

Avaliação de Desempenho para Sistemas Satélites do 3GPP NTN usando o ns-3

Jorge Ivan A. de Oliveira Filho ^[1], Humberto Dionísio de Andrade ^[2], Vicente A. de Sousa Jr ^[3], Daniel Rodrigues de Luna ^[4]

^[1] UFRSA; jorge.filho25463@alunos.ufersa.edu.br

^[2] UFRSA; humbertodionisio@ufersa.edu.br

^[3] UFRN; vicente.sousa@ufrn.br

^[4] UFRN; daniel.luna.088@ufrn.edu.br

Resumo

Garantir a transmissão confiável em redes não-terrestres (NTNs) é um desafio crucial nas comunicações via satélite, especialmente com as modificações do 5G a partir do seu *Release 17*. As comunicações via satélite abrem novas oportunidades de pesquisa e aplicações, conectando áreas remotas, complementando redes terrestres e melhorando a eficiência do tráfego em áreas congestionadas. Este estudo emprega o modelo de canal 3GPP destinado às NTNs com o objetivo de caracterizar a atenuação do sinal no ambiente espacial. Como ferramenta de prototipagem, é utilizado o simulador ns-3, que foi ampliado com novos módulos com a finalidade de simular cintilação e atenuação do sinal por gases atmosféricos, juntamente com um modelo de mobilidade que considera o sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas aplicável aos veículos espaciais. A fim de avaliar o desempenho do sistema, são realizadas simulações, com o propósito de coletar dados como SNR e perda por caminho. Essas simulações fornecem informações para futuros desenvolvimentos, examinando as relações entre as variáveis do modelo de canal e o desempenho das NTNs, e destacam a importância de modelos precisos no contexto das futuras padronizações do 6G, fundamentais à comunicação em ambientes dinâmicos e remotos.

Palavras-chave: Redes não-terrestres, ns-3, Comunicações via satélite, 5G e 6G.

Abstract

Ensuring reliable transmission in non-terrestrial networks (NTNs) is a crucial challenge in satellite communications, especially with the modifications to 5G from its *Release 17*. Satellite communications open up new opportunities for research and applications, connecting remote areas, complementing terrestrial networks and improving traffic efficiency in congested areas. This study uses the 3GPP channel model for NTNs to characterize signal attenuation in the space environment. As a prototyping tool, the ns-3 simulator is used, which has been extended with new modules in order to simulate scintillation and signal attenuation by atmospheric gases, together with a mobility model that considers the geocentric Cartesian coordinate system applicable to space vehicles. In order to evaluate the system's performance, simulations are carried out to collect data such as SNR and path loss. These simulations provide information for future developments by examining the relationships between channel model variables and NTN performance, and highlight the importance of accurate models in the context of future 6G standardizations, which are fundamental to communication in dynamic and remote environments.

Key-words: Non-terrestrial networks, ns-3, Satellite communications, 5G and 6G.

1. INTRODUÇÃO

A evolução das comunicações móveis, desde a primeira geração (1G) até as atuais redes 5G, revolucionou a comunicação global e trouxe consigo uma série de inovações tecnológicas. No entanto, conforme a cobertura terrestre se expandiu, também surgiram desafios para conectar áreas remotas e garantir a continuidade dos serviços em situações de emergência. Atualmente, as Redes Não-Terrestres (NTNs) surgiram como uma alternativa promissora, pela sua capacidade de suprir lacunas de conectividade em áreas isoladas, além de serem fundamentais em situações de desastre e emergência. Além disso, considerando os esforços de padronização da 6ª geração de redes móveis (6G), espera-se que as NTNs desempenhem um papel ainda mais central na sua integração com as redes terrestres [1].

O 3rd Generation Partnership Project (3GPP), reconhecendo o potencial das NTNs, incluiu a investigação de sistemas não-terrestres no padrão New Radio (NR) a partir da *Release 15* [2], e o seu suporte oficial a partir do *Release 17* [3]. Dentre as tecnologias NTN, este trabalho se concentra em sistemas de comunicação via satélite, explorando suas particularidades do modelo de canal..

As NTN's abrangem uma variedade de tecnologias, incluindo redes de comunicação via satélite, sistemas de plataforma de alta altitude (HAPS) e sistemas aéreos não tripulados. Cada uma dessas tecnologias oferece uma maneira diferente de melhorar a conectividade em locais remotos ou de difícil acesso. Os satélites, por exemplo, podem fornecer cobertura global a um custo relativamente baixo, enquanto os HAPS podem oferecer conectividade de alta capacidade em áreas específicas com baixa latência. Os sistemas aéreos não tripulados, por sua vez, podem ser utilizados para fornecer cobertura temporária em áreas afetadas por desastres naturais ou outros eventos que interrompam a infraestrutura terrestre.

Este trabalho realiza uma avaliação do desempenho de sistemas NTN utilizando o simulador ns-3, com o objetivo de modelar e analisar o comportamento da comunicação via satélite no contexto das padronizações do 3GPP. Ao abordar esses aspectos, espera-se fornecer *insights* valiosos para o desenvolvimento de redes mais resilientes e eficientes.

2. VISÃO GERAL SOBRE REDES NTN

Dispositivos não terrestres foram vistos por muitos anos como ferramentas para serviços como entrega, meteorologia, vigilância, transmissão de TV e navegação. No entanto, novos avanços na tecnologia permitiram a integração de tecnologias terrestres e não terrestres, o que permitiu casos de uso mais complexos.

A expectativa é que as redes não terrestres (NTNs) sejam um componente essencial dos sistemas 5G e 6G, pois podem fornecer conectividade em áreas remotas, melhorar a resiliência da rede em caso de desastre e reduzir o congestionamento em horários de pico [4]. As NTN's prometem expandir a conectividade global e construir um futuro mais conectado e inclusivo já que possuem a capacidade de superar as limitações da cobertura terrestre.

2.1. Casos de uso NTN

2.1.1. Continuidade de serviço

Redes não terrestres podem ser utilizadas para complementar as estações terrestres, oferecendo uma cobertura sem fio robusta em regiões de com alta demanda ou com infraestruturas terrestres congestionadas. Em situações de indisponibilidade de serviço, como em zonas rurais, zonas marítimas ou após desastres naturais, esses componentes não terrestres garantem a conectividade por meio de uma rota alternativa. Assim, em casos de emergência ou desastres, em que a infraestrutura terrestre pode ser insuficiente ou está danificada, as redes não terrestres asseguram a continuidade das comunicações, garantindo a conexão entre os serviços de emergência.

2.1.2. IoT

O 5G, além de conectar usuários, visa atender às necessidades de sensores, equipamentos e veículos autônomos, especialmente em áreas com infraestrutura de comunicação limitada [5]. As NTN's permitem levar conectividade a regiões com pouca ou nenhuma presença humana, viabilizando a coleta de dados em locais de difícil acesso. Além disso, graças à sua extensa cobertura e capacidade de transmissão, plataformas aéreas e espaciais têm a capacidade de disponibilizar conteúdos multimídia para um grande número de usuários, incluindo terminais em movimento, como aviões e navios, e funcionar como agregadores móveis de tráfego *IoT* (Internet das coisas), garantindo a continuidade dos serviços para aplicações que dependem de sensores [6].

2.1.3. Sobreposição de satélite global

Conforme a distância entre duas infraestruturas terrestres ou nós se amplia, a quantidade de dispositivos de rede que estão envolvidos na comunicação entre as duas entidades pode se tornar economicamente inviável. Em tais circunstâncias, um conjunto de satélites, pode ser empregado para estabelecer uma rede de malha espacial sobreposta. Esta rede proporciona acesso de alta capacidade para aparelhos terrestres ao retransmitir os sinais do usuário por meio de satélites. Isso diminui a carga nas redes terrestres e conduz as informações de maneira eficaz através de uma rota exclusiva de satélite até o nó de destino [7].

2.2. Plataformas

Plataformas NTN empregam tecnologias espaciais ou aéreas, como satélites e aeronaves, para prover conectividade sem fio, expandindo o alcance das redes de comunicação para além das limitações da infraestrutura terrestre. A Figura 1 ilustra os principais tipos de plataformas NTN.

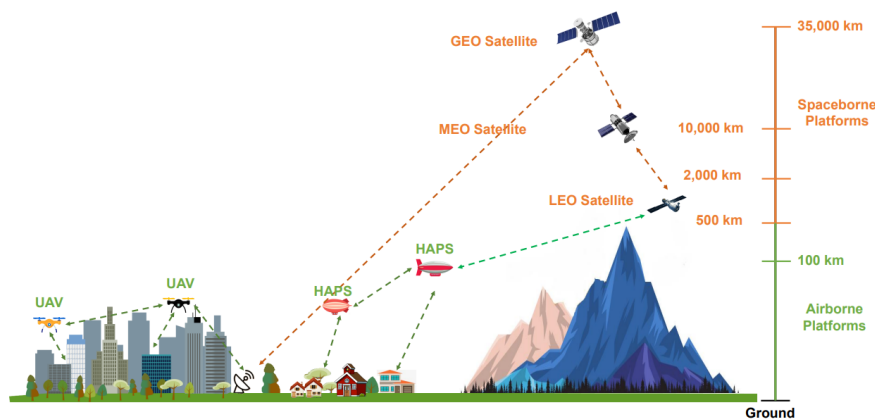


Figura 1: Plataformas NTN. Fonte: adaptado de [6].

A escolha da órbita de um satélite é fundamental para estabelecer os serviços que ele oferecerá. Fatores como a área de cobertura terrestre, a distância do solo, a velocidade orbital e o ângulo de elevação são cruciais para a utilização de telecomunicações [7]. Órbitas mais distantes, por exemplo, aumentam o tempo de comunicação e exigem maior potência de sinal, enquanto órbitas mais baixas aumentam a velocidade orbital, afetando tanto a área de cobertura quanto a necessidade de rastreamento do satélite.

Os seguintes tipos de orbitas são considerados pelo 3GPP em [28]:

- GEO: Posicionados a cerca de 35.786 km da Terra, oferecem cobertura extensa, com áreas de cobertura que variam de 200 a 3.500 km [8]. Sua baixa velocidade mitiga os efeitos de Doppler, mas sua grande distância implica em atrasos de propagação significativos e alta atenuação do sinal. Apesar das desvantagens para aplicações que exigem baixa latência, os satélites GEO são amplamente utilizados para serviços como monitoramento climático, transmissão de TV e comunicação de baixa velocidade [6].
- MEO: Orbitam entre 2.000 e 35.786 km. Podem ser usados para sistemas de sensoriamento, posicionamento e comunicação devido ao seu baixo atraso de propagação em comparação com os satélites GEO.
- LEO: Posicionados em altitudes entre 200 e 2000 km da terra, apresentam órbitas terrestre rápidas, com cerca de 90 minutos. Sua maior proximidade exige um maior número de satélites para cobertura.

2.2.1. Veículos aéreos

Veículos aéreos, como UAVs (Veículos Aéreos Não Tripulados, e.g, drones) e HAPs (Plataformas de Alta Altitude, e.g, balões e aeronaves), são essenciais para NTN, segundo o 3GPP, mas não seguem órbitas precisas. UAVs, que voam a baixas altitudes, a partir de algumas centenas de metros, são flexíveis e podem fornecer conectividade durante desastres e eventos temporários, mas enfrentam restrições de energia devido ao alto consumo de propulsão. HAPs operam entre 20 e 50 km de altitude, cobrindo até 200 km, e são usados em áreas com infraestrutura sobrecarregada [9].

2.3. Desafios

As NTN introduzem um novo conjunto de desafios técnicos inéditos, que precisam ser superados para viabilizar uma conectividade global e integrada às redes celulares terrestres. A natureza das comunicações NTN é caracterizada por grandes distâncias, ruídos e transições, impondo a necessidade de superar desafios vinculados a atrasos de comunicação e interferência. A identificação e a classificação precisas desses problemas são cruciais para o avanço de pesquisa e desenvolvimento de soluções eficazes para a implantação desse tipo de rede.

2.3.1. Efeito doppler

As altas velocidades das plataformas de NTN, especialmente os satélites LEO, introduzem efeitos Doppler significativos, causando mudanças na frequência do sinal muito superiores às experimentadas em

redes terrestres tradicionais. Essas mudanças podem chegar a dezenas de kHz [10], o que representa um desafio para dispositivos e sistemas de comunicação existentes. As estratégias convencionais de compensação, como o espaçamento entre subportadoras, podem não ser eficazes para mitigar esses impactos. Além disso, o deslocamento Doppler, aliado a altos atrasos de propagação, complica a modulação adaptativa e os esquemas de codificação, exigindo margens maiores para levar em conta os sinais de controle desatualizados.

2.3.2. Coexistência

A expansão das NTN para as bandas na faixa das ondas milimétricas, já utilizadas por serviços como a previsão do tempo, levanta preocupações quanto à interferência em redes terrestres. Visando complementar, e não substituir, tais redes, as NTN exigem o desenvolvimento de técnicas eficientes de compartilhamento de espectro, especialmente em áreas que operem no limite de níveis de ruído aceitáveis.

2.4. Atraso de propagação

As grandes distâncias envolvidas nas NTN introduzem consigo altas latências, chegando a centenas de milissegundos para satélites GEO [11], ao contrário dos atrasos de microssegundos comuns em redes terrestres. Isso afeta protocolos amplamente utilizados, como o TCP, que enfrentam dificuldades com tempos de ida e volta (RTT) tão altos. A alta latência também impacta outros aspectos das NTN, como a limitação do uso de técnicas como o TDD, podendo prejudicar a experiência do usuário em aplicativos como chamadas de vídeo e jogos online. Ademais, as vastas áreas de cobertura das plataformas NTN acarretam diferentes atrasos de propagação e perdas de sinal para diferentes localizações, dificultando a garantia de uma comunicação consistente para todos os usuários, bem como o gerenciamento do acesso inicial e da sincronização.

2.4.1. *Hybrid automatic repeat request (HARQ)*

Os longos *RTT* inerentes às NTN, que podem ser de 15 a 63 vezes maiores do que nas redes terrestres, mesmo em constelações LEO [2], representam obstáculos consideráveis para as operações de Automatic Repeat Request (ARQ). Essas operações, que dependem de tempo, são prejudicadas por RTTs que frequentemente excedem os temporizadores convencionais máximos do HARQ e o número máximo de processos de HARQ suportados nos sistemas 5G NR. Simplesmente estender os temporizadores ou aumentar o número de processos não é uma solução viável devido às limitações de memória nos equipamentos de usuário (UE) [1].

2.5. Atividades do 3GPP sobre NTN

As atividades dentro dos grupos de especificação técnica 3GPP sobre NTN iniciaram em 2017 na *Release* 15 e ainda estão em andamento. Os seguintes recursos e itens de estudo sobre NTN investigados pelo 3GPP documentado no 3GPP TR 38.811 [2] da versão 15 à versão 17 são apresentados a seguir:

2.5.1. *Release* 15

Foi a primeira versão a realizar um estudo sobre a NR para dar suporte a redes não terrestres. Tinha como objetivo principal selecionar alguns cenários de implantação de referência da NTN e chegar a um acordo sobre parâmetros-chave, como arquitetura, altitude orbital, bandas de frequência, etc. Entre principais cenários e modelos pode-se citar:

- Cenários de implantação: Urbano, suburbano, rural;
- Dependência do ângulo de elevação: Impacto significativo nos parâmetros de grande escala (probabilidade de linha visada (LOS));
- Duas faixas de frequência: banda S e banda Ka;
- Dois tipos de terminais NTN: VSAT e *Handheld*;
- Área de cobertura e ângulos mínimos de elevação para implantações GEO, LEO e HAPS;

2.5.2. Release 16

O estudo se concentrou em aspectos como arquitetura, protocolos e considerações sobre a camada física. Dentre esses itens, pode-se citar:

- Ajustes de protocolo de camada superior: Necessidade de aprimoramentos de MAC necessários para acesso aleatório, DRX, solicitações de agendamento e HARQ;
- Avaliações da camada física: Testes extensivos realizados em banda S e banda Ka, chegando a conclusão que o equipamento de *handheld* pode ser atendido por LEO e GEO na banda S;

2.5.3. Release 17

Teve como foco satélites LEO e GEO, HAPS e veículos aéreos. O estudo abrange aspectos da camada física, protocolos, arquitetura, gerenciamento de recursos de rádio, requisitos de RF e bandas de frequência. Foi a partir desse *Release* que o 3GPP estabelece oficialmente as redes NTN como característica padronizada para redes 5G, figurando a grande novidade pós-5G da família de sistemas do 3GPP.

2.6. Mercado

O mercado das NTN está se expandindo rapidamente e inclui um grande gama de empresas atuando em todos os segmentos, desde provedores de serviços de conectividade de banda larga em redes privadas até soluções de expansão de dados em banda estreita para aplicações de *IoT* e comunicações de emergência (SOS). Cada uma dessas categorias enfrenta desafios técnicos, operacionais e regulatórios que vêm moldando o ecossistema de NTN. Esses desafios incluem: (i) a complexidade para lançar e manter satélites em órbita, (ii) elevados custos de infraestrutura e (iii) problemas de licenciamento e regulamentação, os quais são diferentes de país para país [12].

Empresas como Starlink (propriedade da SpaceX) e OneWeb se destacam nesta indústria utilizando satélites de baixa órbita terrestre (LEO) para fornecer internet de alta velocidade e, especialmente, em localidades remotas e de difícil acesso. A Tabela 1 apresenta um pequeno apanhado dos principais participantes globais no mercado de NTN, além de suas faixas de operação e a quantidade de satélites já lançados.

Tabela 1: Empresas de NTN e suas características. Fonte: adaptado de [12] e [13].

Empresa	Faixa de operação	Satélites em operação
SpaceX (Starlink)	Ku band	4000+ LEO
One Web	Ku band	648 LEO
Telesat	C-, Ku- e Ka-band	192 LEO e 14 GEO
Viasat	Ka-, L-, S-band	9

2.7. Conjunto de bandas

Embora o conjunto de bandas de frequências definido nas especificações do 3GPP considere o espectro de 0,5 a 100 GHz como apresentado nas Tabelas 2 e 3, duas bandas principais são de interesse para o sistema NTN. A primeira é a banda S, centrada em torno de 2 GHz, com canais de 20 MHz de largura, um para *downlink* (DL) e outro para *uplink* (UL). A segunda é a banda Ka, que opera em frequências mais altas, tipicamente entre 29,5 e 30 GHz e com canais de até 800 MHz.

Tabela 2: Frequências e larguras de banda NTN para *Downlink*. Fonte: adaptado de [12].

Downlink		
Banda	Faixa de frequência	Bandwidth
L band	1,525 MHz - 1,559 MHz	34 MHz
S band	2,170 MHz - 2,200 MHz	30 MHz
KU band	10.7 GHz - 12.7 GHz	2 GHz
KA band	17.3 GHz - 20.3 GHz	3 GHz
E band	71.0 GHz - 76.0 GHz	5 GHz

Tabela 3: Frequências e larguras de banda NTN para *Uplink*. Fonte: adaptado de [12].

Uplink		
Banda	Faixa de frequência	Bandwidth
L band	1,626.5 MHz - 1660,5 MHz	34 MHz
S band	1,980 MHz - 2010 MHz	30 MHz
KU band	12.75 GHz - 13,25 GHz, 13,75 GHz - 14,5 GHz	500 + 750 MHz
KA band	27.0 GHz - 30,0 GHz	3 GHz
E band	81.0 GHz - 86,0 GHz	5 GHz

Estas tabelas fornecem uma visão geral das frequências usadas em comunicações via satélite. No entanto, para aplicativos sem fio comerciais padronizados, o 3GPP designou especificamente as bandas de frequência presentes na Tabela 4 para garantir a interoperabilidade e o uso eficiente do espectro.

Tabela 4: Bandas propostas pelo 3GPP para NTN. Fonte: adaptado de [3].

Banda	Faixa de frequência (Uplink/Downlink)
n255	1626,5 MHz - 1660,5 MHz / 1,525 MHz - 1,559 MHz
n256	1980 MHz - 2010 MHz / 2,170 MHz - 2,200 MHz
n510	17,7 GHz - 20,2 GHz / 27,5 GHz - 30 GHz
n511	17,7 GHz - 20,2 GHz / 28,35 GHz - 30 GHz
n512	17,7 GHz - 20,2 GHz / 27,5 GHz - 30 GHz

3. MODELO DE CANAL PARA REDES NTN

3.1. Cenários

O modelo de canal NTN oferece a opção de executar simulações em quatro cenários, representando diferentes ambientes de propagação [14]:

- *Dense Urban*: Ambiente extremamente denso, com edifícios altos atuando como bloqueadores.
- *Urbano*: Ambiente de cidade, com edifícios.
- *Suburbano*: Cidade pequena, com edifícios de até dois andares.
- *Rural*: Ambiente de campo aberto, com poucos ou nenhum edifício.

O 3GPP define propagação em linha de visada (LOS) e fora da linha de visada (NLOS), com probabilidade dependente do cenário e do ângulo de elevação representado por α . O termo LOS refere-se à situação em que há um caminho direto e unobstruído entre o terminal terrestre e a plataforma NTN, permitindo uma propagação do sinal com menor atenuação. Já o termo NLOS descreve a condição em que o sinal encontra obstáculos, como prédios, árvores ou colinas, que podem causar bloqueio, reflexões ou difrações. O ângulo de elevação α é definido como o ângulo entre o plano do horizonte do terminal terrestre e o vetor que aponta para a plataforma NTN, como representado na Figura 2.

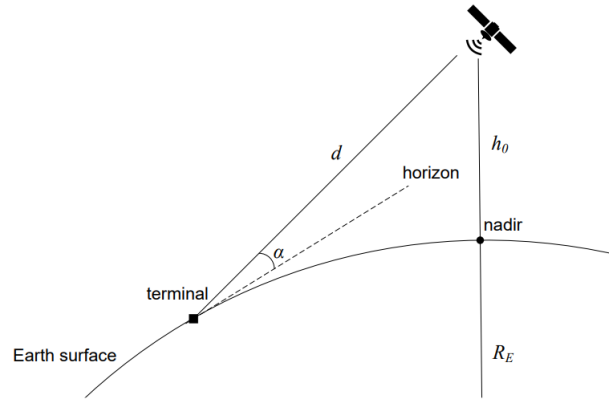


Figura 2: Representação do ângulo de elevação (α). Fonte: adaptado de [2].

3.2. Perda de percurso

A perda de percurso (PL) em um enlace de comunicação sem fio representa a redução na potência do sinal durante sua propagação do transmissor até o receptor. No sistemas de comunicação via satélite, essa perda é influenciada por diversos fatores, modelados pela seguinte equação:

$$PL = PL_b + PL_g + PL_s + PL_e, \quad (1)$$

em que:

- PL é a perda total de percurso em dB;
- PL_b é a perda básica de percurso em dB;
- PL_g é a atenuação devido aos gases atmosféricos em dB;
- PL_s é a atenuação devido à cintilação ionosférica ou troposférica em dB;
- PL_e é a perda de entrada (penetração) no edifício em dB.

A perda básica de percurso pode ser escrita da seguinte maneira:

$$PL_b = FSPL(d, f_c) + SF + CL(\alpha, f_c) \quad (2)$$

Na Equação 2, $FSPL(d, f_c)$ representa a perda de percurso em espaço livre, que depende da distância (d) e da frequência da portadora (f_c). E pode ser calculado da seguinte maneira:

$$FSPL(d, f_c) = 32,45 + 20 \log_{10}(f_c) + 20 \log_{10}(d) \quad (3)$$

Já SF representa o sombreamento (*shadowing fading*), uma atenuação aleatória resultante da interação da onda com objetos grande comparados ao seu comprimento de onda. Ela é modelada como uma variável aleatória lognormal com média zero e variância σ_{SF}^2 , ou seja, $SF \sim N(0, \sigma_{SF}^2)$. Para calcular σ_{SF}^2 , é necessário conhecer: o cenário, a faixa de frequência, as condições de linha de visão (LOS) e o ângulo de elevação. Com esses parâmetros, é possível encontrar a entrada correta em tabelas (6.6.2-1 a 6.6.2-3) fornecida na *Release 15* [2]. A variável $CL(\alpha, f_c)$ é a perda por acoplamento, que modela a atenuação da potência do sinal causada por prédios e objetos presentes no solo. Seu cálculo é análogo ao do σ_{SF}^2 , sendo necessário os mesmos parâmetros para a obtenção do seu valor.

3.3. Absorção atmosférica

A atenuação causada pela absorção dos gases atmosféricos depende da frequência do sinal, ângulo de elevação da antena, altitude e umidade do ar. Embora esse efeito seja geralmente desprezível em frequências abaixo de 10 GHz, ele se torna crucial em canais NTN que operam em altas frequências, impactando significativamente o desempenho da comunicação.

O modelo ITU-R P.676 [15] oferece uma caracterização completa da atenuação atmosférica, mas depende de parâmetros como umidade absoluta, pressão do ar seco e densidade do vapor d'água, que podem ser

difíceis de obter em simulações. Desta forma, o 3GPP oferece um modelo mais simples, que considera as UEs a uma altura geométrica de 0 km (nível do mar), pressão do ar seco, densidade de vapor d'água, pressão parcial de vapor d'água e temperatura com base na atmosfera de referência global média anual da ITU, e com um ângulo de elevação fixo em 90°. Para ângulos diferentes de 90°, a perda adicional por absorção atmosférica é dada por:

$$PL_A(\alpha, f)_{dB} = \frac{A_{zenith}(f_c)}{\sin(\alpha)} \quad (4)$$

em que α é o ângulo de elevação e $A_{zenith}(f_c)$ é a atenuação de zenith.

3.4. Cintilação

A cintilação pode ser entendida como flutuações rápidas na amplitude e fase do sinal recebido. Tal fenômeno está entre as interrupções mais severas ao longo de um caminho de propagação transionosférico para sinais abaixo de 3 GHz, podendo ocasionalmente ser observado em frequências de até 10 GHz. As cintilações estão relacionadas às variáveis como localização, hora do dia, estação do ano e atividade solar e geomagnética. Para simplificação das simulações em nível de sistema o 3GPP recomenda um modelo simplificado para cintilação, que é estruturado em dois componentes:

- Cintilação Ionosférica: Ocorre de forma mais pronunciada em baixas latitudes e frequências abaixo de 6 GHz. Raramente causa problemas em latitudes médias (20° a 60°). O modelo do 3GPP para este tipo de cintilação baseia-se em dados coletados em Hong Kong a uma frequência de 4 GHz.
- Cintilação Troposférica: Intensifica-se com o aumento da frequência, tornando-se significativa acima de 10 GHz. O modelo do 3GPP para cintilação troposférica utiliza dados de atenuação observados em Toulouse e considera a frequência do sinal e o ângulo de elevação como fatores determinantes.

3.5. Sistema de coordenadas

Um sistema de coordenadas globais tridimensional é considerado, descrito como *Earth Centred Earth Fixed* (ECEF), no qual a terra é aproximada como uma esfera perfeita com um raio de 6371 km. A origem das coordenadas, O , está localizada no centro da Terra. O plano x-y se encontra no plano equatorial, com o eixo x apontando para 0 graus de longitude, o eixo y apontando para 90 graus de longitude, e o eixo z apontando para o polo norte geográfico a partir da origem O .

A posição de um UE ou de um satélite é descrita por um conjunto de três parâmetros (x, y, z), sendo:

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = 6371 \text{ km, para todos os UEs} \quad (5)$$

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} > 6371 \text{ km, para todos os satélites.} \quad (6)$$

4. PROTOTIPAGEM DA REDE NTN COM O SIMULADOR NS-3

A implementação real de sistemas de telecomunicações é frequentemente inviável do ponto de vista financeiro para muitos grupos de pesquisa, enquanto análises puramente matemáticas podem não capturar toda a complexidade inerente a esses sistemas. Assim, simuladores, como o ns-3, surgem como uma ferramenta valiosa, pois oferece uma opção para prototipar sistemas de telecomunicações e testar soluções de forma precisa e com baixo custo.

Grande parte dos simuladores para NTN, como o 5G K-Simulator [16], é proprietária ou exige licenças comerciais, enquanto alguns de código aberto, como o 5G-air-simulator [17], reduzem a precisão para simplificar a complexidade computacional. O ns-3 é um simulador de rede de eventos discretos, voltado para pesquisa e educação em sistemas de comunicações. É um software gratuito e de código aberto (licenciado sob a GNU GPLv2). Tem uma comunidade global muito ativa que discute melhorias e compartilha material tutorial para disseminar e potencializar o uso do simulador.

A versão 3.42 do ns-3 introduziu avanços significativos, incorporando o modelo de canal 3GPP 38.311 [14] para redes não terrestres, desenvolvido inicialmente por pesquisadores na Universidade de Pádua [18]. O código inclui um modelo de antena de abertura circular e um modelo de mobilidade com suporte a posições geocêntricas, bem como a conversão para sistemas de coordenadas topocêntricas, aprimorando a precisão da simulação de cenários NTN.

No entanto, é crucial destacar as atuais limitações do simulador: ainda não é possível realizar simulações fim-a-fim, e sim apenas simulações a nível de enlace de rádio. Essa limitação impede a avaliação completa do desempenho de sistemas NTN, incluindo a interação entre diferentes camadas e a influência de fatores como protocolos de rede e aplicações.

Outros trabalhos que exploram as NTNs utilizando o ns-3 incluem os seguintes assuntos: implementação do modelo de canal NTN no ns-3 [19] (artigo que apresenta o modelo de canal NTN do ns-3) e investigação sobre protocolos de agendamento para redes não terrestres [20].

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa seção apresenta os resultados de uma série de simulações realizadas ao utilizar o canal NTN do ns-3. Inicialmente, são descritos os parâmetros utilizados e os cenários de simulação. Os resultados obtidos são então apresentados e discutidos, buscando identificar os fatores que influenciaram cada resultado.

5.1. Parâmetros de simulação

Conforme a órbita e a altitude, o 3GPP sugere variados conjuntos de parâmetros relacionados à antena do satélite, que servem como referência para as simulações [3]. A potência transmitida, antes de ser amplificada pela antena, pode ser calculada da seguinte maneira:

$$TxPower [dBm] = EIRP_{density} \left[\frac{dBW}{MHz} \right] + 10 \log_{10} (Bandwidth [MHz]) - AntennaGain_{max} [dB] - 30 \quad (7)$$

Em relação a seleção da antena para o UE, essa é determinada pela banda de frequência em uso, com frequências na banda Ka exigindo antenas VSAT e na Banda S antenas *Handheld*.

A escolha da frequência da portadora foi fundamentada no plano de distribuição de frequências para telecomunicações [21] e nas bandas propostas pelo 3GPP apresentadas na Tabela 4, visando simular um cenário potencialmente aplicável ao contexto brasileiro. A largura de banda do canal e o tamanho do bloco de recursos (*Resource Block* ou RB) utilizados são definidos de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5: Largura de banda e RB para cada banda de frequência.

Banda de Frequência	Largura de Banda	Tamanho do RB
Banda S	30 MHz	60 kHz
Banda Ka	400 MHz	240 kHz

Entre as métricas analisadas durante as simulações, uma das mais relevantes foi a SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). A SNR é uma medida que quantifica a qualidade de um sinal em relação ao ruído presente em um sistema de comunicação. Uma alta SNR indica melhor desempenho da rede, com menores chances de erro de transmissão e maior confiabilidade na comunicação, enquanto um valor baixo indica que o ruído está afetando significativamente o sinal, o que pode resultar em falhas de comunicação (erros no processo de recepção).

5.2. Altitude

Analisou-se o efeito da variação de altitude do satélite para cada banda de frequência utilizada nos quatro cenários definidos (*Dense Urban*, *Urban*, *Suburban*, *Rural*) na Seção 3.1. O experimento foi conduzido para as duas bandas de frequência de interesse, tanto em DL quanto em UL. O intervalo de altitudes varia de 200 km a 2100 km, com incrementos de 100 km, mantendo as mesmas potências e características das antenas transmissoras e receptoras em cada altitude. Os resultados apresentados são a média de 100 simulações realizadas. As frequências das portadoras utilizadas em cada simulação estão listadas na Tabela 6.

Tabela 6: Frequências utilizadas nas simulações.

	Uplink	Downlink
Banda S	2,2 GHz	2 GHz
Banda Ka	20 GHz	28 GHz

As Figuras 3 a 6 mostram os resultados obtidos. A banda que utiliza frequências mais altas, ou seja, a banda Ka, é a que apresenta os maiores valores de perda de percurso e menor SNR, como era esperado. O modelo de canal implementado no ns-3 também mostra que as diferenças de SNR e de perda de percurso não são tão acentuadas ao comparar os quatro cenários simulados.

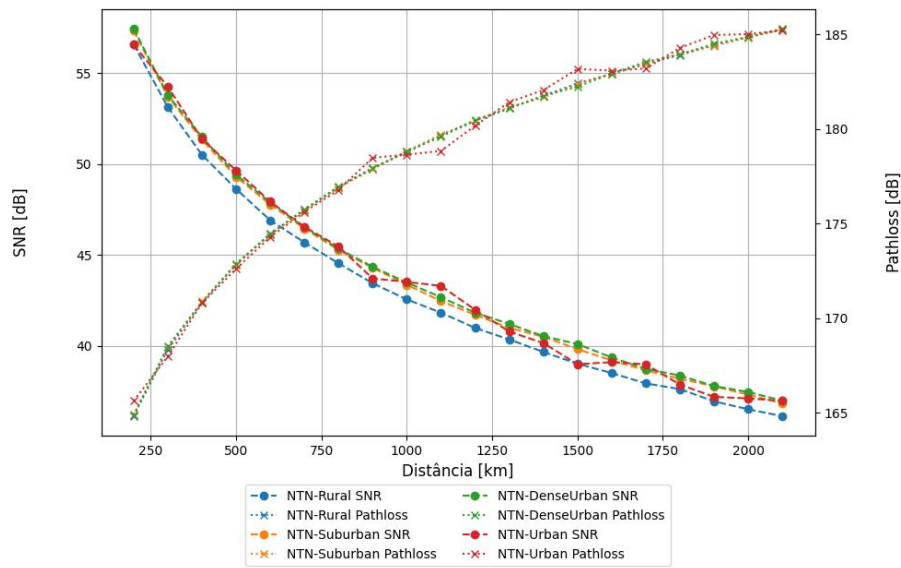


Figura 3: SNR e perda de percurso em sistemas de comunicação banda Ka (*downlink*).
Fonte: autoria própria.

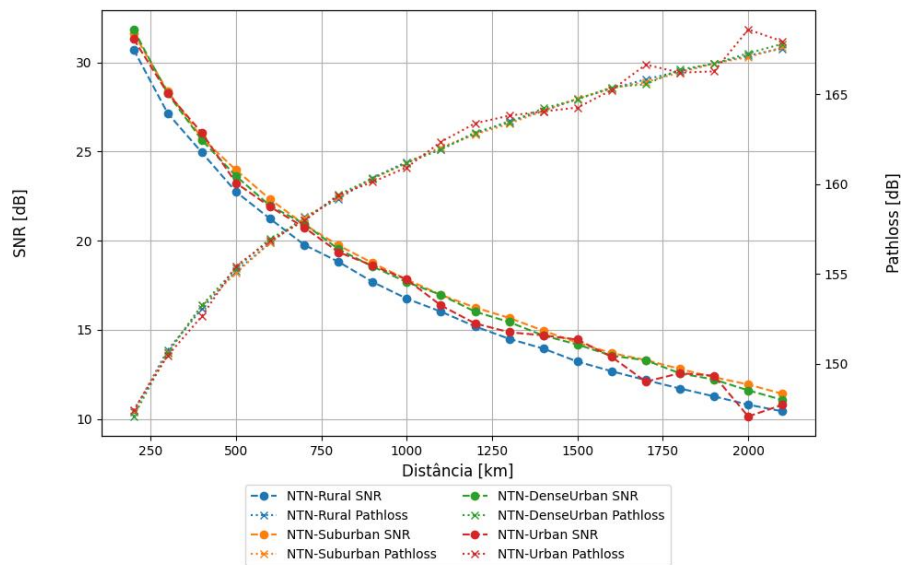


Figura 4: SNR e perda de percurso em sistemas de comunicação banda Ka (*uplink*).
Fonte: autoria própria.

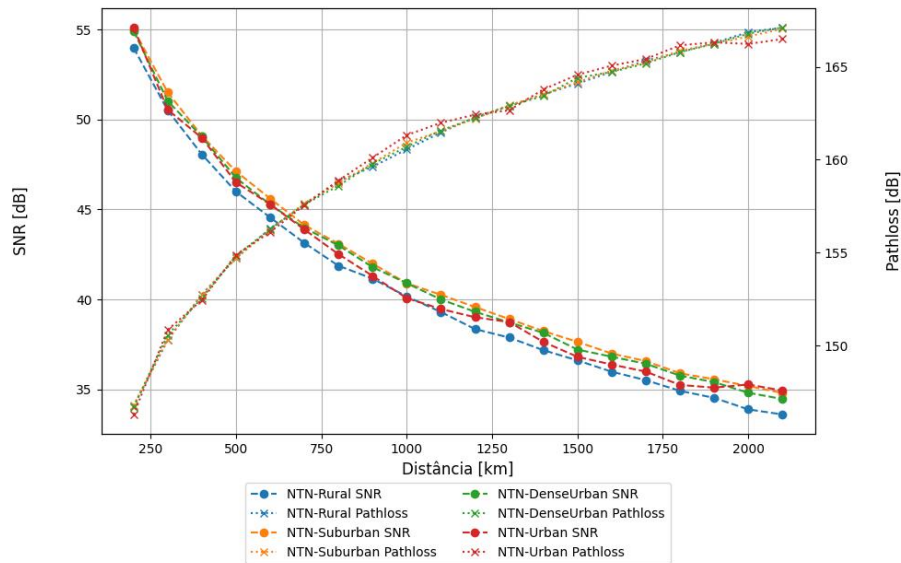


Figura 5: SNR e perda de percurso em sistemas de comunicação banda S (*downlink*).

Fonte: autoria própria.

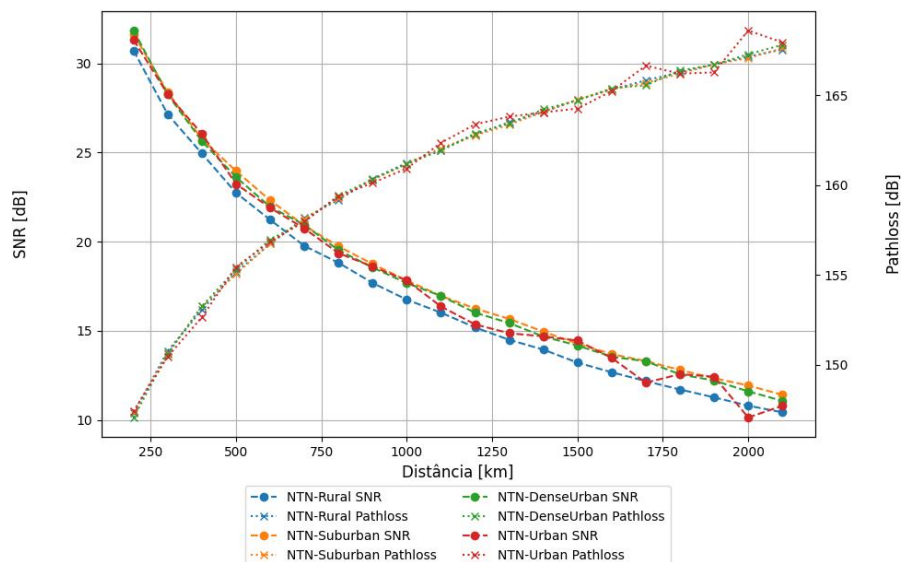


Figura 6: SNR e perda de percurso em sistemas de comunicação banda S (*uplink*).

Fonte: autoria própria.

5.3. Ângulo de elevação

Não existe suporte nativo para movimentação de satélites no simulador ns-3. Para emular o deslocamento orbital, o ângulo de elevação entre a estação terrestre e o satélite foi variado de 90° a 10° , simulando o movimento do satélite ao longo de sua trajetória. Considerou-se um satélite em órbita terrestre baixa (LEO) operando na banda Ka em *downlink* a 600 km da terra.

A Figura 7 mostra como o ângulo de elevação impacta na SNR e na perda de percurso, com base na média de 100 simulações. Observa-se uma degradação significativa nos valores de SNR quando o satélite se desloca de uma posição ideal a 90° (diretamente acima da estação) para uma posição ligeiramente deslocada. Essa degradação se acentua principalmente nos primeiros graus. É importante destacar que além da variação no ângulo de elevação, a distância entre o UE e o satélite também muda, mantendo a altitude do satélite constante. No entanto, a análise da perda de percurso para os diferentes cenários simulados não revelou variações tão grandes quanto as observadas na SNR.

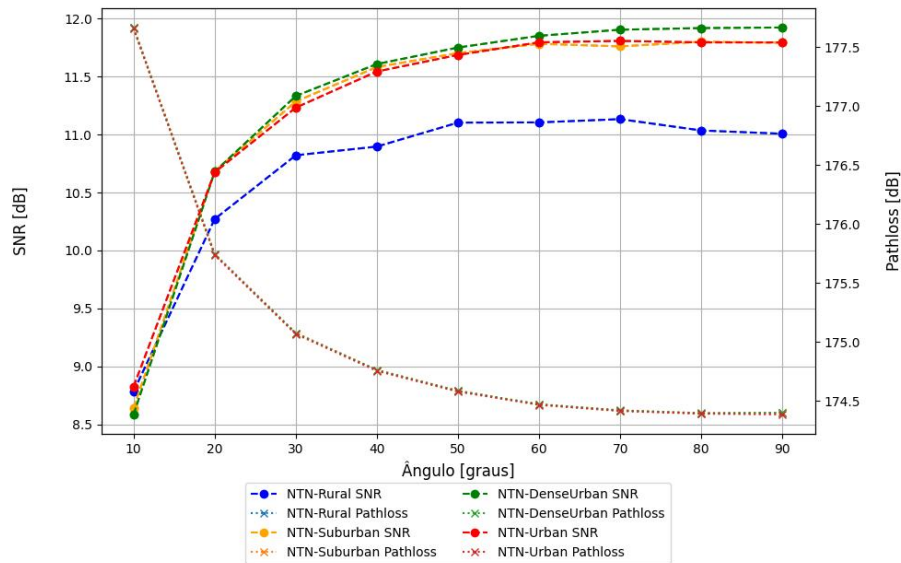


Figura 7: SNR e perda de percurso para banda Ka para *downlink* com variação do ângulo de elevação.

Fonte: autoria própria

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma avaliação do desempenho de sistemas de redes NTN utilizando o simulador ns-3, com foco em caracterizar a perda de percurso, SNR e o impacto de diferentes cenários e frequência de transmissão na comunicação via satélite.

Embora os resultados demonstraram dados consistentes, algumas limitações do simulador ns-3 foram observadas. Além da ausência de suporte para simulações fim-a-fim que impede a análise completa do comportamento das NTNs em toda a pilha de protocolos, o simulador também apresenta restrições na modelagem da mobilidade. Atualmente, existe suporte apenas para antenas e UEs estacionárias, não havendo movimento relativo entre elas. Essa simplificação ignora o efeito Doppler, que causa variações na frequência do sinal devido ao movimento relativo entre transmissor e receptor, impactando a qualidade da comunicação, especialmente em cenários com alta velocidade. Essas limitações restringem uma avaliação mais abrangente do desempenho de aplicações e protocolos em cenários realistas, especialmente aqueles que envolvem mobilidade da UE e seus impactos na comunicação via satélite.

Como trabalhos futuros, sugere-se a implementação de suporte para simulações fim-a-fim no ns-3, permitindo a análise do comportamento das NTNs em toda a pilha de protocolos. A inclusão de modelos de mobilidade mais realistas, que considerem o movimento relativo entre as antenas e a UE e o efeito Doppler, também são cruciais para avaliar o desempenho das NTNs em cenários complexos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, inicio e fim de todas as coisas.

Aos meus orientares Humberto Dionísio, Vicente Angelo e Daniel Luna pelo apoio e ensinamentos que foram essenciais para a concretização deste trabalho.

Aos meus colegas do GppCom, Marília e William, expresse minha sincera gratidão por me ajudarem nessa caminhada, sempre dispostos a colaborar e oferecer apoio nos momentos desafiadores.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Giordani e M. Zorzi, "Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities," *IEEE Network*, v. 35, n. 2, pp. 244–251, 2021. DOI: 10.1109/MNET.011.2000493.
- [2] 3GPP, "Technical Report 38.811, Release 15. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks," rel. técn., 2020.
- [3] 3GPP, "Service requirements for the 5G system," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 22.261, mar. de 2020, [Acesso em: Outubro 2, 2024]. endereço: <https://www.3gpp.org/>.

- [4] H. Shahid, C. Amatetti, R. Campana et al., “Emerging Advancements in 6G NTN Radio Access Technologies: An Overview,” mai. de 2024. DOI: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597037.
- [5] GSMA, *The 5G Era: Age of Boundless Connectivity and Intelligent Automation*, PDF, fev. de 2017. endereço: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2017/02/The-5G-Era-Age-of-boundless-connectivity-and-intelligent-automation.pdf>.
- [6] C. T. Nguyen, Y. M. Saputra, N. V. Huynh et al., *Emerging Technologies for 6G Non-Terrestrial-Networks: From Academia to Industrial Applications*, 2024. arXiv: 2403.07763 [cs.NI]. endereço: <https://arxiv.org/abs/2403.07763>.
- [7] M. Sandri, “An ns-3 Module for Non-Terrestrial Network (NTN) Simulation: Implementation, Design and Performance Evaluation,” Master’s thesis, University of Padova, Padova, Italy, 2023.
- [8] M. M. Azari, S. Solanki, S. Chatzinotas et al., “Evolution of Non-Terrestrial Networks From 5G to 6G: A Survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 24, n. 4, pp. 2633–2672, 2022. DOI: 10.1109/COMST.2022.3199901.
- [9] F. Rinaldi, H.-L. Maattanen, J. Torsner et al., “Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey,” *IEEE Access*, v. 8, pp. 165 178–165 200, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022981.
- [10] X. Lin, B. Hofström, E. Wang et al., *5G New Radio Evolution Meets Satellite Communications: Opportunities, Challenges, and Solutions*, 2019. arXiv: 1903.11219 [cs.NI]. endereço: <https://arxiv.org/abs/1903.11219>.
- [11] SpaceX, *Starlink Technology*, <https://www.starlink.com/technology>, 2024.
- [12] National Instruments, *Non-Terrestrial Networks for 5G and Beyond*, <https://www.ni.com/en/solutions/semiconductor/non-terrestrial-network-test/nonterrestrial-networks-for-5g-and-beyond.html>, Acesso em: Outubro 2, 2024, 2024.
- [13] EY Parthenon, *Satellite Internet: The Next Big Wave - Market Study Report*, PDF, jun. de 2023. endereço: https://www.ey.com/en_gl/news/2023/06/satellite-internet-market-study-report.
- [14] 3GPP, “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 14),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report TR 38.901, versão V14.2.0, set. de 2017.
- [15] ITU, *Attenuation by atmospheric gases and related effects*, Recommendation P.676, 2013.
- [16] Y. Kim, J. Bae, J. Lim et al., “5G K-Simulator: 5G System Simulator for Performance Evaluation,” em *2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, 2018, pp. 1–2. DOI: 10.1109/DySPAN.2018.8610404.
- [17] S. Martiradonna, A. Grassi, G. Piro e G. Boggia, “5G-air-simulator: An open-source tool modeling the 5G air interface,” *Computer Networks*, v. 173, p. 107 151, 2020, ISSN: 1389-1286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107151>. endereço: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619317359>.
- [18] M. Sandri, *3GPP NTN Channel Model Implementation into ns3*, <https://gitlab.com/mattiasandri/ns-3-ntn/-/tree/ntndev>, 2022.
- [19] M. Sandri, M. Pagin, M. Giordani e M. Zorzi, “Implementation of a Channel Model for Non-Terrestrial Networks in ns-3,” em *Proceedings of the 2023 Workshop on ns-3*, sér. WNS3 2023, vol. 2, ACM, jun. de 2023, pp. 28–34. DOI: 10.1145/3592149.3592158. endereço: <http://dx.doi.org/10.1145/3592149.3592158>.
- [20] M. Figaro, “Implementation, Design and Performance Evaluation of Scheduling Protocols for Non-Terrestrial Networks (NTN),” Laurea Magistrale (D.M. 270/2004), Universidade de Padova, 2023. endereço: <https://hdl.handle.net/20.500.12608/69285>.
- [21] Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), *Resolução nº 759, de 19 de janeiro de 2023*, Aprova o Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil (PDF). Publicado no Diário Oficial da União em 23 de janeiro de 2023., jan. de 2023. endereço: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-759-de-19-de-janeiro-de-2023->.