por intervalos prolongados. A concentração de taxas de perda mais elevadas em janelas temporais estreitas indica eventos de degradação transitórios, e não instabilidade sustentada.

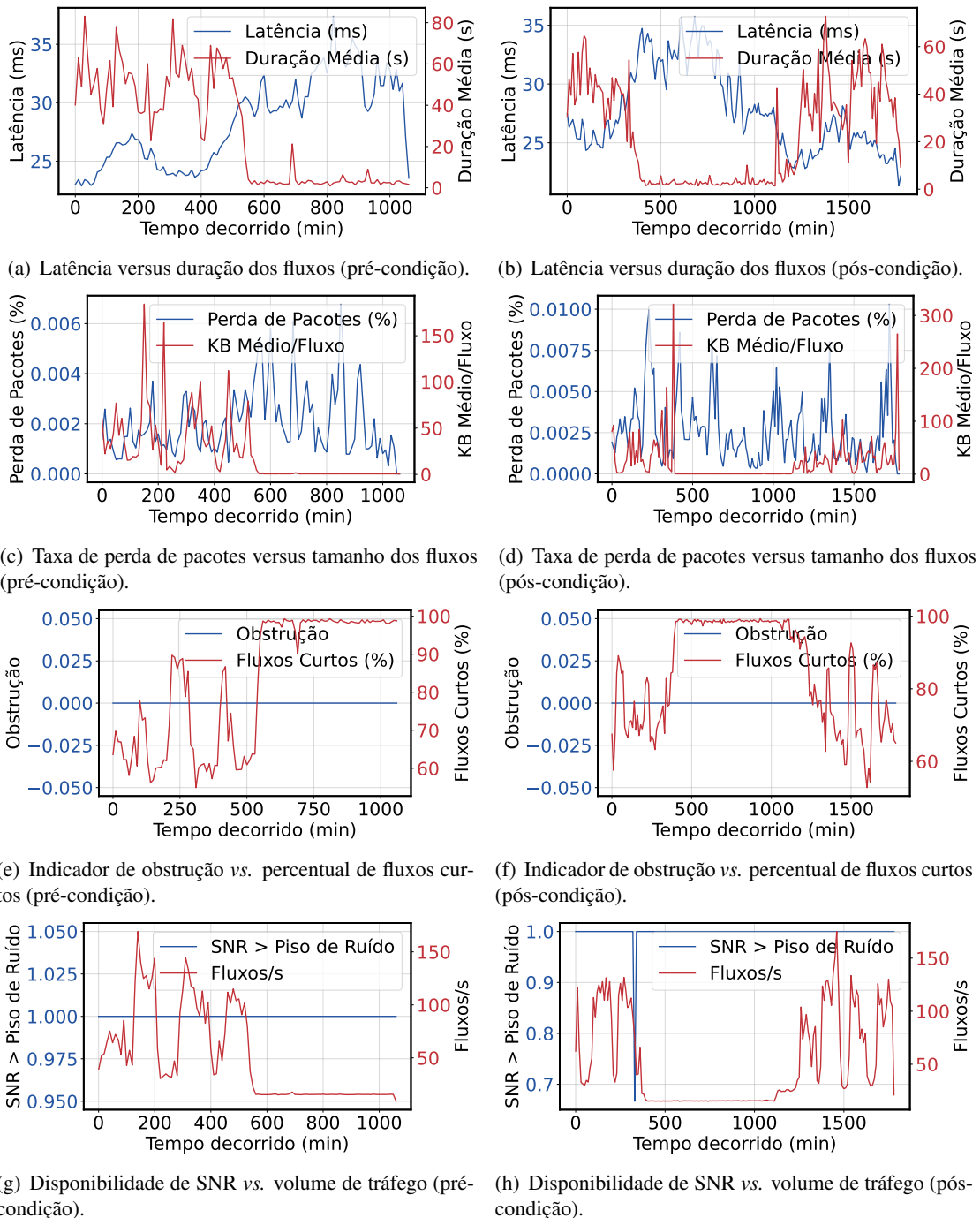
A Figura 5 apresenta uma análise orientada por correlação entre métricas do enlace Starlink e características de tráfego em nível de fluxo. Na Figura 5(a), o forte alinhamento das amostras com a linha de saturação ( $y=x$ ) confirma uma relação quase linear entre a capacidade de *downlink* reportada pela antena Starlink e o volume de tráfego processado pelo roteador de borda, indicando que o enlace satelital restringe diretamente a vazão alcançável. Esse comportamento valida o desenho experimental, no qual a infraestrutura terrestre foi superdimensionada para evitar gargalos locais e isolar o *backhaul* LEO como o principal fator limitante. Complementarmente, a Figura 5(b) mostra concentração de maiores volumes transferidos em latências moderadas ( $\approx 24\text{--}27$  ms), sem aumento proporcional em latências superiores. A distribuição dos pontos indica limitação do enlace e possível saturação do *backhaul*, além de variabilidade na eficiência de transferência sob latências semelhantes. As Figuras 5(c) e 5(e) quantificam explicitamente a relação entre métricas associadas a atraso e a vazão. Na Figura 5(c), o coeficiente de correlação de Pearson ( $r = 0.42$ ) indica uma correlação positiva moderada entre jitter e vazão, sugerindo que períodos de maior intensidade de tráfego estão associados a maior variabilidade de latência. De forma semelhante, a Figura 5(e) apresenta um coeficiente de Pearson de ( $r = 0.61$ ), revelando uma correlação positiva mais forte entre a latência média e a vazão alcançada. Esse resultado reflete a coexistência de altas taxas de dados e atrasos elevados durante fases de utilização sustentada do enlace, um comportamento característico de enlaces satelitais LEO



**Figura 5. Análise de correlação entre métricas do enlace Starlink e características de tráfego em nível de fluxo observadas durante o evento. As figuras, em conjunto, evidenciam o impacto da latência e de sua variabilidade sobre a vazão, a duração dos fluxos e a agregação de tráfego, ao mesmo tempo em que confirmam que a perda de pacotes desempenha um papel secundário no cenário avaliado.**

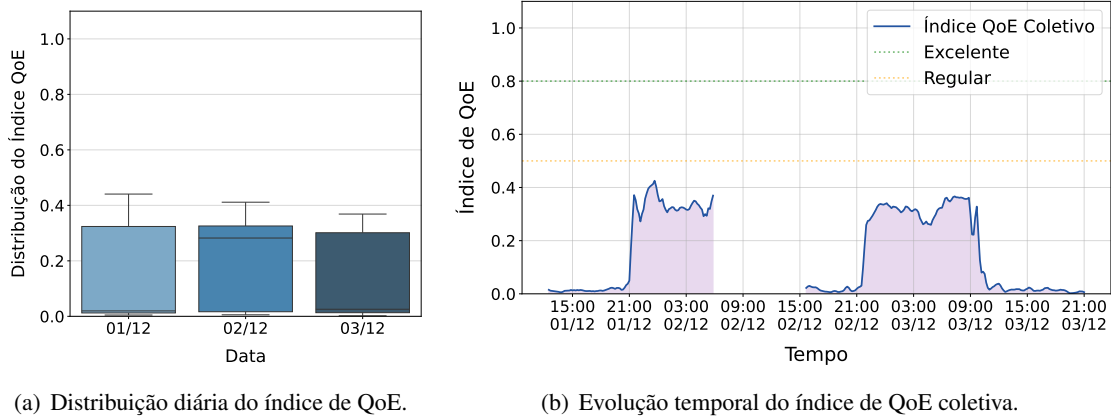
compartilhados sob carga. A influência da latência e da perda de pacotes sobre a persistência dos fluxos é ilustrada adicionalmente nas Figuras 5(d) e 5(f). A Figura 5(d) mostra uma forte correlação negativa, com Pearson ( $r = -0.66$ ), indicando que valores mais elevados de latência estão associados a durações médias de fluxo significativamente menores, possivelmente devido a adaptações em nível de aplicação ou ao encerramento prematuro de sessões sob condições de atraso degradadas. Em contraste, a Figura 5(f) apresenta uma correlação negativa fraca ( $r = -0.15$ ) entre a taxa de perda de pacotes e o número médio de pacotes por fluxo, sugerindo que eventos de perda são esporádicos e não dominam o comportamento dos fluxos no cenário avaliado.

Ao comparar as Figuras 6(a) e 6(b), tornam-se evidentes diferenças na persistência dos fluxos. Antes do evento, as durações dos fluxos permanecem amplamente dispersas ao longo da faixa de latência observada, indicando um acoplamento limitado entre latência e tempo de vida dos fluxos. Após o evento, as durações concentram-se em valores mais baixos apesar de níveis de latência semelhantes, sugerindo maior instabilidade que favorece conexões de curta duração. O contraste entre as Figuras 6(c) e 6(d) evidencia uma mudança na forma como a perda de pacotes afeta o crescimento dos fluxos. Na pré-condição, picos de perda coexistem com fluxos de grande porte, indicando tolerância a degradações esporádicas. Em contrapartida, na pós-condição, taxas de perda mais elevadas estão majoritariamente associadas a fluxos menores, apontando para encerramento precoce ou vazão reduzida sob condições adversas. Conforme



**Figura 6. Análise de correlação entre indicadores de desempenho da rede antes e após o evento de referência. A figura relaciona latência, perda de pacotes, obstrução e disponibilidade de SNR a métricas em nível de fluxo, destacando mudanças na persistência, no tamanho dos fluxos e no volume de tráfego entre as condições pré e pós-evento.**

mostrado nas Figuras 6(e) e 6(f), o papel da obstrução torna-se mais pronunciado após o evento. Enquanto antes a obstrução permanece desprezível e a proporção de fluxos curtos varia moderadamente, a pós-condição apresenta períodos sustentados nos quais o aumento da obstrução se alinha a uma alta proporção de fluxos curtos. Esse padrão indica uma influência mais forte da degradação da linha de visada na interrupção dos fluxos. Por fim, as Figuras 6(g) e 6(h) revelam uma mudança na relação entre a qualidade do sinal e o volume de tráfego. Antes do evento, alta disponibilidade de SNR coincide com taxas elevadas de fluxo. Posteriormente, o volume



(a) Distribuição diária do índice de QoE.

(b) Evolução temporal do índice de QoE coletiva.

**Figura 7. Comportamento temporal e distribuição do índice de QoE coletiva em cenário multi-usuário com enlace LEO. A distribuição diária evidencia alta variabilidade e predominância de baixos valores de QoE, enquanto a evolução temporal mostra períodos de degradação recorrente sob carga, sem atingir níveis considerados regulares, indicando o enlace satelital como principal gargalo do sistema.**

de tráfego diminui substancialmente apesar de níveis de SNR consistentemente altos, sugerindo que fatores além da qualidade do enlace passam a restringir a atividade dos fluxos.

Em conjunto, as análises indicam que o enlace LEO avaliado é capaz de sustentar picos superiores a 200 Mb/s mantendo latência na faixa de 30–50 ms, mas que a experiência percebida pelo usuário é particularmente sensível à variabilidade temporal introduzida por *handovers*, instabilidades do canal e obstruções locais. Mesmo quando métricas tradicionais de QoS permanecem, em média, dentro de limites aceitáveis, a combinação de redução na persistência dos fluxos, aumento do *jitter* e menor duração das sessões sob determinadas condições aponta para uma potencial degradação da QoE, especialmente para aplicações de mídia contínua em tempo real. Esses resultados destacam a necessidade de modelos de avaliação que incorporem explicitamente a dinâmica dos fluxos e os efeitos de reconfigurações periódicas do enlace ao dimensionar e operar redes temporárias baseadas em LEO para eventos de alta densidade.

A Figura 7(a) complementa essa análise ao apresentar a distribuição do índice de QoE coletiva por dia, permitindo uma comparação estatística entre os períodos avaliados. Observa-se que as distribuições são assimétricas, com grande concentração de valores próximos a zero e caudas superiores que alcançam valores moderados de QoE. O primeiro dia apresenta maior dispersão, indicando uma variabilidade mais acentuada da experiência coletiva, enquanto o segundo dia concentra valores medianos ligeiramente superiores, sugerindo condições relativamente mais estáveis durante os períodos de uso intenso. No terceiro dia, a distribuição desloca-se novamente para valores mais baixos, com redução do quartil superior, indicando uma degradação mais consistente da QoE coletiva.

A Figura 7(b) mostra a evolução temporal do índice de QoE coletiva ao longo dos três dias do evento, evidenciando o impacto do uso agregado da rede sobre a experiência percebida. Observa-se um aumento consistente do índice durante os períodos de atividade, seguido por quedas acentuadas fora desses intervalos, enquanto, mesmo nos momentos de maior estabilidade, os valores permanecem majoritariamente abaixo do limiar associado à condição *fair*, indicando degradação frequente da experiência sob carga elevada. As oscilações intra-período refletem a variabilidade dinâmica do enlace LEO, possivelmente associada a eventos periódicos de *handover* e flutuações de capacidade. Embora o comportamento geral seja semelhante entre os dias, o segundo dia apresenta intervalos mais longos de estabilidade relativa, enquanto o terceiro exibe quedas mais abruptas ao final do período ativo, sugerindo que a QoE coletiva resulta

da interação entre tráfego agregado e dinâmica temporal do enlace satelital. Tais resultados de QoE mostram que em um cenário estacionário de alta densidade atendido por um único terminal LEO, a experiência coletiva é marcada por valores persistentemente baixos de QoE e elevada variabilidade temporal. Esses resultados indicam que métricas médias ou agregadas podem mascarar episódios frequentes de degradação percebida, reforçando a necessidade de análises em nível coletivo e temporalmente sensíveis para compreender adequadamente o impacto da dinâmica do enlace LEO em ambientes multiusuário.

## 5. Trabalhos Relacionados

A literatura recente sobre redes LEO concentra-se em quatro eixos complementares: (i) segurança e detecção de comportamentos anômalos; (ii) caracterização estrutural e arquitetural baseada em modelagem e análise entre camadas; (iii) investigações empíricas conduzidas em sistemas reais; e (iv) análise de aplicações sensíveis a atraso e QoE. Em conjunto, esses trabalhos contribuem para a compreensão de diferentes dimensões do ecossistema LEO, contudo ainda oferecem cobertura limitada quanto à análise empírica do comportamento do tráfego em nível de fluxo sob a variabilidade dinâmica do enlace físico em cenários multiusuário densos.

Dentre os estudos focados na segurança e mitigação de anomalias em redes LEO e em infraestruturas satélite-terrestre integradas, Jiang *et al.* propõem o SatShield, um sistema de mitigação *in-network* para ataques de inundação de enlaces que explora a programabilidade do plano de dados para identificar e conter fluxos anômalos em tempo real [Jiang et al. 2024]. De forma complementar, Wan *et al.* apresentam um sistema de detecção de intrusão baseado em aprendizado federado para redes espaciais-terrestres integradas de veículos, utilizando fluxos de rede como unidade básica de análise e incorporando explicitamente a mobilidade dos satélites [Wan et al. 2025]. Embora ambos empreguem informações em nível de fluxo, o objetivo dessas abordagens permanece restrito à identificação de tráfego malicioso, sem examinar como a variabilidade do enlace físico impacta o desempenho de aplicações legítimas.

Outra vertente da literatura dedica-se à caracterização estrutural e arquitetural das constelações LEO, bem como à modelagem das interações entre camadas. Pachler *et al.* realizam uma comparação técnica detalhada entre constelações como Starlink, OneWeb, Telesat e Kuiper, considerando parâmetros orbitais, arquiteturas de *gateways* e estimativas de vazão [Pachler et al. 2021]. Em uma perspectiva complementar, Wang *et al.* propõem uma estrutura analítica para avaliar a interação entre conectividade física, decisões de roteamento e adaptação de serviços em redes satélite-terrestre orientadas a serviços [Wang et al. 2026]. No contexto de redes não-terrestres (NTN), Bonora *et al.* investigam o uso de constelações LEO como plataformas de computação de borda para *offloading* de tarefas em cenários veiculares, evidenciando o impacto da dinâmica orbital e das condições do canal no atraso fim-a-fim e na viabilidade de aplicações em tempo real [Bonora et al. 2025]. Apesar de fornecerem uma visão abrangente em nível macro e fundamentos teóricos relevantes, esses estudos permanecem majoritariamente baseados em modelagem e simulações, sem validação por meio de medições em ambientes operacionais.

Mais recentemente, medições empíricas em redes LEO reais têm ganhado destaque. Zhao *et al.* apresentam um estudo abrangente da rede OneWeb, combinando abordagens *inside-out* e *outside-in* para caracterizar métricas como SINR, latência, vazão e eventos de *handover*, além de correlacioná-las com informações dos satélites conectados [Zhao et al. 2025]. Em um contexto de mobilidade extrema, Borgianni *et al.* avaliam o desempenho da Starlink durante um voo comercial intercontinental, evidenciando flutuações significativas de latência, jitter e vazão associadas à dinâmica de *handovers* e à variação da geometria do enlace ao longo da trajetória da aeronave [Borgianni et al. 2026]. De forma complementar, Campos *et al.* caracterizam o uso

de enlaces LEO como *backhaul* em eventos temporários, combinando medições controladas e monitoramento *in loco* sob carga realista [Campos et al. 2025]. Embora esses estudos forneçam evidências importantes sobre o desempenho de redes LEO em cenários reais, suas análises permanecem centradas em métricas agregadas e não exploram o comportamento detalhado do tráfego em nível de fluxo sob condições de alta densidade de usuários.

Paralelamente, estudos recentes têm investigado o impacto das redes LEO em aplicações altamente sensíveis a atraso. Borgianni *et al.* analisam o desempenho da Starlink em cenários de *Networked Music Performance*, demonstrando que, embora a tecnologia possa suportar aplicações interativas sob configurações específicas, a variabilidade de latência e jitter impõe desafios significativos à QoE, exigindo estratégias adaptativas e modelos híbridos de avaliação subjetiva e objetiva [Borgianni et al. 2025]. De forma complementar, Mohan *et al.* conduzem uma análise multifacetada do desempenho da Starlink, incluindo a avaliação de aplicações em tempo real como videoconferência e *cloud gaming*, evidenciando que, embora o sistema seja capaz de suportar tais aplicações sob condições favoráveis, eventos periódicos de reconfiguração da rede introduzem variações de latência e vazão em escala subsegundo, impactando diretamente a estabilidade da experiência do usuário [Mohan et al. 2024]. Esses resultados reforçam que métricas tradicionais de QoS são insuficientes para capturar plenamente a experiência do usuário em aplicações sensíveis ao tempo, especialmente em redes caracterizadas por variabilidade dinâmica do enlace, permanecendo ainda pouco compreendido como esses efeitos se manifestam em cenários multiusuário densos com competição intensa por recursos.

Diferentemente desses trabalhos, que abordam aspectos isolados como segurança, modelagem, medições empíricas ou aplicações específicas, este estudo apresenta uma avaliação empírica em nível de fluxo, conduzida em ambiente real, de uma rede LEO operando como único enlace de *backhaul* em um evento estacionário de alta densidade. Ao isolar o enlace satelital como gargalo do sistema e correlacionar o comportamento do tráfego com a dinâmica do enlace, a análise fornece evidências práticas de como eventos de *handover* e a variabilidade do enlace físico impactam o desempenho sob condições de uso intensivo, contribuindo para uma melhor compreensão da relação entre métricas de QoS, dinâmica dos fluxos e QoE em ambientes multiusuário densos.

## 6. Conclusão

Este artigo apresentou uma avaliação empírica, conduzida em ambiente real, do uso da Starlink como enlace principal de *backhaul* durante um evento científico com dezenas de usuários simultâneos. A partir de uma análise correlacionada entre métricas de tráfego em nível de fluxo, indicadores de qualidade do enlace satelital e métricas de utilização do roteador de borda, foi possível caracterizar o comportamento de uma rede LEO sob carga agregada elevada em condições operacionais realistas. Os resultados mostram que a conectividade LEO sustenta picos de vazão agregada superiores a 200 Mb/s, mantendo latência média estável na faixa de 30–50 ms em um cenário estacionário de alta densidade. Entretanto, a análise em nível de fluxo evidencia que métricas agregadas de QoS não refletem plenamente os efeitos da variabilidade temporal do enlace sobre a experiência percebida. Eventos de *handover*, instabilidades do canal e obstruções locais introduzem flutuações de curta duração que reduzem a persistência dos fluxos, aumentam o *jitter* e favorecem conexões mais transitórias, mesmo quando a perda de pacotes permanece baixa. Esses achados indicam que a latência e sua variabilidade exercem papel mais relevante na degradação da QoE do que a perda de pacotes, especialmente para aplicações sensíveis à continuidade do fluxo, como *streaming* e serviços interativos em tempo real. Como trabalhos futuros, pretende-se incorporar métricas de QoE em nível de aplicação e investigar estratégias de mitigação voltadas à redução dos efeitos da variabilidade induzida

por *handovers* em cenários densos, incluindo mecanismos adaptativos de controle de tráfego e suporte à tomada de decisão operacional.

## Referências

- Bonora, A., Traspadini, A., Giordani, M., and Zorzi, M. (2025). Performance evaluation of satellite-based data offloading on starlink constellations. In *2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6. IEEE.
- Borgianni, L., Adami, D., Bosi, M., Giordano, S., and Chafe, C. (2025). A comprehensive evaluation of networked music performance using leo satellite internet: The starlink use case. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 22(5):3947–3963.
- Borgianni, L., Adami, D., and Giordano, S. (2026). Evaluating leo satellite internet in aeronautical mobility: a study of starlink from hawaii to japan. In *2026 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pages 297–301. IEEE.
- Campos, G., Alves, I., Moraes, I., Oliveira, N., and Mattos, D. (2025). Caracterização e avaliação da viabilidade de enlaces satelitais de Órbita baixa terrestre para provisão de internet em eventos temporários. In *Anais do XXIV Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*, pages 37–48, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Feng, H. and Zhu, L. (2025). Handover scheme in leo satellite networks based on qoe for streaming media services. *Sensors*, 25(7).
- Hu, B., Zhang, X., Zhang, Q., Varyani, N., Mao, Z. M., Qian, F., and Zhang, Z.-L. (2023). Leo satellite vs. cellular networks: Exploring the potential for synergistic integration. In *Companion of the 19th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies*, CoNEXT 2023, page 45–51, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Jiang, W., Jiang, H., Xie, Y., Wu, J., He, X., Li, H., and Zhou, P. (2024). Satshield: In-network mitigation of link flooding attacks for leo constellation networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(16):27340–27355.
- Kassem, M. M., Raman, A., Perino, D., and Sastry, N. (2022). A browser-side view of Starlink connectivity. In *Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference*, IMC '22, page 151–158, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Laniewski, D., Lanfer, E., and Aschenbruck, N. (2025). Measuring mobile starlink performance: A comprehensive look. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 6:1266–1283.
- Liu, B., Zhang, Q., Yang, Q., Jiao, J., Chauhan, J., and Kanoulas, D. (2025). The starlink robot: A platform and dataset for mobile satellite communication.
- Lundgren, R. A., Barbosa, G. N. N., De Souza Filho, R. A., Chatack, L. V., De Oliveira, N. R., and Mattos, D. M. F. (2025). A performance analysis and characterization of the mobile connection via low earth orbit satellite access network. In *2025 13th Wireless Days Conference (WD)*, pages 1–9.
- Mohan, N., Ferguson, A. E., Cech, H., Bose, R., Renatin, P. R., Marina, M. K., and Ott, J. (2024). A multifaceted look at starlink performance. In *Proceedings of the ACM Web Conference 2024*, WWW '24, page 2723–2734. Association for Computing Machinery.
- Noorani, M., Zoukarni, A., and Baras, J. S. (2022). Qoe evaluation of integrated satellite-terrestrial network on a real-world testbed. In *2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*, pages 573–577.

- Pachler, N., del Portillo, I., Crawley, E. F., and Cameron, B. G. (2021). An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband. In *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages 1–7.
- Wan, M., Fang, J., Guo, C., Geng, L., Liu, Y., Ma, W., Xu, C., and Su, M. (2025). A federated learning-based intrusion detection system for satellite-terrestrial integrated networks. In *ICASSP 2025 - 2025 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 1–5.
- Wang, Y., Han, S., Benslimane, A., and Li, C. (2026). Analysis of physical connectivity and cross-layer service matching in user-service-oriented istn. *IEEE Internet of Things Journal*, 13(1):695–708.
- Zhao, H., Fang, H., Wang, F., and Liu, J. (2023). Realtime multimedia services over starlink: A reality check. In *Proceedings of the 33rd Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video, NOSSDAV '23*, page 43–49, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Zhao, J. and Pan, J. (2024). Low-latency live video streaming over a low-earth-orbit satellite network with dash. In *Proceedings of the 15th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys '24*, page 109–120, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Zhao, J., Perrin, O., Ahangarpour, A., and Pan, J. (2025). Measuring the oneweb satellite network. In *2025 9th Network Traffic Measurement and Analysis Conference (TMA)*, pages 1–10.