

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCO TÚLIO FRANÇA

MODELAGEM DE ENLACES DE COMUNICAÇÃO COM NANOSSATÉLITES

Uberlândia - MG

2026

MARCO TÚLIO FRANÇA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE ENLACE DE COMUNICAÇÃO COM
NANOSSATÉLITES

Trabalho de Conclusão de Curso da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Uberlândia, 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Coutinho Mateus, FEELT/UFU (Orientador).

Prof. Mst. Gustavo Nozella Rocha.

Prof. Dra. Milena Bueno Pereira Carneiro.

AGRADECIMENTOS

Para quem veio de outro estado com o intuito de estudar, o caminho foi longo e muito desafiador, por conta disso, gostaria de agradecer inicialmente a minha mãe, que foi quem mais me apoiou e sempre me incentivou nos estudos, mostrando que esse era o melhor caminho a ser seguido. Agradeço também a meu irmão e pai, que quando tive dificuldades financeiras para me manter estudando fizeram o possível para que eu não desistisse.

Também agradeço a todos os amigos que me acompanharam nessa jornada, e que tornaram momentos difíceis mais leves e possíveis de enfrentar, com certeza são momentos que vou levar comigo.

Por último, deixo aqui meu sincero e profundo agradecimento a todos os professores que compartilharam um pouco do seu conhecimento comigo, permitindo que eu conseguisse ver o mundo de outra perspectiva.

"A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu
tamanho original."

Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do desempenho em enlaces de comunicação entre nanossatélites em órbita baixa (LEO) e uma estação terrena que estaria localizada no campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia. Dado o crescente uso de nanossatélites com os mais diversos intuitos, compreender o comportamento das perdas no enlace é fundamental para garantir a confiabilidade do sistema de comunicação. Foram investigados os principais fatores que impactam o desempenho do enlace, incluindo ganho da antena do satélite, condições atmosféricas, taxa de transmissão e ângulo de elevação. A metodologia baseou-se na modelagem do orçamento de enlace e na implementação de simulações no MATLAB, permitindo observar o impacto de cada parâmetro na relação sinal-ruído e na margem do enlace. Os resultados mostram que a combinação entre chuva intensa, menores ângulos de elevação e altas taxas de transmissão representa o cenário mais crítico para a comunicação, podendo inviabilizar o enlace caso não haja margem adequada. Conclui-se que a correta escolha dos parâmetros do nanossatélite, além do entendimento das condições ambientais locais, é essencial para a implementação eficiente de sistemas de comunicação de nanossatélites.

Palavras-chave: comunicação satelital, nanossatélites, LEO, perdas no enlace, MATLAB, CubeSat.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the communication link performance between low Earth orbit (LEO) nanosatellites and a ground station located at the Santa Mônica campus of the Federal University of Uberlândia. Given the increasing use of CubeSats for a wide range of applications, understanding how link losses behave is essential to ensure the reliability of the communication system. The study investigates the main factors that influence link performance, including the satellite antenna gain, atmospheric conditions, data rate, and elevation angle. The methodology relied on classical link budget modeling and MATLAB-based simulations, which made it possible to observe how each parameter affects the signal-to-noise ratio and the overall link margin. The results indicate that the combination of intense rainfall, low elevation angles, and high data rates forms the most critical scenario for communication, potentially making the link unfeasible when the margin is insufficient. The findings highlight that selecting appropriate CubeSat parameters, together with understanding the local environmental conditions, is crucial for the efficient design of nanosatellite communication systems.

Keywords: satellite communication, nanosatellites, LEO, link losses, MATLAB, CubeSat.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Órbitas de satélites.....	13
Figura 2 - classificação de tipos de enlace.	14
Figura 3 - CubeSTAR, modelo de cubesat 2U.....	16
Figura 4 - Comparação antena isotrópica e antena direcional.....	20
Figura 5 - Sistema de transmissão satelital.	20
Figura 6 - Perda por apontamento.....	22
Figura 7 - Azimute e elevação.....	23
Figura 8 - Geometria para o cálculo da elevação.	23
Figura 9 - Atenuação específica	26
Figura 10 - Exemplos de estados de polarização.	28
Figura 11 - Interface do Satellite Link Budget Analyzer.	36
Figura 12 - Parâmetros do satélite.....	36
Figura 13 - Tabela de valores obtidos.	37
Figura 14 - Guia de seleção de antenas e faixas de frequência.	38
Figura 15 - Modulação QPSK.....	39
Figura 16- Gráfico de FSPL.....	45
Figura 17 - Margem do enlace.	47
Figura 18 - Relação sinal-densidade de ruído.	48
Figura 19 - Atenuação da chuva.....	49
Figura 20 - Atenuação atmosférica total.	50
Figura 21 - Margem do enlace em condição de chuva intensa.....	51
Figura 22 – Margem do enlace uplink.....	52
Figura 23 - Atenuação da chuva em uplink.....	52
Figura 24 - Atenuação atmosférica total uplink.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros estação terrena transmissora..... 41

Quadro 2 – Parâmetros do nanossatélite..... 42

Quadro 3 - Parâmetros de referência..... 44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMC	Modulação e Codificação Adaptativas
BER	Taxa de Erro de Bits
BPSK	Modulação por Deslocamento de Fase Binária
Cal Poly	Universidade Politécnica Estadual da Califórnia
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
EIRP	Potência Isotrópica Radiada Efetiva
FCC	Comissão Federal de Comunicações
FSPL	Perda de Espaço Livre
G/T	Ganho sobre Temperatura de Ruído do Sistema
GEO	Órbita Geoestacionária da Terra
GMAT	General Mission Analysis Tool
GPS	Global Positioning System
HEO	Órbita Alta da Terra
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ITU	International Telecommunication Union
LEO	Órbita Baixa da Terra
LHCP	Polarização Circular à Esquerda
LNA	Amplificador de Baixo Ruído
MarCO	Mars Cube One
MEO	Órbita Média da Terra
MG	Minas Gerais
NASA	National Aeronautics and Space Administration
QPSK	Modulação por Deslocamento de Fase em Quadratura
RHCP	Polarização Circular à Direita
SNR	Relação Sinal-Ruído
STK	Systems Tool Kit
UHF	Frequência Ultra-Alta
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
VSAT	Very Small Aperture Terminal
XPB	Discriminação de Polarização Cruzada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 Órbitas de satélites e dinâmica orbital	12
2.2 Conceitos fundamentais de enlaces satelitais	14
2.3 CubeSats e Nanossatélites	15
2.4 Link budget	18
2.4.1 Potência transmitida	19
2.4.2 Perdas associadas ao sistema transmissor	20
2.4.3 Cálculo do ângulo de elevação e azimute	22
2.4.4 Perda por atenuação da chuva e gases atmosféricos	25
2.4.5 Perdas por polarização	28
2.4.6 Perdas por temperatura de ruído	30
2.4.7 Perdas em espaço livre	32
2.4.8 Cálculo do Orçamento de Enlace e Determinação da Margem	33
3. METODOLOGIA E CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	35
3.1 Descrição geral da abordagem	35
3.2 Definição dos parâmetros	37
3.2.1 Definição do ganho e banda de frequência	37
3.2.2 Definição do esquema de modulação	38
3.2.3 Parâmetros da estação terrena	40
3.2.4 Parâmetros do nanossatélite	42
3.2.5 Parâmetros satélite de referência	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Resultados Downlink	45
4.2 Resultados Uplink	51
5. CONCLUSÃO	54
5.1 Limitações e perspectivas futuras	55
5.2 Considerações finais	56
6. REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

A busca por conexão tem crescido muito nos últimos anos. Dessa forma, soluções de comunicação via satélite que sejam mais baratas, eficientes e menos complexas passaram a receber mais atenção. Dentro desse contexto, os nanossatélites (satélites com massa entre 1 kg e 10 kg) vêm ganhando espaço em diferentes usos, como monitoramento ambiental, internet em regiões isoladas e apoio a pesquisas científicas. Um dos motivos para esse avanço é que esses satélites custam menos para desenvolver e podem ser construídos em períodos menores. Dessa forma, abriu-se um caminho para que universidades e startups também participem desse setor, algo que antes era limitado a grandes empresas e agências espaciais. Com essa mudança, constelações inteiras em órbita baixa (LEO) passaram a ser uma opção real, oferecendo cobertura praticamente global e com baixa latência (PRATT; BOSTIAN; ALLNUTT, 2020).

Por estarem em órbita baixa, esses satélites acabam lidando com um ambiente de comunicação que muda com frequência. O sinal que chega até eles sofre vários tipos de influência, desde a perda natural da propagação em espaço livre até efeitos de multipercurso, interferências e, principalmente, as atenuações que acontecem na atmosfera entre a Terra e o satélite (ITU, 2023a).

Entre todos esses fatores, a atenuação por chuva costuma ser a mais crítica. Isso é ainda mais evidente em regiões tropicais, como no Brasil, onde as chuvas intensas tornam o cenário bem mais desafiador. Para ajudar nesse tipo de análise, a União Internacional de Telecomunicações (ITU) criou uma classificação de zonas de chuva, descrita na Recomendação ITU-R P.837-9. Essa divisão serve como referência para estimativas mais realistas de atenuação em enlaces satelitais (ITU, 2017).

Além da perda direta provocada pela chuva, tanto pela absorção quanto pelo espalhamento, existe outro ponto que pode afetar bastante os enlaces satelitais, que seria o aumento da temperatura de ruído do sistema. Isso acontece porque a própria atmosfera fica com uma temperatura de ruído mais elevada. Em situações de atenuação muito alta, esse efeito pode prejudicar ainda mais o enlace, dessa forma, a recomendação ITU-R P.618-14 (ITU, 2023a) explica em detalhes como essa elevação interfere na relação sinal-ruído (SNR), que depende diretamente da temperatura média da atmosfera, influenciada pelo clima local e pela temperatura da superfície.

Outro fator importante é a despolarização do sinal, causada por gotas de chuva e outros hidrometeoros presentes na atmosfera. Esse fenômeno pode alterar a polarização original do

sinal e gerar componentes de polarização cruzada (XPD), o que impacta de forma significativa a qualidade do enlace, especialmente em frequências mais altas e em trajetórias com grande inclinação. Para lidar com esse efeito, a ITU também propõe modelos estatísticos capazes de estimar a discriminação de polarização cruzada em diferentes faixas de frequência (ITU, 2023a).

Neste trabalho, é apresentada uma abordagem que combina parte teórica e parte experimental para modelar o canal e analisar o desempenho de enlaces satelitais que utilizam nanossatélites, com atenção especial aos ambientes tropicais, como o de Uberlândia (MG). A proposta se apoia em modelos preditivos da ITU, integrados à ferramenta de simulação Satellite Link Budget Analyzer do MATLAB, que permite montar cenários mais próximos da realidade e avaliar, de forma comparativa, como diferentes fatores afetam o desempenho do enlace. Com essa estrutura, o estudo busca avaliar a influência das perdas ocasionadas pelo meio e qualificar cenários onde o uso de nanossatélites torna-se adequado. Além disso, pretende-se discutir os desafios atuais e as tendências que devem influenciar o futuro desses sistemas de pequeno porte.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais necessários para o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente, são discutidos os princípios básicos relacionados aos satélites, incluindo as principais órbitas e as características essenciais de enlaces de comunicação. Em seguida, é realizada uma breve contextualização sobre os cubesats, destacando suas limitações e particularidades no contexto de missões em órbita baixa. Por fim, aborda-se o conceito de *link budget* (orçamento de enlace) detalhando os principais parâmetros que influenciam o desempenho da comunicação e que serão utilizados posteriormente na modelagem e nas simulações apresentadas ao longo deste trabalho.

2.1 Órbitas de satélites e dinâmica orbital

Os satélites artificiais desempenham papel fundamental em diversas aplicações modernas, incluindo meteorologia, navegação, sensoriamento remoto, exploração científica e comercial do espaço. No contexto das comunicações via satélite, uma das classificações mais críticas é devido ao tipo de órbita, pois afeta diretamente o projeto dos enlaces, os requisitos de potência, a geometria do canal, o tempo de visibilidade, a latência de propagação e a necessidade de rastreamento dinâmico por parte das estações terrestres (PRATT; BOSTIAN; ALLNUTT, 2020).

De modo geral, os satélites de comunicação podem ser categorizados quanto à sua órbita em quatro grupos principais: órbitas baixas (LEO – *Low Earth Orbit*), órbitas médias (MEO – *Medium Earth Orbit*), órbitas geoestacionárias (GEO – *Geostationary Earth Orbit*) e órbitas altamente elípticas, como a órbita Molniya (RICHHARIA; WESTBROOK, 2011).

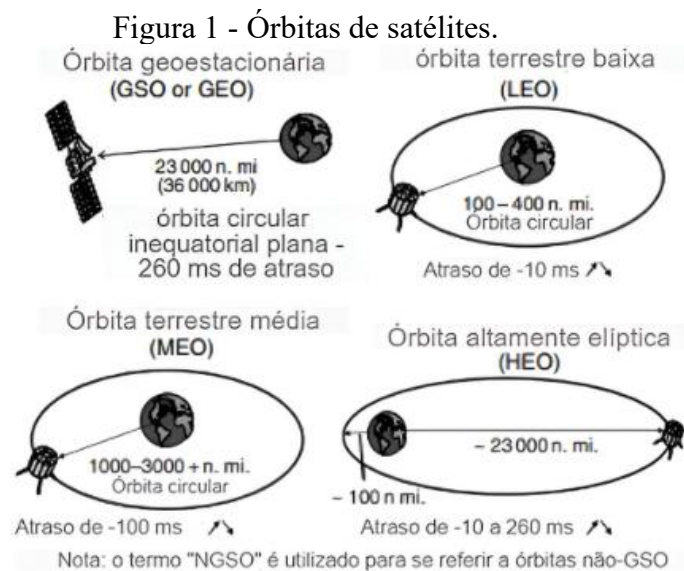
Satélites em LEO operam entre, aproximadamente, 160 km e 2.500 km de altitude e completam uma revolução em torno da Terra em cerca de 90 a 120 minutos. Essas características proporcionam vantagens como menor atraso de propagação, menores perdas por espaço livre e requisitos reduzidos de potência de transmissão. Contudo, sua área de cobertura instantânea é limitada, o que exige o uso de constelações com dezenas ou centenas de satélites para garantir comunicação contínua, como é o caso de sistemas como Starlink e Iridium (ITU, 2023b; MARAL; BOUSQUET, 2020).

Por outro lado, satélites em MEO, com altitudes típicas entre 2.000 km e 20.000 km, fornecem maior tempo de visibilidade em relação à superfície terrestre. São amplamente

utilizados em sistemas globais de navegação por satélite (GNSS), como GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, pois oferecem um bom equilíbrio entre cobertura global, estabilidade orbital e uma latência aceitável (MARAL; BOUSQUET, 2020).

Satélites GEO, posicionados a cerca de 35.786 km sobre o equador, completam uma órbita em 24 horas, sincronizados com a rotação da Terra. Isso os permite permanecer fixos em relação a um ponto no solo, simplificando as antenas de rastreamento terrestre e favorecendo aplicações contínuas como televisão, transmissão de rádio digital, links de dados para regiões remotas e redes VSAT. No entanto, os enlaces GEO são penalizados por uma latência elevada devido a distância (aproximadamente 250 ms de ida e volta) e maior atenuação por propagação livre, o que gera necessidade de antenas de alto ganho e amplificadores de alta potência (PRATT; BOSTIAN; ALLNUTT, 2020).

As órbitas elípticas altas (HEO), como a órbita Molniya citada anteriormente, possuem perigeu baixo e apogeu elevado, permitindo longos períodos de visibilidade sobre regiões de alta latitude, como o Ártico ou parte da Rússia, onde satélites GEO geralmente não apresentam uma boa cobertura. Essa configuração tem sido historicamente adotada por países que operam em regiões polares e subpolares (RICHHARIA; WESTBROOK, 2011). A figura 1 destaca os 4 tipos de órbitas citadas nesse subcapítulo.



Fonte: Adaptado de Dennis Roddy (2006).

Com o avanço da miniaturização eletrônica e das técnicas de fabricação, os nanosatélites passaram a operar quase exclusivamente em órbitas LEO, devido à menor demanda energética para inserção orbital, menor exposição à radiação e maior viabilidade

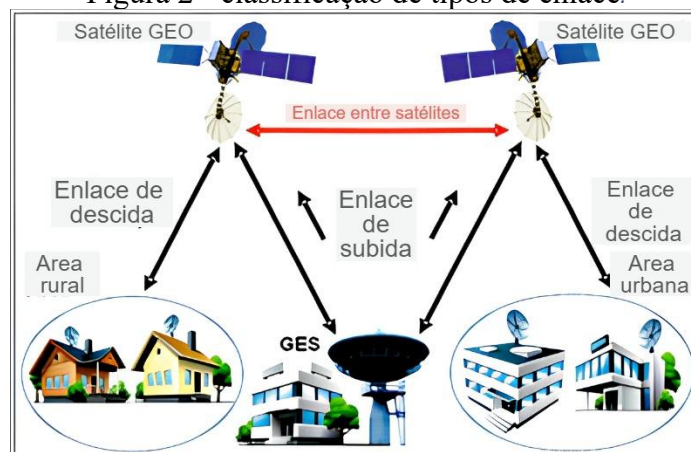
econômica (MARAL; BOUSQUET, 2020). No entanto, essa escolha impõe desafios específicos à comunicação, como rápidas variações nos parâmetros do canal, curta janela de visibilidade (geralmente entre 5 e 15 minutos por passagem) e efeito Doppler mais intenso devido a rápida deslocação em órbita (PRATT; BOSTIAN; ALLNUTT, 2020; RICHARIA; WESTBROOK, 2011).

A compreensão das características dessas diferentes órbitas e suas implicações diretas sobre o enlace de comunicação é, portanto, essencial para o desenvolvimento de modelos de canal realistas e para a avaliação precisa do desempenho de sistemas baseados em satélites, especialmente no caso dos nanossatélites, que, embora limitados em recursos, têm ampliado significativamente as possibilidades de comunicação de baixo custo (KHAWAJA; GUVENC; JACOBSEN, 2023).

2.2 Conceitos fundamentais de enlaces satelitais

O enlace satelital constitui a base técnica para a comunicação entre um satélite e uma estação terrestre ou entre satélites em órbita, sendo composto por diversos elementos físicos e lógicos que determinam a qualidade e a confiabilidade da transmissão de dados (RICHARIA; WESTBROOK, 2011). Conforme visto na Figura 2, um enlace pode ser classificado em uplink (da Terra para o satélite), downlink (do satélite para a Terra) ou inter-satellite link (entre satélites), comum especialmente em constelações LEO com comunicação distribuída (MARAL; BOUSQUET, 2020; ITU, 2023b).

Figura 2 - classificação de tipos de enlace.



Fonte: Adaptado de Nasa (2023).

A análise de um enlace satelital requer a compreensão de uma série de conceitos fundamentais, como a equação do enlace, que relaciona os principais parâmetros de transmissão, incluindo potência do transmissor, ganho das antenas, perdas no espaço livre, temperatura de ruído e largura de banda (abordado no Capítulo 3). Essa equação permite calcular grandezas críticas para o desempenho do sistema, como a relação sinal-ruído (SNR) e a margem do enlace, que são determinantes para a confiabilidade da comunicação (RODDY, 2006).

Um dos elementos centrais dessa análise é a relação G/T do receptor, expresso pela razão entre o ganho da antena de recepção e a temperatura de ruído do sistema, o qual afeta diretamente a sensibilidade do receptor (MARAL; BOUSQUET, 2009). As perdas por propagação no espaço livre aumentam com o quadrado da distância e da frequência, tornando o planejamento de frequência e a escolha da banda (UHF, S, X, Ku, Ka) fundamentais, especialmente em missões com restrições como as de nanossatélites (SKLAR, 2001).

Outro fator crítico no enlace satelital é o comportamento do canal de comunicação, que pode incluir efeitos de desvanecimento, atenuações atmosféricas (chuva, vapor d'água, troposfera), obstruções físicas temporárias e interferências co-canal ou adjacentes (ITU-R P.618-13, 2017).

Além disso, a polarização do sinal (linear ou circular) e a correspondência entre as antenas transmissora e receptora afetam a eficiência da recepção. No contexto de nanossatélites, as restrições de tamanho, peso e consumo energético limitam o uso de antenas de alto ganho, amplificadores potentes e mecanismos de rastreamento sofisticados, tornando essencial a otimização do enlace, com margens de link adequadas e estratégias adaptativas de taxa de dados (GÜNES; AKYILDIZ, 2020).

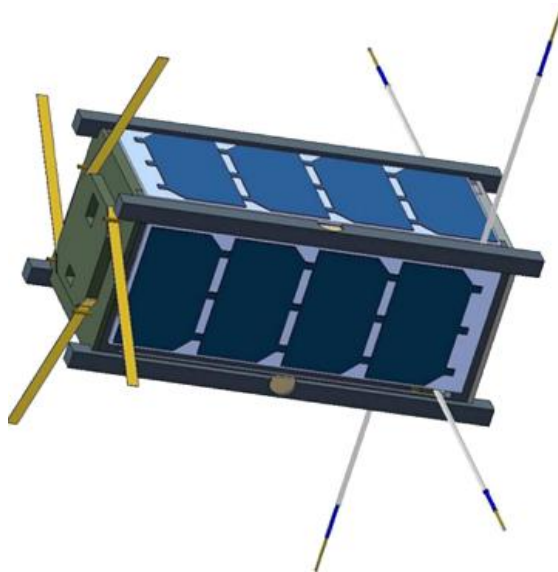
2.3 CubeSats e Nanossatélites

Os CubeSats surgiram no início dos anos 2000 como uma plataforma padronizada desenvolvida para fins educacionais e de pesquisa, oferecendo uma forma acessível de colocar pequenos satélites em órbita. A proposta inicial, apresentada pela California Polytechnic State University (Cal Poly) em conjunto com a Stanford University, estabeleceu dimensões e requisitos mecânicos que permitiram a padronização do formato e dos mecanismos de lançamento, tornando o desenvolvimento de pequenos satélites mais acessível em diferentes instituições ao redor do mundo. Essa padronização foi fundamental para a popularização dos

CubeSats, que hoje representam uma parcela significativa dos lançamentos de pequenos satélites, tanto para fins acadêmicos quanto comerciais (Cal Poly, 2020).

Os CubeSats seguem a unidade básica denominada “1U”, que possui dimensões de $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ e massa típica de até 1,33 kg. A partir dessa unidade, é possível construir configurações maiores, como 2U, 3U, 6U, 12U e até 27U, que permitem projetos com maior disponibilidade de energia, volume e capacidade de carga útil, um exemplo disso é o cubeSTAR, um modelo de de cubesat em 2U conforme visto na Figura 3. Sendo assim, isso tornou a plataforma extremamente versátil, viabilizando aplicações que vão desde experimentos simples em órbita baixa até missões científicas complexas, como observação da Terra, comunicações, monitoramento atmosférico e até missões interplanetárias, como demonstrado pela missão Mars Cube One (MarCO) da NASA (NASA, 2019).

Figura 3 - CubeSTAR, modelo de cubesat 2U.



Fonte: TRESVIG (2010).

Do ponto de vista operacional, os CubeSats são classificados dentro da categoria mais ampla dos nanossatélites, que geralmente compreendem satélites com massa entre 1 e 10 kg. Essa categoria é caracterizada por apresentar recursos limitados de potência, processamento e volume interno, o que exige um design altamente otimizado para acomodar subsistemas essenciais, como geração de energia, controle térmico, controle de atitude, telecomunicações e a carga útil. A limitação energética é um dos desafios mais relevantes nessa classe de satélites,

já que a pouca área disponível para painéis solares restringe a potência elétrica disponível, influenciando diretamente o desempenho dos enlaces de comunicação e a autonomia dos sistemas embarcados (Swartwout, 2013).

Apesar dessas limitações, os nanossatélites se destacam pela seu custo-benefício. O uso de componentes comerciais de prateleira tornou o processo de construção mais ágil e acessível, permitindo que universidades, startups e até pequenas empresas possam desenvolver missões espaciais próprias. Entretanto, essa estratégia também introduz vulnerabilidades, já que muitos desses componentes não foram projetados para suportar ambientes extremos de radiação e temperatura presentes no espaço, reduzindo a vida útil de algumas missões (Hevner et al., 2011).

No contexto das telecomunicações, nanossatélites apresentam desafios adicionais devido ao pequeno tamanho das antenas possíveis e a potência reduzida dos transmissores embarcados. Isso faz com que os enlaces típicos operem em bandas de frequência mais baixas, como VHF, UHF e banda S, utilizada durante simulações do capítulo 3, onde antenas compactas apresentam melhor eficiência e a potência necessária para o enlace é menor. Ao mesmo tempo, à medida que a demanda por maior taxa de transmissão cresce, surgem iniciativas para empregar bandas mais altas, como a banda X, embora isso exija soluções avançadas de apontamento e controle de altitude, além de antenas com maior ganho e maior complexidade (Poghosyan & Golkar, 2017).

Além disso, o ambiente orbital também impõe desafios operacionais. A maioria dos nanossatélites operam em órbitas LEO, geralmente entre 400 km e 700 km de altitude, onde o arrasto atmosférico ainda é significativo. Isso reduz o tempo de vida útil em órbita e exige análises de estabilidade e decaimento orbital durante o planejamento da missão. Por outro lado, órbitas LEO facilitam a comunicação com estações terrenas, graças à menor distância entre o satélite e o receptor, reduzindo as perdas de propagação e possibilitando enlaces com menores requisitos de potência (Fortescue, Swinerd & Stark, 2011).

Portanto, CubeSats e nanossatélites representam uma revolução no acesso ao espaço, viabilizando missões de baixo custo e grande flexibilidade, mas que também impõem desafios relevantes relacionados à limitação física, energética e estrutural. O entendimento dessas características é essencial para o correto dimensionamento do enlace de comunicação, para o desenvolvimento da modelagem proposta neste trabalho e para a análise das condições operacionais que determinam o desempenho desse tipo de sistema.

2.4 Link budget

O link budget, ou orçamento de enlace, consiste em uma análise que tem como fundamento calcular a relação entre a potência transmitida e a potência recebida em um enlace de comunicação via satélite. Essa ferramenta é comumente usada no projeto e na avaliação de sistemas satelitais, uma vez que assegura que o sinal recebido na estação receptora seja suficiente para garantir a qualidade desejada da comunicação, considerando todas as perdas e ganhos ao longo do enlace (RODDY, 2006; MARAL; BOUSQUET, 2009).

Em sua forma básica, o link budget é expresso em termos de potências (em watts ou dBW) ou densidade de potência (dBW/Hz), e pode ser representado pela seguinte equação:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_P - L_O \quad (2.1)$$

Sendo:

P_R : potência recebida (dBW).

P_T : potência transmitida (dBW).

G_T : ganho da antena transmissora (dB).

G_R : ganho da antena receptora (dB).

L_P : perda por propagação livre no espaço (dB).

L_O : perdas adicionais (dB), incluindo perdas atmosféricas, de polarização, de conexão, entre outras.

Além da relação da potência transmitida e recebida, o link budget também considera a densidade de potência do ruído no receptor (N_0) e a relação sinal-ruído desejada ($\frac{E_b}{N_0}$), especialmente porque é importante avaliar parâmetros como a taxa de erro de bits (BER) e a modulação empregada (MARAL; BOUSQUET, 2009).

A análise do link budget possibilita dimensionar corretamente os parâmetros do sistema, como a potência do transmissor, o ganho das antenas, a largura de banda e o tipo de modulação. Além disso, é essencial para avaliar a viabilidade de comunicações em diferentes condições operacionais e ambientes, incluindo fatores como a distância entre o satélite e a estação terrena, as condições atmosféricas e o tipo de serviço fornecido (voz, dados, vídeo) (RODDY, 2006).

Para o caso de satélites de pequeno porte, como os nanossatélites e CubeSats, a análise do link budget torna-se ainda mais importante devido às limitações de potência e de dimensões físicas das antenas e dos equipamentos embarcados (HERNÁNDEZ; GARCÍA; LÓPEZ, 2019). Dessa forma, cada um dos parâmetros é analisado nas subseções 2.4.1 a 2.4.8, importante para que a simulação do enlace seja mais precisa.

2.4.1 Potência transmitida

No link budget, em sistemas de comunicação via satélite, a potência transmitida não deve ser analisada isoladamente, uma vez que o parâmetro de interesse no cálculo do link budget é a Potência Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP), que considera conjuntamente a potência transmitida para o enlace e o ganho direcional da antena transmissora:

$$EIRP = PT \cdot GT \quad (2.2)$$

$$EIRP = PT(dBW) + GT(dBi) \quad (2.3)$$

$$EIRP = PT(dBW) + GT(dBi) - LT(dB) \quad (2.4)$$

PT: Potência transmitida(*dBW*).

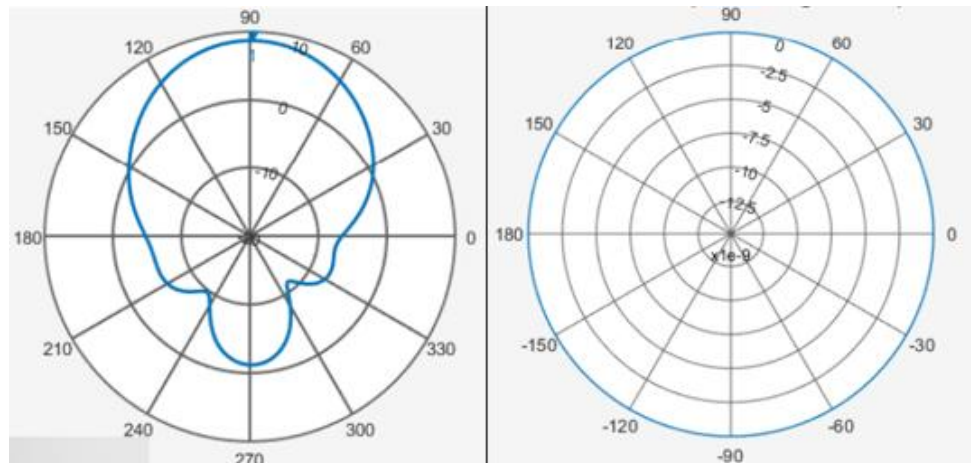
GT: Ganho de transmissão(*dBi*).

LT: Perdas no sistema de transmissão(*dB*).

O EIRP traduz a densidade de potência radiada na direção de máxima radiação como se a antena fosse isotrópica, permitindo a comparação e o dimensionamento do enlace independentemente do tipo de antena utilizado (RODDY, 2006; MARAL; BOUSQUET, 2009).

Na figura 4 são destacados dois tipos de irradiação do sinal por parte das antenas, sendo o do lado esquerdo o caso de uma antena direcional (concentra a transmissão em uma direção), e o do lado direito uma antena isotrópica (irradia igualmente em todas as direções).

Figura 4 - Comparação antena isotrópica e antena direcional.

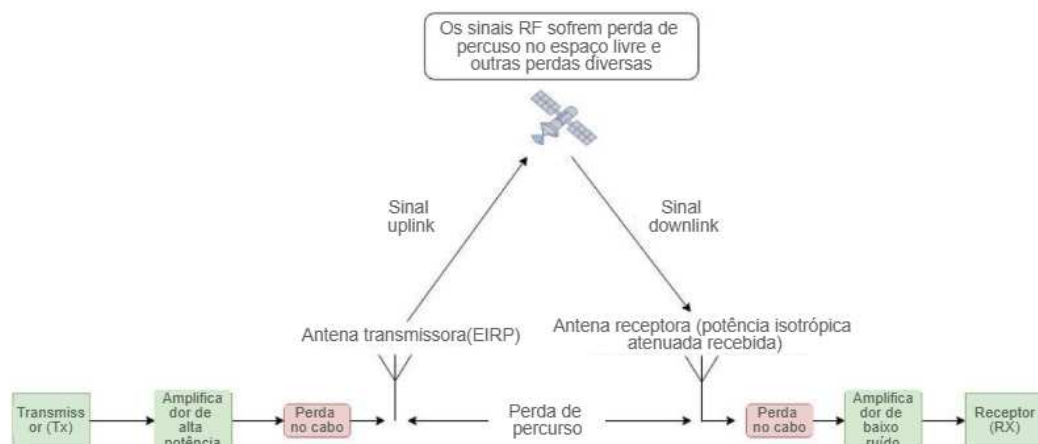


Fonte: MathWorks (2024).

2.4.2 Perdas associadas ao sistema transmissor

Como foi visto na subseção 2.4.1 existem perdas que precisam ser consideradas no sistema transmissor (*LT*), elas são fundamentais no dimensionamento do enlace e podem variar significativamente em função da frequência de operação e da qualidade dos componentes do sistema. Essas perdas comumente estão relacionadas a perdas entre o transmissor e a antena, a figura 5 representa essa relação.

Figura 5 - Sistema de transmissão satelital.



Fonte: Adaptado de MathWorks (2024).

O esquema representa o subsistema de transmissão de um enlace satelital, destacando os principais pontos de perda de potência ao longo do caminho entre o transmissor e a antena. São evidenciadas as atenuações introduzidas por cabos, conectores, filtros, acopladores e desajustes de impedância, que reduzem diretamente a Potência Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP) efetiva do sistema.

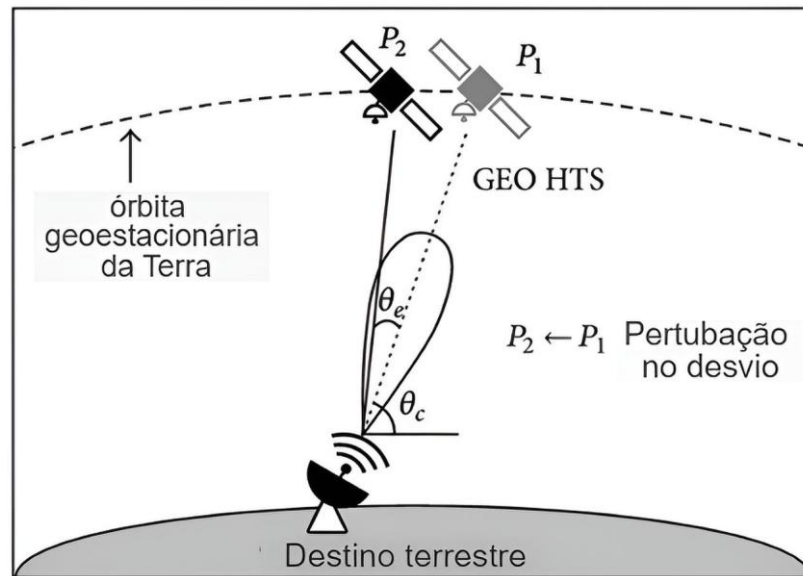
Dentre os principais mecanismos de perda, destacam-se:

- Perdas em cabos coaxiais e guias de onda: São proporcionais ao comprimento do cabo e à frequência do sinal, e geralmente expressas em dB/m. Para frequências na faixa de UHF e micro-ondas, comuns em enlaces de satélite, essas perdas podem ser expressivas e devem ser minimizadas mediante o uso de cabos de baixa atenuação e linhas de transmissão de alta qualidade.
- Perdas em conectores e acopladores: Conectores de baixa qualidade ou mal ajustados introduzem perdas adicionais, geralmente na faixa de 0,1 a 0,5 dB por elemento, dependendo do tipo de conector e do estado da conexão.
- Perdas por descasamento de impedância: O descasamento de impedâncias entre os componentes que compõem o sistema de transmissão, como amplificador, cabo, antena, provoca reflexão de parte da potência incidente, caracterizada pelo coeficiente de reflexão Γ . A perda por descasamento é dada por:

$$L = -10 \log (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.5)$$

Além das perdas entre o transmissor e a antena pode-se destacar as perdas relacionadas ao desvio de apontamento entre a antena e o satélite, como abordado anteriormente sabe-se que as antenas direcionais são mais comumente utilizadas em comunicações via satélite, dessa forma, caso o satélite esteja em uma radial diferente da que se encontra o lóbulo central existe perda de apontamento, a figura 6 representa essa perda.

Figura 6 - Perda por apontamento.



Fonte: Adaptado de Jian (2017).

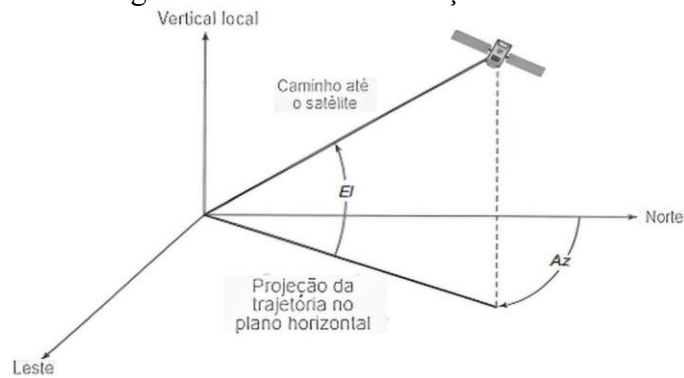
A figura 6 mostra dois cenários. O primeiro seria na posição P_1 , em que o satélite está exatamente no centro do feixe da antena (ganho máximo) e a posição P_2 , em que existe um desvio angular $\Delta\theta$ entre o feixe principal da antena e o satélite. Esse desalinhamento reduz o ganho efetivo da antena, provocando uma perda de apontamento (pointing loss) no orçamento de enlace.

Para fazer o cálculo do apontamento é necessário conhecer alguns parâmetros, como o ângulo de elevação e o azimute.

2.4.3 Cálculo do ângulo de elevação e azimute

Para garantir o apontamento correto entre a estação terrena e o satélite de destino é necessário se atentar a alguns ângulos, são eles o azimute, ângulo tomado com relação ao norte geográfico, ou seja, considerando a perspectiva horizontal e o ângulo de elevação para considerar a perspectiva vertical com relação ao plano da antena. A figura 7 destaca essas relações angulares.

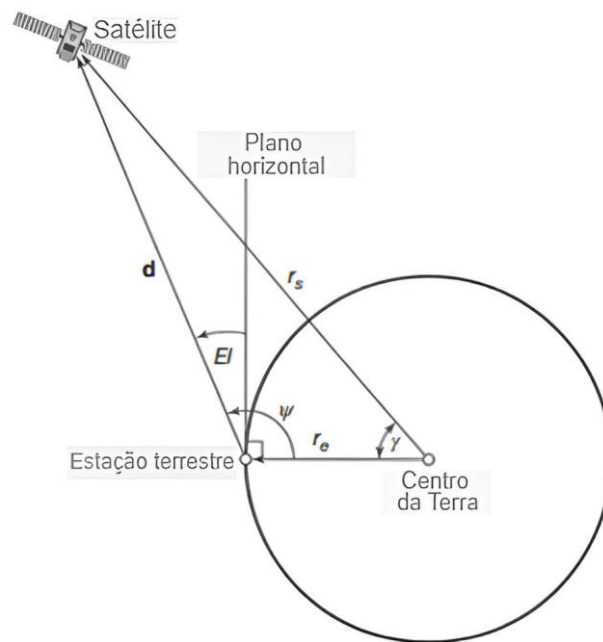
Figura 7 - Azimute e elevação.



Fonte: Adaptado de Thimoty Pratt (2020).

É possível obter o ângulo de elevação com base em parâmetros entre a estação terrena, o satélite e o centro da terra, como visto na figura 8.

Figura 8 - Geometria para o cálculo da elevação.



Fonte: Adaptado de Thimoty Pratt (2020).

d : Distância entre a estação e o satélite.

r_e : Raio da Terra (do centro da Terra até a estação).

r_s : Distância do centro da Terra até o satélite.

ψ (psi): Ângulo central entre a estação e o satélite, medido a partir do centro da Terra.

γ : Latitude da estação terrestre (em algumas versões do diagrama).

A determinação do El entre uma estação terrena e um satélite pode ser realizada por meio de uma abordagem geométrica, que considera a posição do satélite e da estação em coordenadas geográficas. Conforme apresentado por Pratt et al. (2020), parte-se da lei dos cossenos para encontrar o ângulo central γ entre o vetor posição da estação e do satélite:

$$\cos(\gamma) = \cos(Le) \cdot \cos(Ls) \cdot \cos(ls - le) + \sin(Le) \cdot \sin(Ls) \quad (2.6)$$

Sendo, respectivamente, Le e le a latitude norte e longitude oeste da estação e Ls a latitude norte e ls a longitude oeste do ponto de subsatélite.

Aplicando novamente a lei dos cossenos sobre o triângulo, obtém-se a distância d entre a estação terrena e o satélite:

$$d = rs \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{r_e}{r_s}\right)^2 - 2 \cdot \frac{r_e}{r_s} \cdot \cos(\gamma)} \quad (2.7)$$

Considerando que o plano local horizontal da estação terrena é perpendicular ao vetor r_e , o ângulo de elevação El é dado por:

$$El = \psi - 90^\circ \quad (2.8)$$

Com base na lei dos senos, tem-se:

$$\frac{r_s}{\sin(\psi)} = \frac{d}{\sin(\gamma)} \quad (2.9)$$

Combinando essas equações, tem-se:

$$\cos(El) = \frac{r_s \cdot \sin(\gamma)}{d} = \frac{\sin(\gamma)}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_e}{r_s}\right)^2 - 2 \cdot \frac{r_e}{r_s} \cdot \cos(\gamma)}} \quad (2.10)$$

Já o cálculo do ângulo de azimuth (Az) é mais complexo que do El já que está sujeito a variáveis geográficas, como a latitude e longitude da estação, a posição do satélite (se está a leste ou a oeste da estação), e o hemisfério em que se encontram ambos os pontos. Essa complexidade aumenta principalmente para satélites em órbita baixa (LEO) e média (MEO), onde as condições geométricas mudam rapidamente com o tempo. Para satélites geoestacionários (GEO), por outro lado, a geometria se estabiliza e o cálculo pode ser consideravelmente simplificado.

Segundo Pratt et al. (2020), a dificuldade associada ao cálculo do azimuth em casos gerais motivou o desenvolvimento de soluções computacionais, que hoje incluem pacotes comerciais e softwares de código aberto. Entre eles, destacam-se softwares como o STK (Systems Tool Kit), ferramenta comercial amplamente usada em dinâmica orbital e análise de enlaces.

2.4.4 Perda por atenuação da chuva e gases atmosféricos

Além das perdas associadas ao transmissor, têm-se as perdas introduzidas pela atmosfera terrestre. Essas perdas constituem um dos elementos mais críticos no desempenho de enlaces satelitais, sobretudo em frequências superiores a alguns gigahertz. Embora a maior parte do percurso do sinal ocorra no espaço, onde não há atenuação significativa, o trecho final correspondente à travessia da troposfera impõe condições ambientais que afetam diretamente a potência recebida. Nesse contexto, dois mecanismos de degradação se destacam: a atenuação por chuva e a atenuação por gases atmosféricos.

A atenuação por chuva é tipicamente o fenômeno mais severo em bandas elevadas, como Ku e Ka. As gotas de chuva interagem com a onda eletromagnética por absorção e espalhamento, reduzindo a energia disponível no receptor. Do ponto de vista físico, a influência da chuva é caracterizada pela atenuação específica, expressa em dB/km, a qual depende fortemente da frequência e da taxa instantânea de precipitação. A Recomendação ITU-R P.838 modela esse comportamento por meio da relação:

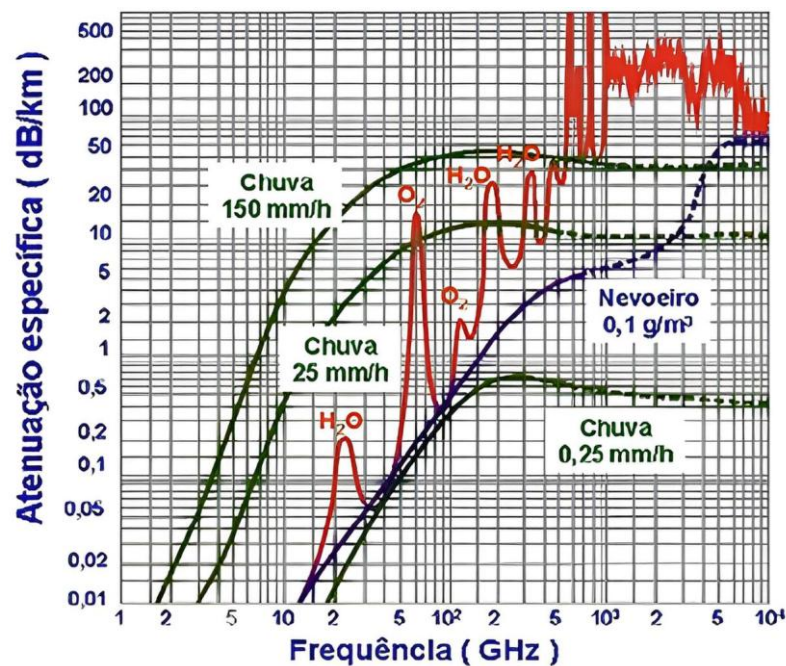
$$\gamma_R = K \cdot R^\alpha \quad (2.11)$$

Em que γ_R é a atenuação específica por chuva (dB/km), R é a taxa de precipitação (mm/h) e K e α são coeficientes dependentes da frequência e da polarização do sinal. Curvas

desse tipo, ilustradas na Figura 9, evidenciam que, para uma mesma taxa de chuva, a atenuação cresce rapidamente com a frequência, justificando a maior sensibilidade dos enlaces satelitais em bandas altas.

A atenuação por gases atmosféricos também é abordada na figura, essa atenuação está associada principalmente à absorção seletiva de energia eletromagnética por moléculas de oxigênio (O_2) e vapor d'água (H_2O). Diferentemente da chuva, esse mecanismo está presente mesmo em condições de céu claro, com picos de absorção em frequências específicas. Embora, em geral, sua contribuição seja inferior à da chuva, trata-se de uma perda contínua e inevitável, modelada pela Recomendação ITU-R P.676 (ITU, 2023a).

Figura 9 - Atenuação específica



Fonte: WHC Engenharia (2025)

Ressalta-se que essa curva representa apenas a atenuação por unidade de km, não incorporando aspectos estatísticos, climáticos ou geométricos do enlace. A abordagem adotada pela ITU-R vai além dessa caracterização pontual, considerando informações estatísticas regionais obtidas a partir de históricos meteorológicos. Para esse fim, a Recomendação ITU-R P.837 fornece os valores de taxa de precipitação excedidos por uma determinada fração do tempo, permitindo associar níveis de atenuação a percentuais específicos de indisponibilidade anual.

A estimativa completa das perdas atmosféricas em enlaces satelitais é realizada por meio do modelo estabelecido na Recomendação ITU-R P.618 (ITU, 2023), comumente adotado como padrão internacional. Esse modelo integra as contribuições de atenuação por chuva, nuvens, gases atmosféricos e seus respectivos efeitos estatísticos, considerando ainda a geometria do enlace. São levados em conta parâmetros como o ângulo de elevação da antena, o comprimento oblíquo do trajeto na troposfera, a altura efetiva da camada de chuva (ITU-R P.839) e os fatores de redução associados à não uniformidade espacial da precipitação.

A partir dessa integração, o modelo fornece a atenuação excedida por uma determinada porcentagem do tempo. Valores típicos como 0,01% correspondem a eventos meteorológicos extremos, caracterizados por chuvas intensas e raras, e estão associados às maiores degradações do enlace. De modo geral, quanto menor a fração de tempo considerada, mais severa é a condição climática representada, refletindo diretamente em maiores perdas atmosféricas previstas.

O software Link Budget Analyzer, utilizado no Capítulo 3, adota exatamente o modelo ITU-R P.618 para o cálculo das perdas atmosféricas. A atenuação é obtida a partir da frequência, dos parâmetros orbitais, da potência do transmissor, da posição geográfica do receptor e da disponibilidade desejada do enlace. Dessa forma, o simulador fornece uma estimativa consistente com os modelos meteorológicos globais utilizados pela ITU. Entretanto, algumas restrições são aplicadas conforme a própria recomendação: os cálculos só são realizados para ângulos de elevação entre 5° e 90°, pois valores inferiores produzem incertezas excessivas no comprimento do caminho atmosférico e não são recomendados para estimativas confiáveis (ITU, 2023; MathWorks, 2024).

O software também permite selecionar a Availability, isto é, a disponibilidade anual desejada (por exemplo, 95%, 99% ou 99,9%). Disponibilidades mais elevadas correspondem a percentuais menores de tempo nos quais o enlace pode falhar devido às condições climáticas, o que obriga o modelo a considerar cenários cada vez mais extremos de chuva. Assim, para uma disponibilidade de 99,9%, o simulador utiliza uma condição estatística equivalente às chuvas mais intensas e raras previstas para aquela localização, resultando nas maiores perdas por chuva e atmosfera dentro da faixa de operação considerada.

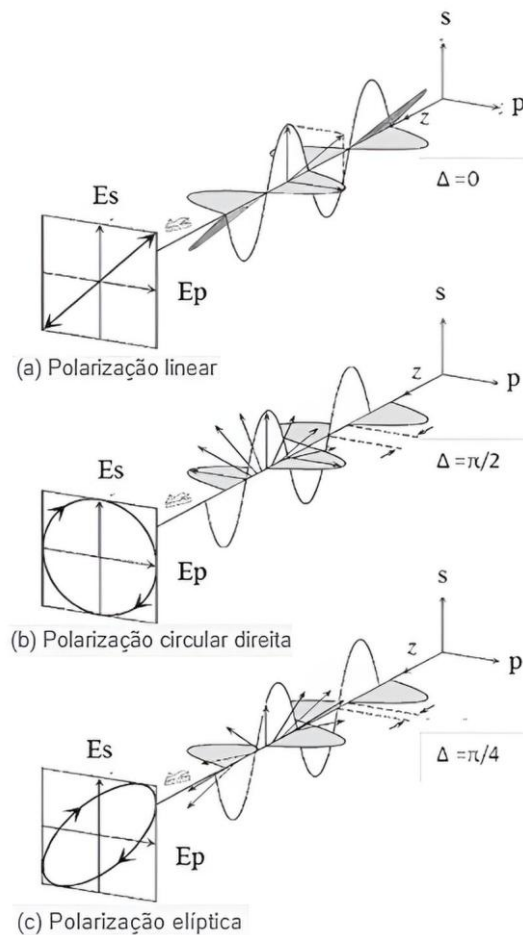
Por fim, vale mencionar que a chuva também impacta outros mecanismos físicos relevantes no enlace satelital. Dessa forma, suas contribuições adicionais serão aprofundadas nos subcapítulos 2.4.5 e 2.4.6.

2.4.5 Perdas por polarização

A perda por polarização ocorre quando existe um desalinhamento entre a polarização do sinal transmitido e a do sistema receptor, resultando em uma atenuação adicional no link budget. Esse fenômeno está diretamente relacionado à forma como o campo elétrico da onda se comporta no espaço.

Existem 3 tipos de polarização, cada uma com suas características e aplicações, como destaca-se na figura 9.

Figura 10 - Exemplos de estados de polarização.



Fonte: Zou et al. (2016).

Polarização Linear: O vetor campo elétrico oscila em uma direção constante, e é frequentemente utilizada em enlaces fixos, onde a orientação das antenas é controlada. No entanto, quando há desalinhamento entre a antena transmissora e receptora parte do sinal transmitido pode ser perdido (BALANIS, 2005).

Polarização Circular: O vetor do campo elétrico gira em formato circular com relação ao sentido de propagação. A rotação pode ser para a direita (RHCP) ou para a esquerda (LHCP) (BALANIS, 2005).

Polarização Elíptica: Caracteriza-se por uma trajetória resultante da combinação de componentes com amplitudes e fases diferentes nos eixos ortogonais. A polarização elíptica pode ocorrer naturalmente em meios de propagação distorcidos ou por imperfeições nos componentes do sistema (BALANIS, 2005).

É comum a mudança desse tipo de polarização a partir da propagação atmosférica, especialmente sob condições de chuva, e a geometria do enlace podem induzir despolarização, reduzindo a polarização desejada, e gerando uma polarização cruzada. Como resultado, parte da energia originalmente transmitida na polarização desejada é convertida em sua componente ortogonal, gerando o que se denomina polarização cruzada, definida como a polarização perpendicular ao plano da polarização original (ITU-R P.618-14, 2023).

Esse efeito é mais relevante em sistemas que utilizam polarização linear e estratégias de reuso de frequência por polarização, pois a degradação da discriminação entre os canais pode comprometer a qualidade do enlace. Para quantificar esse impacto, a Recomendação ITU-R P.618-14 apresenta um modelo estatístico consolidado para estimar a Cross-Polarization Discrimination (XPD), ou discriminação de polarização cruzada, com base nos dados de atenuação por chuva (ITU-R P.618-14, 2023).

A seguir, são apresentados os parâmetros necessários e o procedimento passo a passo, conforme descrito na recomendação, para a estimativa de XPD em função da atenuação.

Primeiramente, calcula-se o termo dependente da frequência (C_f):

$$C_f = \begin{cases} 60\log f - 28.3, & \text{para } 6 \leq f < 9 \text{ GHz} \\ 26\log f + 4.1, & \text{para } 9 \leq f < 36 \text{ GHz} \\ 35,9\log f - 11.3, & \text{para } 36 \leq f < 45 \text{ GHz} \end{cases} \quad (2.12)$$

Calculando-se o termo dependente da atenuação da chuva (C_A):

$$C_A = V(f) \cdot \log V(f) \quad (2.13)$$

Sendo $V(f)$ dado por:

$$\begin{aligned}
V(f) = \{ & 30.8f^{-0.21}, & \text{para } 6 \leq f < 9 \text{ GHz} \\
& 12.8f^{0.19}, & \text{para } 9 \leq f < 20 \text{ GHz} \\
& 22.6, & \text{para } 20 \leq f < 40 \text{ GHz} \\
& 13f^{0.15}, & \text{para } 40 \leq f \leq 55 \text{ GHz} \}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Melhoria por inclinação da polarização (C_τ):

$$C_\tau = -10 \log[1 - 0,484(1 + \cos 4\tau)] \tag{2.15}$$

Influência do ângulo de elevação (C_θ):

$$C_\theta = -40 \log(\cos \theta), \quad \theta \leq 60^\circ \tag{2.16}$$

Desordem das gotas (C_σ):

$$C_\sigma = 0,0053\sigma^2 \tag{2.17}$$

onde σ é o desvio-padrão da inclinação das gotas, sendo os valores 0° , 5° , 10° e 15° para 1%, 0,1%, 0,01% e 0,001% do tempo, respectivamente segundo a própria ITU.

Com esses valores é obtido a XPD por chuva (XPD_{rain}):

$$XPD_{rain} = Cf - CA + C\tau + C\theta + C\sigma \tag{2.18}$$

É definido que essas estatísticas são válidas para $6 \leq f \leq 55 \text{ GHz}$ e ângulos de elevação $\theta \leq 60$.

2.4.6 Perdas por temperatura de ruído

A temperatura de ruído do céu (T_{sky}) representa a contribuição térmica da atmosfera para o ruído recebido por uma antena de estação terrena apontada para o espaço. Esse ruído é resultante da emissão térmica das moléculas da atmosfera, especialmente oxigênio e vapor

d'água, bem como de hidrometeoros como gotas de chuva e, em algumas regiões, cristais de gelo.

Segundo a Recomendação ITU-R P.618-14, a modelagem da temperatura de ruído do céu para sistemas de telecomunicações por satélite pode ser feita através da seguinte equação:

$$T_{sky} = T_{mr} \cdot \left(1 - 10^{-\frac{A}{10}}\right) + 2,7 \cdot 10^{-A/10} \quad (2.19)$$

Sendo:

T_{sky} , a temperatura de ruído do céu (K),

T_{mr} , a temperatura média de radiação da atmosfera (K),

A , a atenuação atmosférica total ao longo do caminho de propagação (dB), excluindo efeitos de cintilação,

2,7 K corresponde à radiação cósmica de fundo.

A equação baseia-se no modelo de corpo negro, assumindo que parte da radiação térmica da atmosfera é absorvida e reemitida para a antena, enquanto outra parte permite a penetração da radiação cósmica.

A temperatura média de radiação atmosférica, T_{mr} depende da temperatura superficial local T_s , e pode ser estimada empiricamente por:

$$T_{sys} = T_{ant} + T_{sky} + T_{receiver} \quad (2.20)$$

Quando não se dispõe de dados meteorológicos locais confiáveis, a ITU recomenda utilizar um valor fixo de $T_{mr} = 275 \text{ K}$ como aproximação válida para condições médias em clima tropical e subtropical (ITU-R P.676-13, 2023).

Para regiões tropicais úmidas, como é o caso de análise deste trabalho, as principais fontes de ruído térmico atmosférico incluem vapor d'água (fortemente emissivo em micro-ondas), oxigênio molecular (atua principalmente em bandas entre 50 e 60 GHz), gotas de chuva, que aumentam tanto a atenuação como a emissão térmica da atmosfera. (ITU-R P.676-12, 2019).

Por outro lado, contribuições de hidrometeoros sólidos (como neve ou cristais de gelo) podem ser desprezadas neste cenário, já que a temperatura local raramente atinge níveis

propícios para sua formação. Com isso, a equação 2.18 fornece estimativas T_{sky} com um bom grau de confiabilidade, tornando-a adequada para sistemas GEO e LEO operando na região.

Este modelo é relevante para estações com receptores de baixo ruído (LNA), onde o ruído atmosférico passa a ser o fator dominante no orçamento de ruído. A correta avaliação de T_{sky} permite definir a temperatura equivalente de ruído do sistema (T_{sys}) e calcular o parâmetro G/T (ganho por temperatura), usado na análise de desempenho do enlace (ITU-R P.676-13, 2023).

$$G/T = G_{antena} \text{ (dBi)} - 10\log(T_{sys}) \quad (2.21)$$

2.4.7 Perdas em espaço livre

A perda de espaço livre (FSPL, do inglês Free Space Path Loss) corresponde à atenuação que um sinal sofre ao se propagar em linha reta no espaço, sem obstáculos, devido ao espalhamento esférico da onda eletromagnética. Em termos físicos, essa perda está associada à redução da densidade de potência à medida que a onda se afasta da fonte emissora, distribuindo-se em uma área cada vez maior. Trata-se, portanto, de um fenômeno fundamental e inevitável em qualquer sistema de comunicações sem fio, incluindo enlaces via satélite (RODDY, 2006).

A equação geral que descreve a FSPL em decibéis é expressa por:

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 92,45 \quad (2.22)$$

Em que d representa a distância entre transmissor e receptor (em quilômetros) e f a frequência de operação (em giga-hertz). A constante 92,45 resulta da conversão das unidades do Sistema Internacional para o cálculo em dB (ITU-R P.525-4, 2019).

Observa-se que o FSPL cresce linearmente em escala logarítmica tanto com a distância quanto com a frequência. Dessa forma, enlaces em órbitas mais elevadas ou em bandas de frequência mais altas (como Ku e Ka) estão sujeitos a perdas mais expressivas, exigindo maior potência transmitida ou antenas com maior ganho para manter a relação sinal-ruído adequada (NERI, 2009).

No contexto de comunicações via satélite, a FSPL é um dos termos de maior impacto no orçamento de enlace (link budget), sendo determinante na definição da viabilidade do

sistema. Para aplicações com CubeSats em órbita baixa (LEO), por exemplo, a FSPL é reduzida em comparação a satélites geoestacionários, devido à menor distância entre satélite e estação terrena. Entretanto, mesmo em órbitas baixas, a utilização de frequências elevadas pode tornar a perda significativa, o que reforça a importância de um cálculo preciso desse parâmetro (RODDY, 2006; ITU-R P.525-4, 2019).

2.4.8 Cálculo do Orçamento de Enlace e Determinação da Margem

Como foi definido as perdas que mais impactam o enlace de satélite, agora é importante abordar o cálculo que avalia a qualidade de um enlace satelital. Essa avaliação é realizada por meio do orçamento de enlace (link budget), que integra diversos parâmetros abordados, como parâmetros do transmissor, do meio de propagação e do receptor a fim de estimar a razão entre a potência útil recebida e o nível de ruído associado ao sistema. O indicador mais utilizado nesse contexto é a relação C/No (Carrier-to-Noise Density), que representa a potência da portadora na entrada do receptor e a densidade espectral de ruído térmico (Roddy, 2006; MathWorks, 2024).

A potência recebida C pode ser definida como a potência efetivamente entregue à entrada do receptor após a aplicação de todos os ganhos e perdas do enlace. De maneira geral, essa potência é expressa como:

$$C = P_R = P_T + G_T + G_R - L_P - L_O \quad (2.23)$$

Já a densidade espectral de ruído No é definida pelo produto entre a constante de Boltzmann k e a temperatura de ruído equivalente do sistema T_S.

$$No = KT_S \quad (2.24)$$

Sendo $K = 1,38 * 10^{-23}$ (J/K).

Dessa forma, utilizando as equações 2.21 e 2.22 tem-se a relação C/No dado por:

$$\frac{C}{No} = EIRP + \frac{G}{T} - L_P - L_O - K \quad (2.25)$$

Uma vez determinado o C/N_0 , é possível calcular a razão E_b/N_0 , que expressa a energia por bit em relação à densidade espectral de ruído e é o parâmetro determinante para o desempenho do esquema de modulação utilizado (Roddy, 2006). A conversão entre C/N_0 e E_b/N_0 é dada por:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N_0} - 10 \log(R_b) - 60 \quad (2.26)$$

Em que R_b é a taxa de transmissão do enlace em megabits por segundo. Esse valor representa o desempenho efetivo do enlace sob as condições reais do canal, considerando potência recebida, ruído térmico, taxa de bits e perdas atmosféricas.

Por fim, a margem do enlace é calculada pela diferença entre o E_b/N_0 recebido e o E_b/N_0 mínimo para que o sistema atenda ao critério de desempenho estabelecido, normalmente em termos de taxa de erro de bit (BER):

$$Margem = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{recebido} - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{requerido} \quad (2.27)$$

Uma margem positiva indica que o enlace opera com folga suficiente para compensar flutuações de potência resultantes de fenômenos atmosféricos, apontamento, variações térmicas ou instabilidades do amplificador. Por outro lado, margens negativas revelam que o enlace se encontra abaixo do limiar necessário para garantir a integridade da comunicação, tornando-o vulnerável a interrupções mesmo sob condições climáticas moderadas (Roddy, 2006; ITU, 2024).

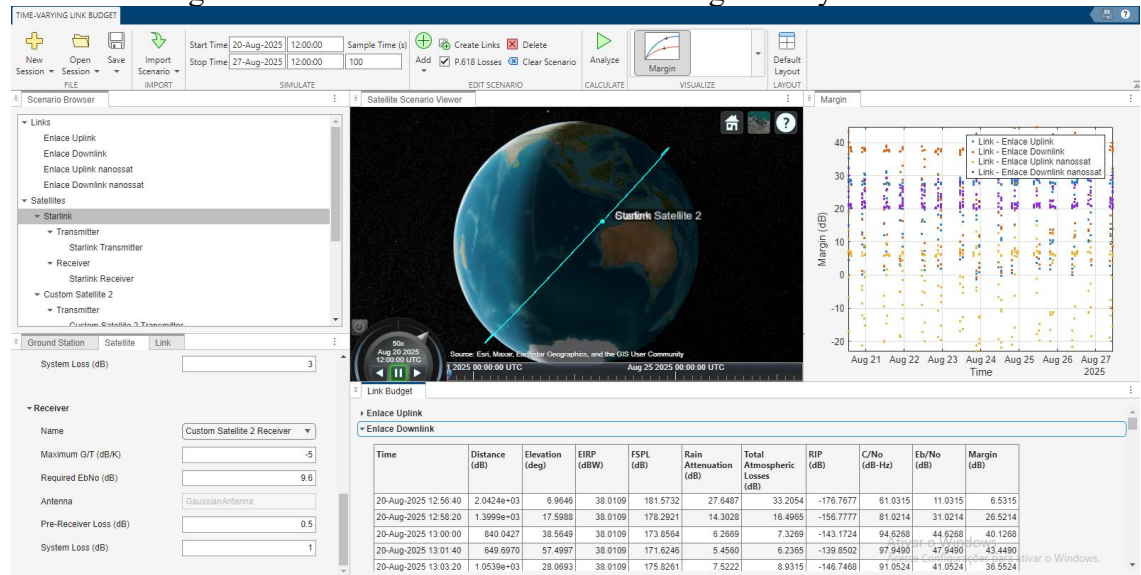
3. METODOLOGIA E CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para a realização das simulações que compõem a parte prática deste trabalho. O objetivo principal é detalhar o ambiente computacional utilizado, os parâmetros configurados e o procedimento aplicado para a modelagem do enlace de comunicação entre a estação terrena e o nanossatélite. Inicialmente, na Seção 3.1, é apresentada uma descrição geral do software empregado nas simulações, destacando suas funcionalidades, limitações e justificativas para sua escolha. Em seguida, na Seção 3.2, são definidos os parâmetros utilizados no modelo, incluindo as características do satélite, da estação terrena, do enlace e das condições de propagação que influenciam diretamente o desempenho do sistema. Esse levantamento de dados é importante para comparação entre o nanossatélite e os satélites de referência no capítulo 4.

3.1 Descrição geral da abordagem

O presente estudo foi conduzido por meio de simulações computacionais utilizando o software MATLAB, com o objetivo de avaliar o comportamento das perdas em enlaces de comunicação de nanossatélites em órbita baixa (LEO). Essa abordagem metodológica foi adotada por permitir a avaliação detalhada de sistemas de comunicação satelital, incorporando parâmetros físicos, ambientais e operacionais que influenciam diretamente o desempenho do enlace. No contexto deste trabalho, foi empregada a ferramenta Satellite Link Budget Analyzer, que integra de forma interativa os principais elementos necessários para a análise de enlaces via satélite, conforme visto a interface na figura 11. Essa ferramenta possibilita configurar parâmetros orbitais, características das antenas, potência de transmissão, condições atmosféricas e demais fatores essenciais à simulação, facilitando a visualização integrada do desempenho do sistema.

Figura 11 - Interface do Satellite Link Budget Analyzer.



Fonte: Autor (2025).

Para a realização das simulações, tornou-se necessário inicialmente definir os parâmetros de operação tanto da estação terrena quanto do satélite (detalhados no subcapítulo 3.2), contemplando os enlaces de uplink e downlink. A Figura 12 apresenta a janela de configuração dos parâmetros orbitais e das propriedades de transmissão e recepção do satélite.

Figura 12 - Parâmetros do satélite.

Add satellite by

☒ Orbital Elements

☐ TLE file

Satellite Name: Custom Satellite 1

Semi Major Axis (m): 1e+07

Eccentricity: 0

Inclination (deg): 50

Right Ascension of Ascending Node (deg): 0

Argument of Perapsis (deg): 0

True Anomaly (deg): 0

Orbit Propagator: sgp4

☒ Add default transmitter

► Default Transmitter Properties

☒ Add default receiver

► Default Receiver Properties

Add Satellite Cancel

Fonte: Autor (2025).

Além disso, o software exige a definição dos parâmetros da estação terrena, incluindo suas coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) e características do sistema de comunicação associado. Esses valores são essenciais para que o simulador calcule corretamente o ângulo de elevação, as perdas associadas ao enlace e também a margem obtida.

Após a configuração completa dos parâmetros, a simulação pode ser executada. O software gera, então, uma tabela de resultados contendo os valores calculados para cada variável envolvida no orçamento de enlace. Essa tabela servirá de base para a avaliação apresentada no Capítulo 4, no qual os resultados serão discutidos de forma comparativa.

Figura 13 - Tabela de valores obtidos.

Enlace Uplink											
Enlace Downlink											
Time	Distance (dB)	Elevation (deg)	EIRP (dBW)	FSPL (dB)	Rain Attenuation (dB)	Total Atmospheric Losses (dB)	RIP (dB)	C/No (dB-Hz)	Eb/No (dB)	Margin (dB)	
20-Aug-2025 12:56:40	2.0424e+03	6.9646	38.0109	181.5732	27.6487	33.2054	-176.7677	61.0315	11.0315	6.5315	
20-Aug-2025 12:58:20	1.3999e+03	17.5988	38.0109	178.2921	14.3028	16.4965	-156.7777	81.0214	31.0214	26.5214	
20-Aug-2025 13:00:00	840.0427	38.5649	38.0109	173.8564	6.2669	7.3269	-143.1724	94.6268	44.6268	40.1268	
20-Aug-2025 13:01:40	649.6970	57.4997	38.0109	171.6246	5.4560	6.2365	-139.8502	97.9490	47.9490	43.4490	
20-Aug-2025 13:03:20	1.0539e+03	28.0693	38.0109	175.8261	7.5222	8.9315	-146.7468	91.0524	41.0524	36.5524	
20-Aug-2025 13:05:00	1.6620e+03	12.8000	38.0109	179.7829	19.3276	22.3299	-164.1018	73.6973	23.6973	19.1973	
20-Aug-2025 13:06:40	2.3145e+03	4.1239	38.0109	182.6595	-	-	-144.6486	93.1506	43.1506	38.6506	
20-Aug-2025 14:38:20	2.6133e+03	1.0331	38.0109	183.7143	-	-	-145.7034	92.0958	42.0958	37.5958	
20-Aug-2025 14:40:00	2.3681e+03	3.5009	38.0109	182.8585	-	-	-144.8476	92.9515	42.9515	38.4515	
20-Aug-2025 14:41:40	2.2979e+03	4.2899	38.0109	182.5971	-	-	-144.5862	93.2130	43.2130	38.7130	

Fonte: Autor (2025).

3.2 Definição dos parâmetros

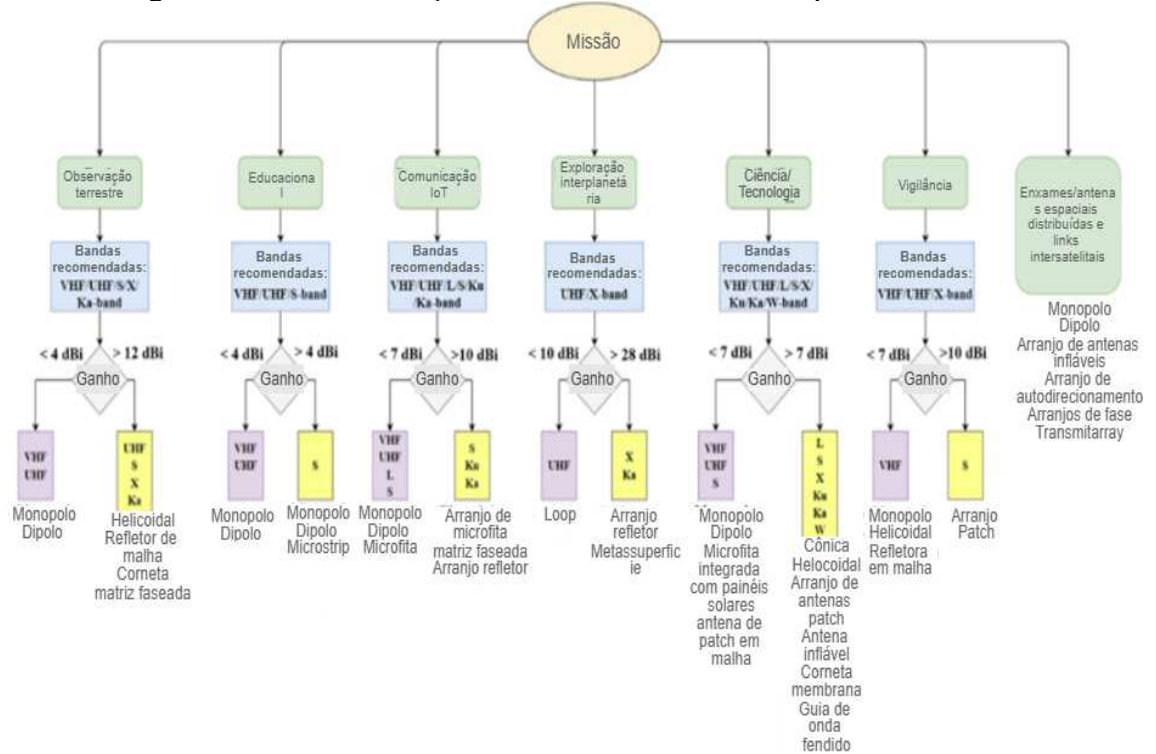
Nesta seção são definidos os valores dos parâmetros utilizados na simulação, fundamentados em levantamentos realizados na literatura especializada e em dados técnicos disponíveis sobre missões CubeSat.

3.2.1 Definição do ganho e banda de frequência

Primeiramente, foi analisado o estudo “A Survey on CubeSat Missions and Their Antenna Designs”, de Liu et al. (2023), o qual realizou uma avaliação de 120 missões CubeSat desenvolvidas entre 2003 e 2022, identificando as tendências de projeto adotadas em relação às faixas de frequência, tipos de antena e ganhos empregados em diferentes categorias de missão, conforme é abordado na figura 14. Com base nesse levantamento, foram definidos os

parâmetros que orientam a presente simulação, considerando o perfil de uma missão educacional, que tipicamente opera na banda S e emprega antenas de ganho superior a 4 dBi, como monopolo, dipolo ou patch, de acordo com as restrições físicas e energéticas inerentes a plataformas CubeSat.

Figura 14 - Guia de seleção de antenas e faixas de frequência.

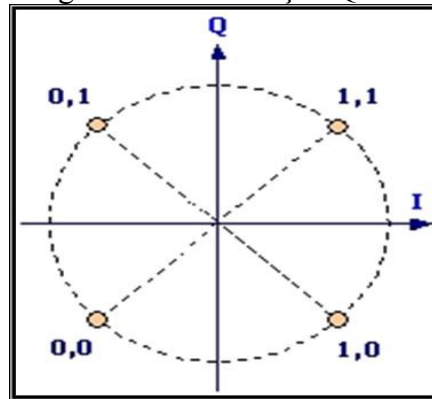


Fonte: Adaptado de Liu et al. (2023).

3.2.2 Definição do esquema de modulação

Para o enlace de comunicação proposto, foi adotado o esquema de modulação QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), amplamente utilizado em sistemas de comunicação via satélite devido ao seu equilíbrio entre eficiência espectral e robustez ao ruído (CCSDS 401.0-B-32, 2022). Essa modulação permite a transmissão de dois bits por símbolo, dobrando a eficiência espectral em relação ao BPSK, sem exigir aumento significativo na relação sinal-ruído (C/N) necessária para manter níveis aceitáveis de erro.

Figura 15 - Modulação QPSK.



Fonte: Teleco (2024).

De acordo com as recomendações do Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS 401.0-B-32, 2022), a modulação QPSK é uma das mais empregadas em enlaces de telemetria e telecomando na banda S, sendo compatível com amplificadores de potência moderadamente lineares e sistemas de antenas compactos, como os utilizados em CubeSats. Além disso, conforme apontado por Maral e Bousquet (2009), o QPSK mantém bom desempenho sob condições de ruído térmico e interferência, tornando-se uma escolha técnica adequada para missões de pequeno porte que operam com restrições energéticas e de espaço físico.

Embora o Satellite Link Budget Analyzer (MathWorks, 2024) não exija a especificação direta da modulação, sua definição é essencial para a interpretação dos resultados da simulação, especialmente em relação a razão E_b/N_0 e à taxa de erro de bit (BER). Para a modulação QPSK, é possível calcular essa relação. Definindo uma BER de 10^{-5} é possível obter o E_b/N_0 correspondente com base na seguinte equação:

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (2.27)$$

$$10^{-5} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (2.28)$$

$$\frac{2E_b}{N_0} = (Q^{-1}(10^{-5}))^2 \quad (2.29)$$

Sendo a função $Q(x)$ a probabilidade de que uma variável aleatória com distribuição gaussiana padrão seja maior que x . Essa função é possível obter a partir de materiais teóricos de comunicação digital e também por meio da função $qfunc(x)$ no MATLAB, desta forma:

$$\frac{E_b}{N_0} \approx 9,6 \text{ dB} \quad (2.30)$$

3.2.3 Parâmetros da estação terrena

A estação terrena considerada neste trabalho foi definida como localizada no campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em Uberlândia – MG, Brasil. Essa escolha está alinhada ao contexto da pesquisa, cujo propósito inclui a avaliação de cenários realistas de operação nanossatélite em ambiente acadêmico. As coordenadas geográficas adotadas são: latitude $-18,919182^\circ$, longitude $-48,258902^\circ$, com altitude aproximada de 870 m em relação ao nível do mar, conforme informações obtidas via Google Earth Pro e base de elevação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024).

Esses valores servem como base comum para a avaliação do desempenho do enlace com três cenários distintos: o nanossatélite em órbita LEO e dois satélites de referência, sendo um representando características típicas do sistema Starlink e o outro baseado nas especificações do Intelsat 33e.

Quadro 1 – Parâmetros estação terrena transmissora.

Parâmetros	Valor base	Justificativa
Frequency	2.250 Ghz – Nanossatélite	Frequência de banda S, conforme visto no capítulo 3.2.1(LIU et al., 2023).
	12/14 Ghz – Referência Starlink/Intelsat	Frequências considerando a operação em bandas Ku/Ka (FCC, 2020).
EIRP	35 dBW – Referência Starlink	Valor de EIRP representativo dado a equação 2.4, com $PT(dBW) = 15$ dBW e $GT(dBi) = 20$ dBi (FCC, 2020).
	50 dBW – Referência Intelsat	EIRP representativo mais elevada por se tratar de um satélite GEO, foi utilizado $PT(dBW) = 30$ dBW (INTELSAT, 2021).
	20 dBW – Nanossatélite	Ganho da antena menor devido a frequência inferior tendo $GT(dBi) = 5$ e $PT(dBW) = 15$.
Bit rate	20 Mbps – Referência Starlink/Intelsat	Valor representativo uplink, considerando taxas de dezenas de Mbps observadas em sistemas como Starlink e Intelsat (FCC, 2020; INTELSAT, 2021).
	1 Mbps – Nanossatélite	Valor considerando limitações do Nanossatélite (Liu et al., 2023; Maral & Bousquet, 2009)
Rx G/T	10,2 dB/K	Valor dado o ganho da antena (30 dBi) para um sistema com ruído equivalente de 95 K.
Required Eb/No	4,5 dB	Comumente receptores de estações terrenas de alto desempenho operam com Eb/No entre 4 e 5 dB. (MARAL; BOUSQUET, 2009; CCSDS, 2022)

3.2.4 Parâmetros do nanossatélite

O nanossatélite analisado neste estudo foi configurado para operar em órbita baixa (LEO), considerando uma altitude de 500 km em relação à superfície terrestre. Essa escolha reflete um cenário típico de missões CubeSat acadêmicas, que operam predominantemente nessa faixa orbital devido ao menor custo de lançamento, menor tempo de revisita e boa relação custo-benefício para comunicações.

O Quadro 2 apresenta os parâmetros definidos para o nanossatélite, incluindo potência, banda de operação, requisitos de Eb/No e desempenho do receptor. Esses valores representam configurações características de CubeSats educacionais e científicos encontrados na literatura.

Quadro 2 – Parâmetros do nanossatélite.

Parâmetro	Valor base	Justificativa
Frequency	2.050 GHz	Frequência de banda S, comumente utilizada em missões educacionais (LIU et al., 2023).
EIRP	4,0 dBW	Valor de EIRP dado a equação 2.4, com $PT(\text{dBW}) = 0 \text{ dBW}$ e $GT(\text{dBi}) = 4 \text{ dBi}$ (LIU et al., 2023).
Bit rate	1 Mbps	Valor considerando as restrições dado um nanossatélite (LIU et al., 2023; MARAL & BOUSQUET, 2009).
Rx G/T	-25 dB/K	valor representativo de antenas de pequeno ganho ($\approx 4 \text{ dBi}$) e ruído térmico elevado ($\approx 700 \text{ K}$), dado a equação 2.20 (MARAL; BOUSQUET, 2009).
Required Eb/No	9,6 dB	Valor calculado no subcapítulo 3.2.2.

3.2.5 Parâmetros satélite de referência

Para fins de comparação e análise de desempenho, este trabalho também incorpora dois cenários adicionais de enlace: um baseado nas características típicas do sistema Starlink, sendo um LEO de alta capacidade, e outro representando um sistema GEO comercial, utilizando como referência o satélite Intelsat 33e, pertencente à série Intelsat EpicNG.

A inclusão desses dois sistemas não tem como objetivo reproduzir integralmente suas arquiteturas proprietárias, mas estabelecer pontos de comparação realistas para avaliar como o nanossatélite em órbita LEO se comporta frente a satélites LEO e GEO.

Os parâmetros apresentados no Quadro 3 foram selecionados com base em documentos técnicos da FCC e em valores consolidados na literatura, contemplando tanto características realistas de operação para terminais de usuário do Starlink quanto parâmetros representativos de satélites geoestacionários de alta capacidade, como o Intelsat 33e. Dessa forma, o quadro reúne configurações consistentes para ambos os cenários (FCC, 2020; Intelsat, 2021).

Quadro 3 - Parâmetros de referência.

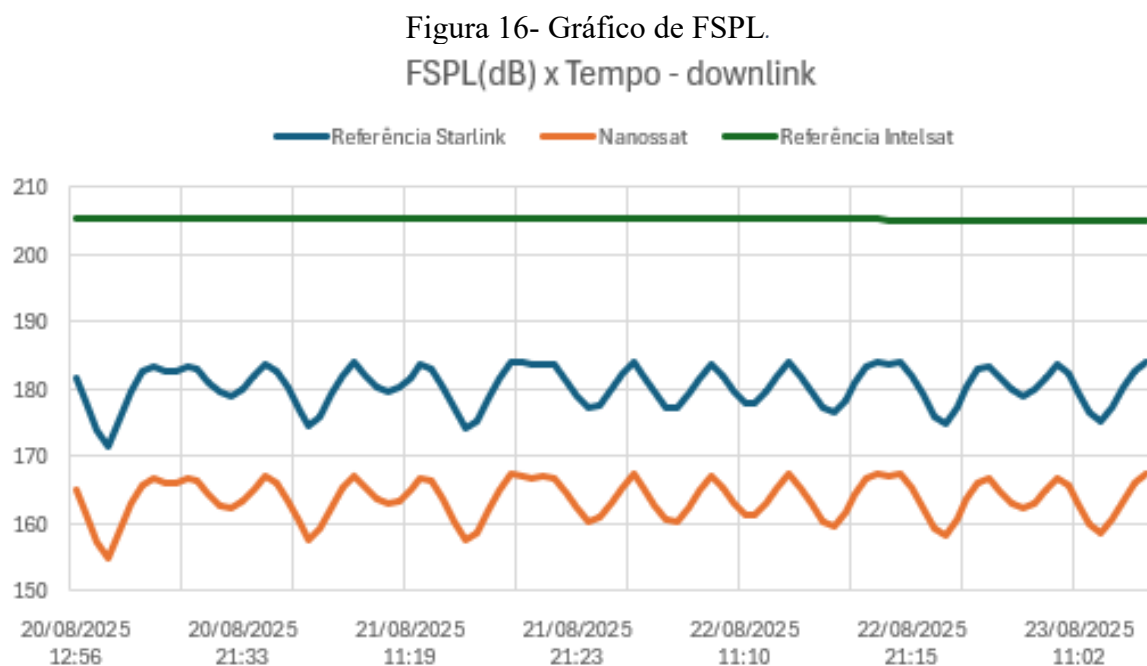
Parâmetro	Valor base	Justificativa
Frequency	14 GHz – Referência Starlink	Banda Ku/Ka, conforme descrito em documentação da FCC (FCC, 2020).
	12 GHz – Referência Intelsat	Intelsat 33e opera em Ku-band com downlink entre 10,7–12,75 GHz (INTELSAT, 2021).
EIRP	38 dBW – Referência Starlink	EIRP varia entre 35 e 42, conforme documentação técnica (FCC, 2020).
	50 dBW – Referência Intelsat	Satélites EpicNG utilizam feixes de alto ganho com EIRP entre 48 e 54 dBW. Típico para satélites GEO (INTELSAT, 2021; MARAL & BOUSQUET, 2009).
Bit rate	100 Mbps – Referência Starlink	Taxas de transmissão usuais de 50 a 150 Mbps, valor aproximado utilizado (FCC, 2020).
	50 Mbps – Referência Intelsat	Taxa representativa para enlaces VSAT e serviços corporativos em Ku-band fornecidos pelo Intelsat 33e (INTELSAT, 2021).
Rx G/T	11.5 dB/K	terminais Ku/Ka com antenas de alto ganho e receptores de baixo ruído, o G/T típico varia entre 10 e 15 dB/K (MARAL; BOUSQUET, 2009).
Required Eb/No	4,5 dB	Sistemas comerciais em banda Ku/Ka usam codificação avançada, reduzindo o Eb/No exigido para valores próximos de 4–5 dB. (MARAL; BOUSQUET, 2009; CCSDS, 2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os gráficos gerados a partir das simulações realizadas no Link Budget Analyzer do MATLAB, utilizando os parâmetros definidos previamente para o satélite baseado no Starlink, para o satélite geoestacionário com base no Intelsat e para o nanossatélite operando em banda S. Os resultados numéricos foram exportados para planilhas no Excel, possibilitando a geração dos gráficos comparativos entre os três sistemas.

4.1 Resultados Downlink

O primeiro conjunto de resultados refere-se à perda em espaço livre (FSPL) no enlace de downlink, cuja evolução temporal é representada na Figura 16.



Fonte: Autor (2025).

Ao analisar a Figura 16, percebe-se comportamentos distintos entre os três cenários avaliados. No caso do satélite baseado no Intelsat, observa-se que a FSPL permanece praticamente constante ao longo do tempo, característica típica de satélites geoestacionários, cuja distância até a estação terrena praticamente não sofre variações. A perda encontra-se próxima de 205 dB, com variações mínimas. Em contraste, tanto o satélite baseado no Starlink quanto o nanossatélite apresentam variações expressivas ao longo do tempo, conforme era

esperado para satélites em órbita baixa (LEO). O sistema baseado no Starlink, operando em banda Ku, apresenta valores de FSPL que variam entre aproximadamente 171,5 dB, quando o satélite se encontra mais próximo da estação terrena, até cerca de 184 dB, quando se afasta durante a passagem orbital. O nanossatélite, por sua vez, apresenta uma faixa de valores menor, variando de 155 dB e 167,5 dB, coerente com a operação em banda S, resultando em perdas significativamente inferiores às observadas para sistemas em Ku.

Após a avaliação gráfica, é possível relacionar os valores obtidos na simulação com os resultados previstos pela teoria de propagação em espaço livre. A perda em espaço livre pode ser estimada pela equação (2.21).

Aplicando-se a equação ao satélite geoestacionário, portanto:

$$FSPL_{Intelsat}(dB) = 20\log_{10}(36186) + 20\log_{10}(12) + 92,45$$

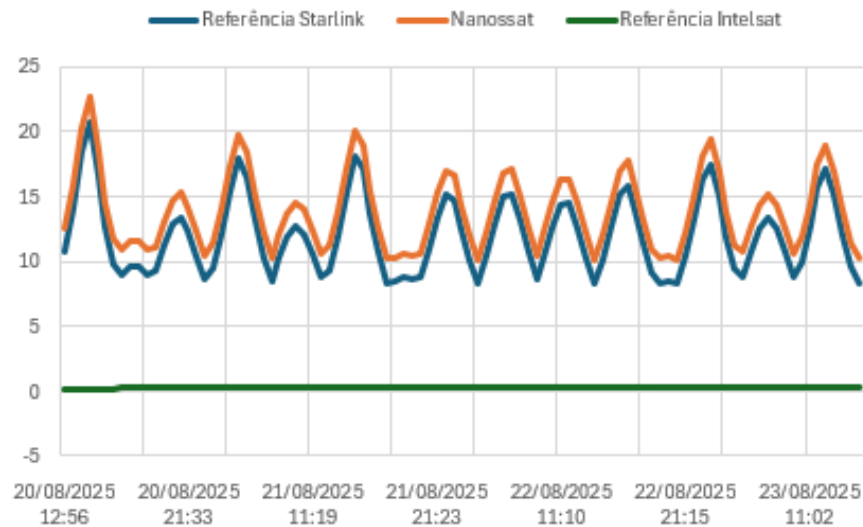
$$FSPL_{Intelsat}(dB) = 205,2 \text{ dB}$$

Um valor que corresponde ao comportamento observado na figura 16. Realizando a mesma operação para o satélite baseado no Starlink, que opera em banda Ku foi obtido a amostragem com menor distância em 645 km, onde obteve-se 171,57 dB e para a distância maior amostrada, de 2730 km foi obtido 184,1 dB. Já para o nanossatélite, operando em banda S (2,05 GHz) e variando na mesma altitude, os valores teóricos de perda situam-se entre aproximadamente 154,9 e 167,4 dB, novamente coincidindo com as curvas obtidas na simulação. Essa comparação direta demonstra que os resultados produzidos pelo MATLAB seguem rigorosamente a tendência esperada pela teoria, considerando a distância de cada satélite e sua respectiva frequência.

Após a análise das perdas em espaço livre, foi avaliado o comportamento da margem do enlace ao longo do tempo, conforme pode-se ver na figura 17.

Figura 17 - Margem do enlace.

Margem(dB) x Tempo - downlink



Fonte: Autor (2025).

A partir da Figura 17, observa-se que o nanossatélite apresenta uma variação de, aproximadamente, 10,1 dB a 22,6 dB, demonstrando uma certa folga comparada com o E_b/N_0 necessário (Required E_b/N_0), conforme visto a partir da equação (2.26).

$$\text{Margem} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{Recebido}} - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{Requerido}}$$

No caso do satélite baseado no Starlink, os valores simulados apresentam um comportamento similar, porém, com margens menores. Com valor mínimo de 8,2 dB, e valor máximo de 20,2 dB. Percebe-se uma diferença em relação ao nanossatélite, o motivo dessa diferença é devido ao impacto da taxa de transmissão mais elevada utilizada no Starlink, acaba gerando E_b/N_0 menor, como evidenciado na figura 18.

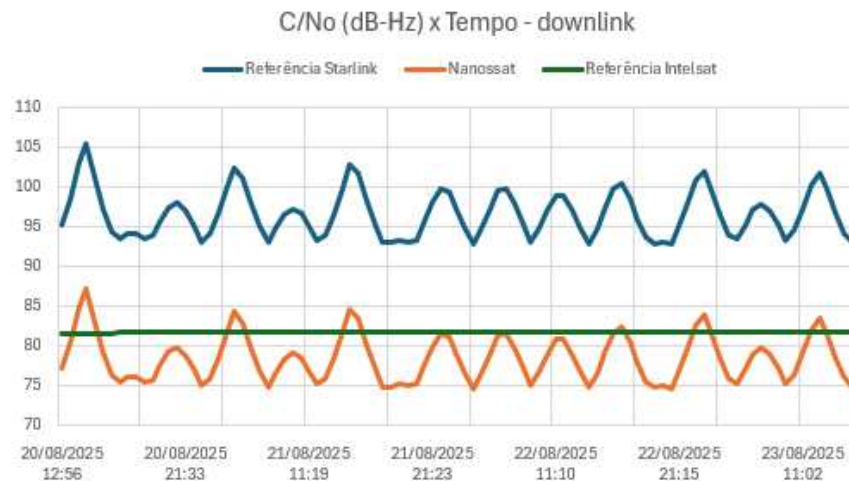
Além disso, a referência baseada no Intelsat, operando em órbita geoestacionária, apresentou uma margem praticamente constante ao longo do tempo, com valor de aproximadamente 0,2 dB, conforme o esperado, devido a alta taxa de transmissão e FSPL elevado.

E_b/N_0 considera a relação sinal-densidade de ruído, menos o impacto gerado pela taxa de bit, conforme visto na relação da equação (2.25):

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C}{N_o} - 10\log_{10}(R_b) - 60$$

Dessa forma, outra maneira de avaliar o desempenho seria a partir da relação sinal ruído, visto na figura 18, tirando o impacto da taxa de bit da análise.

Figura 18 - Relação sinal-densidade de ruído.



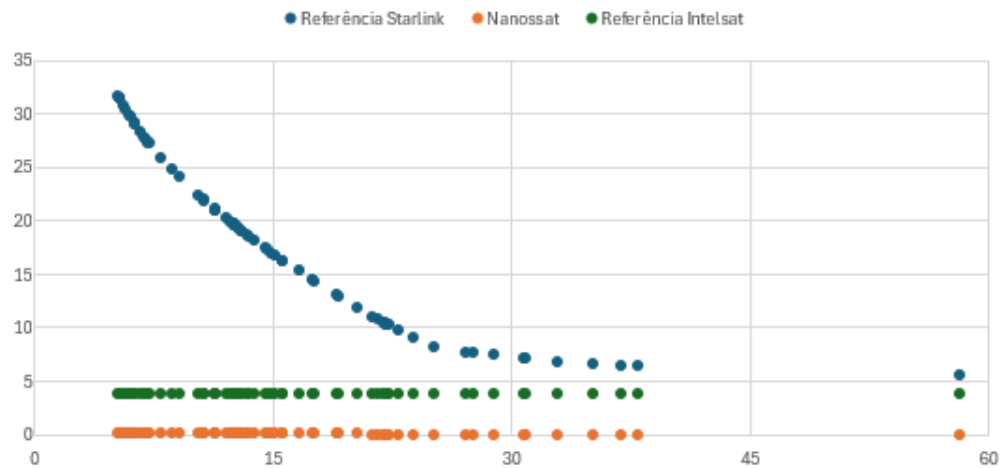
Fonte: Autor (2025).

A Figura 18 apresenta a evolução temporal de E_b/N_o para os três cenários analisados. Observa-se que a referência baseada no Starlink apresenta valores entre 105 dB-Hz e 93 dB-Hz. O nanossatélite apresenta uma tendência semelhante, porém com valores inferiores, variando aproximadamente entre 87 dB-Hz e 75 dB-Hz. Essa diferença, quando comparada à Figura 17, evidencia a necessidade de uma modelagem adequada da taxa de transmissão, dado o impacto direto que ela exerce sobre a margem final do enlace. Os fatores que influenciaram o desempenho inferior em relação ao Starlink incluem o menor EIRP e o menor G/T do nanossatélite, além da operação em banda S, que reduz a potência recebida devido ao menor ganho de antenas compactas nessa faixa de frequência.

O segundo cenário avaliado considera o impacto de chuva severa nos três enlaces, definindo o availability em 99,9%, ou seja, o pior cenário. Para essa análise, foi gerado um gráfico de dispersão no Excel relacionando a atenuação por chuva com a variação do ângulo de elevação, conforme visto na figura 19. A escolha dessa abordagem justifica-se pelo padrão estabelecido pela ITU-R P.618, segundo o qual ângulos de elevação menores resultam em trajetos mais longos dentro da camada de chuva, aumentando significativamente a atenuação. Assim, a análise foi conduzida considerando ângulos entre 5° e 90°, já que a recomendação não

inclui valores fora desse intervalo. Vale ressaltar que, embora o enlace baseado no Intelsat não apresente variação de ângulo de elevação por se tratar de um satélite geoestacionário, sua curva foi mantida no gráfico exclusivamente para comparação.

Figura 19 - Atenuação da chuva.
Atenuação da chuva (dB) x Elevação (deg) - downlink



Fonte: Autor (2025).

Ao observar a Figura 19, nota-se que o nanossatélite apresenta um impacto praticamente nulo da chuva ao longo de toda a variação angular. Isso ocorre porque a operação em banda S resulta em coeficientes de atenuação significativamente menores, conforme descrito nas recomendações ITU-R P.618. Além disso, a curta distância do enlace LEO, combinada com a elevada variação angular, reduz ainda mais o percurso dentro da camada de chuva, minimizando efeitos de absorção e espalhamento.

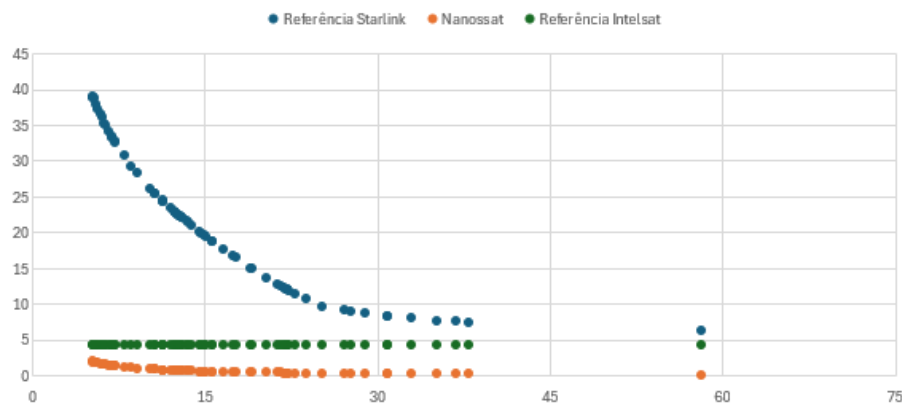
No caso da referência baseada no Intelsat, a atenuação permanece praticamente constante em torno de 5 dB. Isso ocorre porque o ângulo de elevação é fixo, por se tratar de um enlace GEO e, portanto, o comprimento do caminho na precipitação não se altera ao longo do tempo. Ainda assim, mesmo com um valor relativamente baixo de atenuação, o impacto para o Intelsat torna-se proporcionalmente relevante, pois o enlace GEO já opera sob perdas extremamente elevadas (superiores a 205 dB de FSPL), o que limita a margem disponível, conforme visto na figura 21.

Por fim, observa-se que o enlace Starlink apresenta o maior impacto de chuva entre os três cenários, especialmente em ângulos baixos. O máximo registrado ocorre na elevação próxima a 5°, onde a atenuação alcança aproximadamente 31,5 dB. Dessa forma, é possível comparar o desempenho dos satélites nesse cenário, com a Figura 9, que relaciona a taxa de

precipitação da chuva com a frequência, onde é visto que quanto maior a frequência maior será a atenuação ocasionada. Assim, para o melhor desempenho nesse contexto é importante reforçar o controle do ângulo mínimo de operação e da escolha de margens adicionais em regiões com alta taxa de precipitação.

Percebe-se um comportamento semelhante ao observado na atenuação por chuva quando se analisa a atenuação atmosférica total na figura 20, que engloba simultaneamente as perdas decorrentes da atmosfera (absorção gasosa por oxigênio e vapor d'água, conforme ITU-R P.676) e a atenuação por chuva, estimada segundo ITU-R P.618 e ITU-R P.838. O valor máximo encontrado para esse conjunto de perdas aproximou-se de 40 dB, predominando novamente nos enlaces de frequências mais elevadas.

Figura 20 - Atenuação atmosférica total.
Atenuação atmosférica total (dB) x Elevação (deg) - downlink

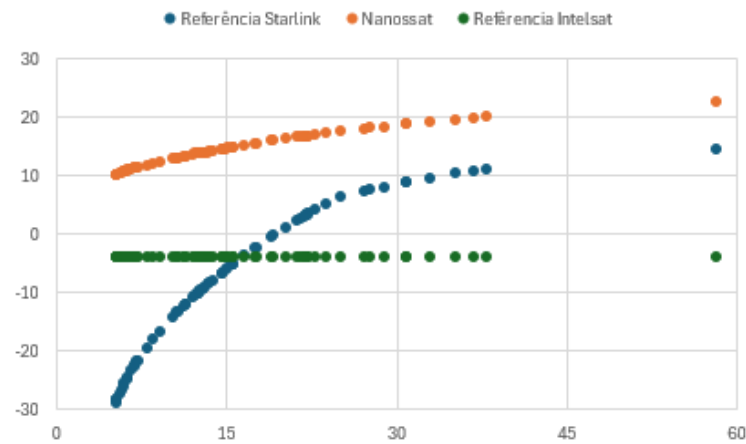


Fonte: Autor (2025).

Essa curva reforça a tendência já identificada anteriormente, enlaces em bandas Ku/Ka, como os representativos do Starlink e do Intelsat, são mais sensíveis às condições atmosféricas adversas devido aos coeficientes de absorção mais elevados nessas faixas. Em contraste, o enlace do nanosatélite em banda S praticamente não sofre impacto significativo, exibindo uma atenuação muito menor, condizente com a previsão dos modelos de propagação da ITU.

Por último, no enlace de downlink, com base na figura 21, evidencia-se o efeito acumulado dessas perdas na margem do enlace.

Figura 21 - Margem do enlace em condição de chuva intensa.
Margem (dB) x Elevação (deg) - downlink



Fonte: Autor (2025).

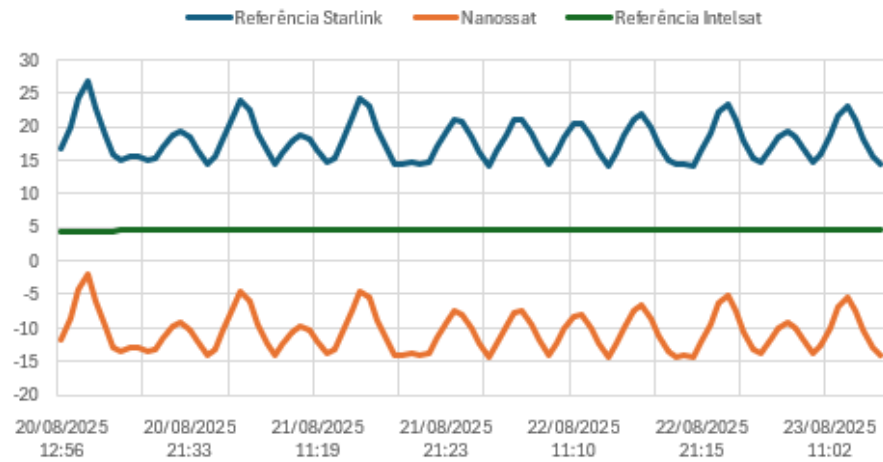
Tanto a referência baseada no Intelsat, com margem praticamente fixa em torno de -4 dB, quanto a referência baseada no Starlink, cujo valor mínimo se aproxima de -30 dB e máximo de cerca de 14 dB, apresentaram desempenhos insuficientes para atender ao E_b/N_0 requerido.

Por outro lado, o cenário do nanossatélite em banda S demonstra desempenho significativamente superior. Mesmo sob chuva intensa, sua margem variou entre aproximadamente 10 dB e 22 dB, permanecendo dentro de uma faixa operacional segura. Esse comportamento confirma a vantagem de enlaces em banda S para missões de pequeno porte em LEO, sobretudo pela menor sensibilidade aos efeitos de chuva e absorção atmosférica, além da menor distância de propagação que reduz o FSPL.

4.2 Resultados Uplink

Para o enlace de uplink, foram realizadas simulações considerando os três satélites como receptores. O comportamento inicial da perda em espaço livre (FSPL) praticamente reproduziu o padrão já observado no downlink, visto que a distância entre o terminal e o satélite é a mesma, e as frequências de uplink diferem pouco. Assim, a análise do uplink concentra-se nos efeitos atmosféricos e no desempenho do enlace, especialmente sob condições de chuva intensa, conforme é gerado o gráfico da margem na Figura 22.

Figura 22 – Margem do enlace uplink.
Margin(dB) x Tempo - Uplink

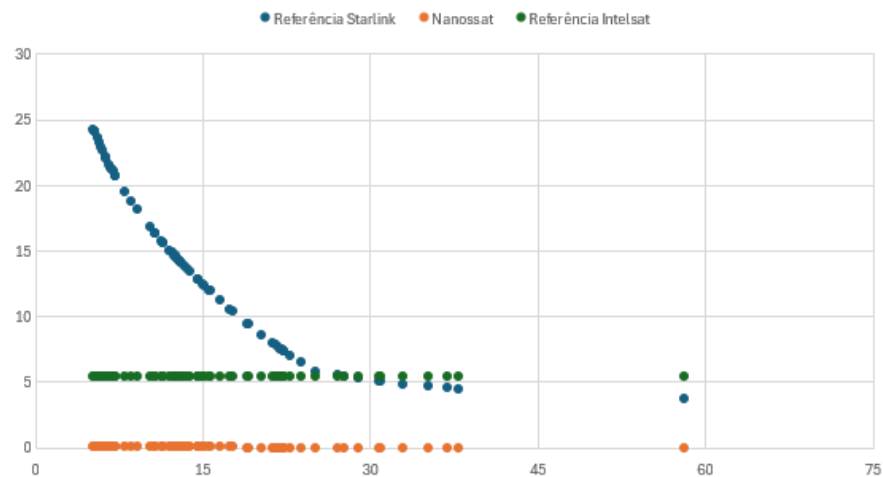


Fonte: Autor (2025).

A Figura 22 mostra a evolução temporal da margem para os três cenários. Tanto o enlace do Starlink quanto o do Intelsat apresentaram um desempenho satisfatório com base no E_b/N_0 necessário, contudo, o nanossatélite teve uma piora considerável no uplink se comparado com o enlace downlink. A margem manteve-se abaixo de 0, variando de -14,5 dB até -4,5 dB aproximadamente, mesmo com uma EIRP maior da estação terrena. Esses resultados obtidos podem ser explicados com base no termo $R_x G/T$ do quadro 2, onde foi calculado um valor de -25 dB/K, devido ao alto ruído térmico presente no sistema (≈ 700 K) e ao ganho reduzido da antena do nanossatélite.

A Figura 23 apresenta a atenuação por chuva em função do ângulo de elevação.

Figura 23 - Atenuação da chuva em uplink.
Atenuação da chuva (dB) x Elevação (deg) - Uplink



Fonte: Autor (2025).

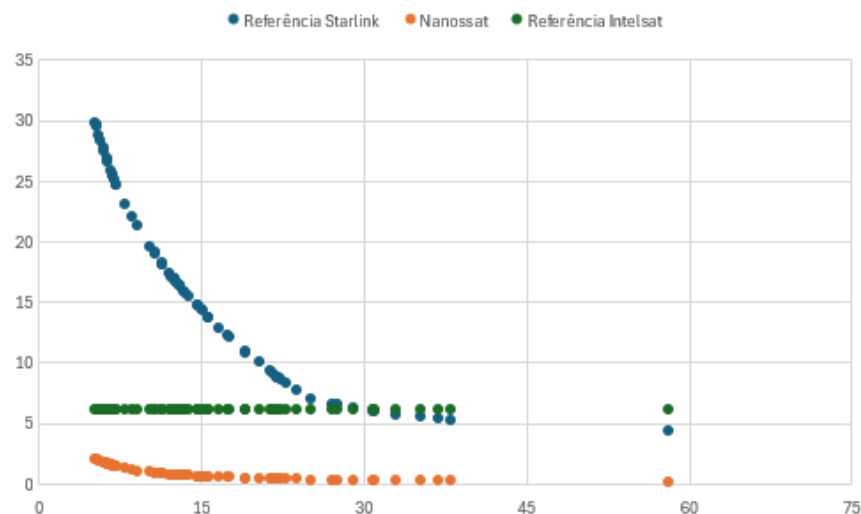
O enlace Starlink permanece como o mais sensível, atingindo valores próximos de 25 dB em ângulos próximos de 5°, reduzindo progressivamente até cerca de 4 dB à medida que o satélite se desloca e a elevação aumenta. O formato da curva segue o comportamento previsto pela ITU-R P.618, na qual apresenta crescimento significativo para ângulos inferiores a 10°.

O nanossatélite exibe valores próximos de zero em todo o trajeto, reforçando as conclusões obtidas no downlink, sistemas em banda S são muito menos suscetíveis à atenuação por hidrometeoros devido aos coeficientes de atenuação reduzidos, conforme ITU-R P.838. Já o enlace GEO, por sua vez, apresenta um valor constante de 5,2 dB, como esperado.

A Figura 24 mostra a atenuação atmosférica total, que combina absorção por gases atmosféricos, como oxigênio e vapor d'água, conforme ITU-R P.676, e atenuação por chuva considerando ITU-R P.618 e P.838.

Figura 24 - Atenuação atmosférica total uplink.

Atenuação atmosférica total (dB) x Elevação (deg) - downlink



Fonte: Autor (2025).

Observa-se que, para o Starlink, o valor máximo aumenta em cerca de 5 dB em relação ao caso em que apenas a chuva é considerada, demonstrando que, em frequências Ku/Ka, a absorção gasosa constitui parcela relevante das perdas, especialmente em condições úmidas.

Para o nanossatélite, o acréscimo é de aproximadamente 2 dB, permanecendo dentro de um nível baixo de impacto. O enlace GEO não apresenta mudanças significativas, uma vez que tanto o ângulo de elevação quanto as condições atmosféricas ao longo do percurso permanecem constantes.

5. CONCLUSÃO

A análise realizada ao longo deste estudo permitiu comparar o desempenho de três cenários distintos de enlace em downlink: um nanossatélite em banda S, uma referência baseada no Starlink em órbita baixa e um satélite geoestacionário baseado no Intelsat. Com base nos parâmetros definidos e nas simulações conduzidas no MATLAB, foi possível identificar como diferentes fatores, tais como frequência de operação, EIRP, G/T, taxa de transmissão, distância orbital e condições atmosféricas, influenciam a qualidade do enlace e determinam a margem disponível ao longo do tempo.

Inicialmente, as análises da perda por espaço livre demonstraram diferenças estruturais importantes entre as arquiteturas orbitais. O satélite geoestacionário apresentou uma FSPL da ordem de 205 dB, praticamente constante com o tempo, o que limita severamente sua margem, mesmo com valores elevados de EIRP. Em contraste, os enlaces do Starlink e do nanossatélite exibiram variações naturais decorrentes da órbita LEO, com perdas menores, o que contribuiu para margens mais favoráveis em alguns cenários.

Quando avaliada a margem do enlace sem chuva, observou-se que o nanossatélite apresentou desempenho superior aos demais. Esse resultado, entretanto, deve ser interpretado de forma cuidadosa. A análise da relação C/No revelou que o nanossatélite, apesar da boa margem, apresenta o pior desempenho em termos de portadora sobre densidade de ruído, principalmente devido ao seu baixo EIRP. Assim, fica evidente que a margem elevada só foi possível graças à adequada escolha da taxa de transmissão. Caso uma taxa maior tivesse sido utilizada, a relação de $10\log(R_b)$ reduziria substancialmente a margem, potencialmente levando o sistema a operar abaixo do limite aceitável. Essa situação reforça a importância entre a capacidade do nanossatélite e a taxa de dados pretendida.

Outro aspecto relevante diz respeito ao impacto das condições atmosféricas. A simulação com atenuação por chuva demonstrou que enlaces em bandas Ka/Ku, como os das referências Starlink e Intelsat, sofrem degradações significativas, especialmente em ângulos de elevação reduzidos, chegando a valores de atenuação superiores a 30 dB. Em comparação, o nanossatélite em banda S apresentou impacto praticamente desprezível, com atenuações muito baixas, compatíveis com o comportamento previsto pelos modelos da ITU. Esse resultado evidencia a adequação da banda S para missões de pequeno porte, não apenas por suportar antenas menores, mas por garantir maior robustez em cenários atmosféricos adversos.

Já durante a análise de uplink percebeu-se uma piora considerável no desempenho do nanossatélite, isso foi destacado devido ao elevado ruído térmico presente no sistema considerando um cenário realista e ao ganho reduzido da antena embarcada. Além disso, os outros dois satélites apresentaram um desempenho parecido entre uplink e downlink, demonstrando um sistema mais robusto de recepção.

De forma geral, os resultados mostram que o nanossatélite, mesmo com limitações ao seu porte, como menor EIRP e G/T reduzido, pode apresentar desempenho aceitável, desde que haja um dimensionamento adequado da taxa de bit e uma escolha criteriosa da banda de operação. Por outro lado, sistemas comerciais em Ku/Ka, embora muito superiores em capacidade, estão naturalmente mais expostos aos efeitos da chuva e da absorção atmosférica, exigindo margens maiores e técnicas avançadas de modulação e codificação para garantir disponibilidade elevada.

Assim, conclui-se que o enlace de um nanossatélite pode atingir desempenho satisfatório e até superior em termos de margem, desde que projetado considerando suas limitações estruturais e explorando vantagens, como a baixa FSPL em LEO e a atenuação reduzida da banda S. Esse equilíbrio entre requisitos energéticos, frequência de operação e taxa de transmissão é fundamental para garantir a viabilidade do enlace e o sucesso de uma missão.

5.1 Limitações e perspectivas futuras

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos nas simulações, algumas limitações foram identificadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e podem servir como diretrizes para estudos futuros.

Primeiramente, as simulações foram realizadas com base em variações parametrizadas de elevação, mas sem considerar fatores como perturbações orbitais, janelas de visada limitadas, variações de efeito Doppler durante a passagem e possíveis degradações do apontamento da antena da estação terrena. Estudos futuros podem empregar softwares de rastreamento orbital (como GMAT ou STK) combinados ao MATLAB para compor uma análise mais realista da operação diária do enlace.

Além disso, o estudo não abordou interferências provenientes de outras constelações ou satélites próximos, assim como não foi considerado a implementação de constelações, visto que geralmente os satélites em miniatura em órbita LEO operam em conjunto. Esses parâmetros podem impactar a relação portadora-ruído em cenários congestionados, especialmente em bandas compartilhadas.

Também se destaca a limitação associada à escolha de uma modulação e codificação fixas. Embora tenha sido evidenciado que a taxa de transmissão adequada pode garantir margens positivas mesmo em condições adversas, sistemas modernos empregam esquemas adaptativos de modulação e codificação (AMC) que ajustam dinamicamente o enlace conforme as condições do canal.

Por fim, uma perspectiva promissora envolveria o projeto e, conseqüentemente, o lançamento de um nanossatélite universitário, o que poderia validar tanto o modelo matemático quanto as escolhas de parâmetros feitas neste trabalho, além de permitir refinamentos no dimensionamento do enlace e nas estratégias de operação da estação terrena.

5.2 Considerações finais

Este trabalho buscou avaliar o comportamento dos enlaces de comunicação entre nanossatélites em órbita baixa e uma estação terrena localizada em Uberlândia, considerando parâmetros reais de operação e as principais fontes de perdas que impactam o desempenho do sistema. A partir das simulações desenvolvidas no MATLAB, foi possível compreender de forma aprofundada como fatores como potência de transmissão, ganho das antenas, taxa de bits, elevação orbital e, sobretudo, a atenuação por chuva influenciam a relação sinal-ruído e a margem final do enlace.

Os resultados obtidos apontam que, embora o nanossatélite apresente limitações claras em potência irradiada e dimensões físicas, que restringem o ganho de antena e o orçamento total de enlace, ainda assim é possível alcançar desempenho adequado quando o sistema é projetado com escolhas coerentes de parâmetros. Observou-se que a relação C/N_0 tende a ficar abaixo do ideal em grande parte da passagem, devido às restrições intrínsecas do CubeSat. Entretanto, a margem do enlace apresenta valores satisfatórios quando se utiliza uma taxa de transmissão compatível com a realidade do sistema, evidenciando que a seleção correta da taxa de bits é determinante para a viabilidade da comunicação.

Outro ponto relevante refere-se à escolha da banda S, que se mostrou tecnicamente apropriada para o cenário analisado. Como demonstrado, essa faixa de frequência apresenta menor sensibilidade à atenuação por chuva e por gases atmosféricos em comparação com bandas mais elevadas.

A análise conjunta dos resultados permite concluir que os enlaces de nanosatélites podem operar de forma estável mesmo sob restrições significativas, desde que haja um dimensionamento adequado baseado no conhecimento das limitações físicas e ambientais.

Por fim, este trabalho contribui para o aprimoramento do entendimento dos desafios inerentes às comunicações espaciais com CubeSats e reforça a importância de estudos contínuos, tanto em simulação quanto em validações experimentais, para o avanço das tecnologias de nanossatélites no contexto brasileiro e acadêmico.

6. REFERÊNCIAS

BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

CCSDS. **Radio Frequency and Modulation Systems—Part 1: Earth Stations and Spacecraft**. CCSDS 401.0-B-32, Blue Book, 2022.

CRANE, R. K. **Propagation Handbook for Wireless Communication System Design**. Boca Raton: CRC Press, 2003.

FORTESCUE, Peter; SWINERD, Graham; STARK, John. **Spacecraft Systems Engineering**. 4. ed. Chichester: Wiley, 2011.

GOOGLE. **Google Earth Pro. Mountain View**: Google LLC, 2024.

GÜNES, Mehmet C.; AKYILDIZ, Ian F. **Nanosatellite communication systems: link optimization and adaptive data strategies**. IEEE Access, v. 8, p. 123456-123470, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.xxxxxx.

HERNÁNDEZ, J.; GARCÍA, A.; LÓPEZ, M. **CubeSat link budget: elements, calculations, and examples**. In: IEEE International Conference on Satellite Communications (ICSC 2019), Madrid, 2019. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICSC.2019.xxxxxx.

HEVNER, Ryan; PIGNATELLI, Dan; BARNHART, David; POGUE, William; SWARTWOUT, Michael. **An overview of CubeSat mission results, failures, and lessons learned**. In: Proceedings of the 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, 2011.

HEWITT, J.; HOPKINS, J.; COLES, T. **CubeSat Handbook: From Mission Design to Operations**. Academic Press, 2019.

<https://www.whcengenharia.com.br/post/atenua%C3%A7%C3%A3o-por-chuva-em-comunica%C3%A7%C3%B5es-via-sat%C3%A9lite-an%C3%A1lise-e-implica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em: 13 jan. 2026.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base Cartográfica Contínua do Brasil** – Escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INTELSAT. **Intelsat 33e – Technical Specifications**. Washington, D.C.: Intelsat, 2021. Disponível em: <<https://www.intelsat.com/fleet/intelsat-33e/>>. Acesso em: 1 dez. 2025.

ITU. **Recommendation ITU-R P.372-16: Radio noise**. Geneva: International Telecommunication Union, Jul. 2022. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.372>. . Acesso em: 15 jul. 2025.

ITU. **Recommendation ITU-R P.525-4: Calculation of free-space attenuation**. Geneva: ITU, 2019.

ITU. **Recommendation ITU-R P.618-14: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems**. Geneva: International

Telecommunication Union, Aug. 2023. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618-14-202308-I/en>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ITU. **Recommendation ITU-R P.676-12: Attenuation by atmospheric gases and related effects**. Geneva: ITU, 2019.

ITU. **Recommendation ITU-R P.839-4: Rain height model for prediction methods**. Geneva: ITU, 2013. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.839-4-201309-I/en>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ITU-R. **Recommendation ITU-R P.676-13: Attenuation by atmospheric gases and related effects**. Geneva: ITU, 2022/2023.

ITU. **Recommendation ITU-R P.838-3: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods**. Geneva: ITU, 2005. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-I/en>. Acesso em: 15 jul. 2025.

JIAN, Jian; GAO, Houlian; WU, Shaohua; ZHANG, Qinyu. **Performance analysis of space information networks with backbone satellite relaying for vehicular networks**. *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 2017, p. 1–13, 2017. DOI: 10.1155/2017/4859835.

KHAWAJA, Wahab Gulzar; GUVENC, Ismail; JACOBSEN, Rune Hylsberg. **Propagation channel modeling for LEO satellite missions using ray-tracing simulations**. arXiv preprint arXiv:2507.14622, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2507.14622>. Acesso em: 1 dez. 2025.

LIU, Sining et al. **A Survey on CubeSat Missions and Their Antenna Designs**. *Sensors*, v. 23, n. 15, p. 6822, 2023. DOI: 10.3390/s23156822.

MARAL, Gérard; BOUSQUET, Michel. **Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology. 5. ed.** Chichester: Wiley, 2009.

MARAL, Gérard; BOUSQUET, Michel; SUN, Zhili. **Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology. 6. ed.** Hoboken: Wiley, 2020.

MATHWORKS. **Satellite Communications Toolbox – Link Budget Analysis**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/satcom/gs/satellite-link-budget.html>. Acesso em: 5 jul. 2025.

NASA. **State-of-the-Art Small Spacecraft Technology – Communications Section**. NASA Small Spacecraft Systems Virtual Institute (S3VI), 2023. Disponível em: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/soa-communications/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

NERI, Francisco. **Comunicações via Satélite**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

POGHOSYAN, Anoush; GOLKAR, Ali. **CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions**. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 88, p. 59–83, 2017. DOI: 10.1016/j.paerosci.2016.11.002.

PRATT, T.; BOSTIAN, C.; ALLNUTT, J. **Satellite communications. 3. ed.** Hoboken: Wiley, 2020.

PUIG-SUARI, J.; TURNER, C.; AKERSON, A. **Development of the Standard CubeSat Deployer and a CubeSat Class PicoSatellite**. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2001.

RICHHARIA, Madhavendra; WESTBROOK, Leslie David. **Satellite Systems for Personal Applications: Concepts and Technology**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

RODDY, D. **Satellite Communications**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

SKLAR, B. **Digital Communications: Fundamentals and Applications**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

SWARTWOUT, Michael. **The First One Hundred CubeSats: A Statistical Look**. Journal of Small Satellites (JOSS), vol. 2, no. 2, Dec. 2013.

TELECO. Modulação QPSK. Disponível em: <<https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialmodulacao/qpsk.asp>>. Acesso em: 1 dez. 2025.

TRESVIG, Johan L. **Design of a Prototype Communication System for the CubeSTAR Nano-satellite**. Oslo: University of Oslo, Department of Physics, 2010. Disponível em: <https://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/projects/cubestar/publications/master_presentation_tresvig.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2025.

UNITED STATES. Federal Communications Commission (FCC). **Order and Authorization: Space Exploration Holdings, LLC – Request for Orbital Deployment and Operating Authority for the SpaceX Gen2 NGSO Satellite System**. Washington, D.C.: FCC, 2022. Disponível em: <<https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-22-91A1.pdf>>.

VALLADO, David A. **Fundamentals of Astrodynamics and Applications**. 4. ed. Hawthorne: Microcosm Press, 2013.

WHC ENGENHARIA. **Atenuação por chuva em comunicações via satélite: análise e implicações**. Disponível em: <<https://www.whcengenharia.com.br/post/atenua%C3%A7%C3%A3o-por-chuva-em-comunica%C3%A7%C3%B5es-via-sat%C3%A9lite-an%C3%A1lise-e-implica%C3%A7%C3%B5es>>. Acesso em: 13 jan. 2026.

ZOU, Y.; WANG, X.; LIU, J. **Analysis of polarization characteristics of electromagnetic waves in satellite communications**. ResearchGate, 2016.