



Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica - ENE

**Modelagem de canal de comunicação via satélite sob degradações
troposféricas e ionosféricas em GNU Radio**

GUSTAVO HENRIQUE MOREIRA DE ALBUQUERQUE PEIXOTO

Monografia

BRASÍLIA – DF

2023

GUSTAVO HENRIQUE MOREIRA DE ALBUQUERQUE PEIXOTO

**Modelagem de canal de comunicação via satélite sob degradações
troposféricas e ionosféricas em GNU Radio**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro de Redes de Comunicação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Portela de
Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Renato Alves Borges

BRASÍLIA - DF

2023

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Tecnologia – FT
Departamento de Engenharia Elétrica – ENE
Curso de Engenharia de Redes de Comunicação – Bacharelado

Coordenador: Prof. Dr. Vinícius Pereira Gonçalves

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Paulo Henrique Portela de Carvalho (Orientador) – ENE/UnB
Prof. Dr. Renato Alves Borges (Coorientador) – ENE/UnB
Prof. Dr. Leonardo Aguayo (Examinador) – ENE/UnB

Ficha catalográfica

PP379m Peixoto, Gustavo Henrique
Modelagem de canal de comunicação via satélite sob
degradações troposféricas e ionosféricas em GNU Radio /
Gustavo Henrique Peixoto; orientador Paulo Henrique
Carvalho; co-orientador Renato Borges. -- Brasília, 2023.
156 p.

Monografia (Graduação - Engenharia de Redes de
Comunicação) -- Universidade de Brasília, 2023.

1. Telecomunicações. 2. Comunicações via satélite. 3.
Modelagem de enlaces via satélite. 4. Simulação via GNU
Radio. I. Carvalho, Paulo Henrique, orient. II. Borges,
Renato, co-orient. III. Título.

Endereço: Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte
CEP 70910-900
Brasília – DF – Brasil

GUSTAVO HENRIQUE MOREIRA DE ALBUQUERQUE PEIXOTO

Modelagem de canal de comunicação via satélite sob degradações troposféricas e ionosféricas em GNU Radio

Trabalho de Conclusão de Curso defendido sob a avaliação da comissão examinadora constituída por:

Prof. Dr. Paulo Henrique Portela de Carvalho (Orientador)
Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília

Prof. Dr. Renato Alves Borges (Coorientador)
Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília

Prof. Dr. Leonardo Aguayo (Examinador)
Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília

Data da aprovação: 28/07/2023

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão, que sempre me apoiaram, cuidaram de mim e me incentivaram a buscar mais conhecimento.

Dedico-o também aos demais membros da minha família, que me deram amor e carinho.

Por fim, este trabalho também é dedicado a todos meus professores e amigos, presentes e passados, que me garantiram aprendizado e experiências de vida.

Resumo

Neste trabalho, propõe-se a modelagem de enlaces de comunicações via satélite afetados por degradações atmosféricas, tanto causadas pela propagação da onda eletromagnética pela troposfera quanto pela ionosfera, no ambiente de simulação *GNU Radio*. Os resultados gerados pelo ambiente de simulação também permitem a realização de uma função de calculadora, uma vez que é possível alterar diversos parâmetros do enlace. Um estudo de caso é considerado no contexto da missão espacial AlfaCruz, que se encontra em órbita baixa, opera na banda de frequências UHF e foi projetado por integrantes do laboratório LODESTAR da Universidade de Brasília. Dessa forma, o trabalho é útil para o estudo comparativo da qualidade de enlaces de comunicações via satélite com alguma precisão.

Palavras-chave: telecomunicações; satélite; simulação; *GNU Radio*.

Abstract

In this study, the modeling of satellite communications links affected by atmospheric degradations, both the ones caused by the electromagnetic wave propagation through the troposphere and the ones caused by that propagation through the ionosphere, is proposed, using the *GNU Radio* simulation environment. The results generated by the simulation environment also allow the usage of the functions of a calculator, as it is possible to modify many link parameters. A case study is considered in the context of the space mission AlfaCruz, which has a low orbit, operates using the frequency band UHF and was projected by members of the laboratory LODESTAR from Universidade de Brasília. Thus, this work is useful for comparatively studying the quality of satellite communications links with some precision.

Keywords: telecommunications; satellite; simulation; *GNU Radio*.

Lista de símbolos

| | |
|------------|--|
| $A_{0,01}$ | Atenuação causada pela chuva que é excedida durante 0,01% do ano |
| A | Área de uma antena |
| a | Semieixo maior da órbita |
| $a(p)$ | Fator de percentual de tempo da cintilação troposférica |
| A_c | Atenuação troposférica por nuvens |
| A_{eff} | Área efetiva de uma antena |
| A_g | Atenuação troposférica por gases |
| A_o | Contribuição do gás oxigênio na atenuação por gases |
| A_r | Atenuação troposférica por chuva |
| A_{rec} | Área da antena receptora |
| A_s | Atenuação troposférica por cintilação |
| A_t | Atenuação troposférica total |
| A_w | Contribuição do vapor d'água na atenuação por gases |
| b | Semieixo menor da órbita |
| B | Coeficiente balístico |
| B^* | Coeficiente de arrasto B_{star} |
| B_{av} | Campo magnético médio da Terra |
| B_t | Banda do sinal de transmissão |
| C | Potência da portadora |
| c | Velocidade da luz no vácuo |
| C/N | Relação sinal-ruído analógica |
| D | Diâmetro da antena transmissora |
| D_{eff} | Diâmetro efetivo de uma antena |
| d_{es} | Distância entre o satélite e a estação terrena |
| e | Excentricidade da órbita |
| E_b | Energia por bit |
| E_c | Energia por bit de canal |
| e_l | Ângulo de elevação entre o satélite e a estação terrena |

| | |
|-------------------|--|
| e_s | Pressão parcial da superfície gerada pelo vapor d'água no local da estação terrena |
| f | Frequência de uma onda eletromagnética (ou de um enlace) |
| f_c | Frequência da portadora |
| f_{down} | Frequência do downlink |
| f_e | Achatamento da Terra |
| f_{if} | Frequência intermediária |
| f_m | Frequência do sinal mensagem |
| F_{max} | Maior componente de frequência do sinal |
| f_p | Frequência de relaxamento principal do dielétrico |
| f_s | Frequência de relaxamento secundária do dielétrico |
| f_s | Frequência de amostragem |
| f_{up} | Frequência do uplink |
| G | Ganho de uma antena |
| $g(x)$ | <i>Averaging factor</i> de uma antena |
| G_r | Ganho da antena receptora |
| G_r/T_s | Figura de mérito de um sistema |
| G_t | Ganho da antena transmissora |
| h_L | Altura da camada com cintilação |
| h_R | Altura da coluna de chuva |
| h_s | Altitude da estação terrena |
| h_{sat} | Altitude do satélite |
| i | Inclinação da órbita |
| k | Constante de Boltzmann |
| l | Número de bits utilizados por símbolo de modulação |
| L_{add} | Perdas adicionais |
| L_E | Comprimento efetivo do caminho chuvoso |
| L_{fs} | Perda por difusão no caminho pelo espaço livre |
| L_G | Projeção horizontal de L_S |
| L_R | Comprimento do caminho chuvoso |

| | |
|------------|--|
| L_{red} | Conteúdo colunar total de água líquida em nuvens a uma temperatura de 273,15 K |
| L_s | Comprimento do caminho inclinado abaixo da altura da chuva |
| L_{sc} | Comprimento efetivo do percurso com cintilação troposférica |
| m | Número de bits utilizados para cada nível de codificação |
| M_0 | Anomalia média |
| M_{cod} | Níveis de codificação |
| M_{mod} | Ordem de modulação |
| M_v | Anomalia verdadeira |
| N | Potência de ruído |
| n | Movimento médio |
| N_0 | Densidade espectral de potência do ruído |
| n_{cod} | Número de bits úteis após a codificação |
| $N_o''(f)$ | Parte imaginária da refratividade de rádio do gás oxigênio |
| $N_w''(f)$ | Parte imaginária da refratividade de rádio do vapor d'água |
| N_{wet} | Termo úmido da refratividade de rádio |
| p | Taxa de excedência dos valores de atenuação, ou taxa de indisponibilidade do sistema |
| P_1 | Potência de uma onda arbitrária 1 |
| P_2 | Potência de uma onda arbitrária 2 |
| P_b | Taxa de erro de bit na demodulação |
| P_c | Taxa de erro de bit na decodificação de canal |
| P_r | Potência da onda recebida |
| P_s | Pressão atmosférica instantânea no local da estação terrena |
| p_s | Pressão da superfície seca instantânea no local da estação terrena |
| P_t | Potência da onda transmitida |
| R | Taxa de símbolos |
| r | Distância entre as antenas receptora e transmissora |
| $R_{0,01}$ | Taxa de chuva excedida em 0,01% do ano |

| | |
|--|--|
| $r_{0,01}$ | Coeficiente de redução horizontal para o percurso chuvoso, considerando $R_{0,01}$ |
| r_{antena} | Raio de uma antena |
| R_b | Taxa de transmissão do sinal antes da codificação de canal |
| R_c | Taxa de transmissão do sinal após a codificação de canal |
| r_{cod} | Número de bits redundantes após a codificação |
| r_e | Raio da Terra |
| r_{sat} | Distância entre o satélite e o centro da Terra |
| $s(t)$ | Posição do satélite em relação ao receptor |
| sid_{dia} | Dia sideral no tempo de análise |
| sid_{ref} | Referência do dia sideral |
| sid_{sol} | Razão entre o número de dias solares e o número de dias siderais em um ano na Terra |
| T | Período da órbita |
| t | Tempo (instante de interesse) |
| t_0 | Época |
| T_c | Temperatura da água líquida presente nas nuvens |
| t_g | Atraso de grupo sobre o sinal devido ao efeito da ionosfera |
| T_s | Temperatura da superfície instantânea no local da estação terrena |
| T_s | Temperatura equivalente de ruído de um sistema |
| T_{samp} | Período de amostragem |
| $v(t)$ | Velocidade do satélite em relação ao receptor |
| $v_{0,01}$ | Coeficiente de ajuste vertical para o percurso chuvoso, considerando $R_{0,01}$ |
| v_{es} | Velocidade do satélite em relação à estação terrena |
| $v_{estx}, v_{esty} \text{ e } v_{estz}$ | Componentes nos eixos x, y e z, respectivamente, da velocidade da estação terrena em relação à Terra |
| $v_r(t)$ | Velocidade do receptor |
| $v_{satx}, v_{saty} \text{ e } v_{satz}$ | Componentes nos eixos x, y e z, respectivamente, da velocidade do satélite em relação à Terra |
| $v_t(t)$ | Velocidade do transmissor |

| | |
|---------------------------------------|--|
| $x_{est}, y_{est} \text{ e } z_{est}$ | Coordenadas da estação terrena nos eixos x, y e z, respectivamente, em relação à Terra |
| $x_{sat}, y_{sat} \text{ e } z_{sat}$ | Coordenadas do satélite nos eixos x, y e z, respectivamente, em relação à Terra |
| γ_0 | Contribuição do gás oxigênio na atenuação específica por gases |
| γ_R | Atenuação específica da chuva |
| γ_w | Contribuição do vapor d'água na atenuação específica por gases |
| Δf | Desvio de frequência por efeito Doppler |
| $\epsilon''(f)$ | Parte imaginária da permissividade dielétrica complexa da água |
| $\epsilon'(f)$ | Parte real da permissividade dielétrica complexa da água |
| η | Eficiência de radiação de uma antena |
| θ_F | Rotação de Faraday |
| λ | Comprimento de uma onda eletromagnética |
| λ_{sat} | Longitude do ponto subsatélite |
| ρ_0 | Valor de referência da densidade atmosférica terrestre |
| ρ_{cod} | Taxa de codificação |
| ρ_{wS} | Densidade de vapor d'água instantânea no local da estação terrena |
| σ | Desvio padrão da amplitude do sinal |
| σ_{ref} | Desvio padrão da amplitude de referência de um sinal |
| Φ | Densidade de potência radiada por uma antena |
| Φ_i | Densidade de potência radiada por uma antena isotrópica |
| φ_{sat} | Latitude do ponto subsatélite |
| ω | Argumento do periastro |
| Ω | Ascensão reta do nó ascendente |
| τ | Tempo desde a última passagem pelo periastro |

Lista de siglas

| | |
|-----------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AM | <i>Amplitude Modulation</i> |
| ASCII | <i>American Standard Code for Information Interchange</i> |
| AWGN | <i>Additive White Gaussian Noise</i> |
| BEP | <i>Bit Error Probability</i> |
| BER | <i>Bit Error Rate</i> |
| BPSK | <i>Binary Phase-Shift Keying</i> |
| CDM | <i>Code Division Multiplexing</i> |
| CEO | <i>Chief Executive Officer</i> |
| CSMA | <i>Carrier-Sense Multiple Access</i> |
| CTIPe | <i>Coupled Thermosphere Ionosphere Plasmasphere Electrodynamics Model</i> |
| DSB | <i>Double Sideband</i> |
| EIRP | <i>Effective Isotropic Radiated Power</i> |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| ESA | <i>European Space Agency</i> |
| FAP-DF | Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal |
| FDM | <i>Frequency Division Multiplexing</i> |
| GEO | <i>Geosynchronous Equatorial Orbit</i> |
| GLONASS | <i>Global Navigation Satellite System</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| GUI | <i>Graphical User Interface</i> |
| HEO | <i>Highly Elliptical Orbit</i> |
| HTML | <i>Hypertext Markup Language</i> |
| I.F | <i>Intermediate Frequency</i> |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IP | <i>Internet Protocol</i> |
| ISP | <i>Internet Service Provider</i> |
| ITU | <i>International Telecommunication Union</i> |
| JPEG | <i>Joint Photographic Experts Group</i> |
| L.O. | <i>Local Oscillator</i> |
| LEO | <i>Low Earth Orbit</i> |
| LODESTAR | Laboratório de Simulação e Controle de Sistemas Aeroespaciais |
| MEO | <i>Medium Earth Orbit</i> |
| NASA | <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| NORAD | <i>North American Aerospace Defense Command</i> |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PAM | <i>Pulse Amplitude Modulation</i> |
| PCM | <i>Pulse Code Modulation</i> |
| PSK | <i>Phase-Shift Keying</i> |

| | |
|-------------|--|
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| QAM | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> |
| QPSK | <i>Quadrature Phase-Shift Keying</i> |
| RAAN | <i>Right Ascension of the Ascending Node</i> |
| SC | <i>Supressed Carrier</i> |
| SDP | <i>Simplified Deep Perturbations</i> |
| SDR | <i>Software Defined Radio</i> |
| SGP | <i>Simplified General Perturbations</i> |
| TDM | <i>Time Division Multiplexing</i> |
| TEC | <i>Total Electron Content</i> |
| TLE | <i>Two-Line Element</i> |

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Origem e aplicações das comunicações via satélites | 1 |
| 1.2 Desafios | 2 |
| 1.3 Tecnologias atuais | 3 |
| 1.4 AlfaCrux | 4 |
| 1.5 Objetivos deste trabalho | 4 |
| 1.6 Estrutura da monografia | 5 |
| 2 Fundamentação teórica | 6 |
| 2.1 Satélites | 6 |
| 2.1.1 <i>Transponders</i> | 8 |
| 2.1.2 Baterias, propulsores e antenas..... | 11 |
| 2.1.3 Frequências de operação..... | 11 |
| 2.1.4 Órbitas | 14 |
| 2.1.5 <i>Two-line element set (TLE)</i> | 19 |
| 2.1.6 Sistema Horizontal de Coordenadas | 23 |
| 2.2 Fundamentos da Comunicação..... | 24 |
| 2.2.1 Etapas da comunicação | 26 |
| 2.2.1.1 Codificação de fonte e multiplexação | 27 |
| 2.2.1.2 Criptografia, codificação de canal e embaralhamento | 30 |
| 2.2.1.3 Modulação | 33 |
| 2.2.2 Comunicações sem fio | 35 |
| 2.2.2.1 Antenas e enlaces de comunicação | 35 |
| 2.2.2.2 Degradações do sinal..... | 45 |
| 2.2.2.2.1 Degradações troposféricas | 48 |
| 2.2.2.2.2 Degradações ionosféricas..... | 50 |
| 2.3 Textos lidos | 51 |
| 3 Metodologia, resultados e discussões | 55 |
| 3.1 Metodologia..... | 55 |
| 3.1.1 Estrutura da simulação | 56 |
| 3.1.2 Módulo Python | 66 |
| 3.1.2.1 Biblioteca <i>Requests</i> | 67 |
| 3.1.2.2 Biblioteca <i>PyEphem</i> | 71 |
| 3.1.2.3 Biblioteca <i>ITU-Rpy</i> | 78 |
| 3.1.2.3.1 Atenuação por gases atmosféricos..... | 82 |
| 3.1.2.3.2 Atenuação pela chuva..... | 85 |

| | |
|--|------------|
| 3.1.2.3.3 Atenuação pelas nuvens | 89 |
| 3.1.2.3.4 Atenuação por cintilação troposférica..... | 91 |
| 3.1.2.4 Biblioteca <i>Matplotlib</i> | 94 |
| 3.1.2.5 Cálculos das degradações ionosféricas | 98 |
| 3.2 Análise dos resultados..... | 102 |
| 3.2.1 Estrutura geral dos resultados da simulação | 102 |
| 3.2.2 Algumas comparações de resultados com o <i>site N2YO</i> | 112 |
| 3.2.3 Algumas comparações de resultados com o <i>site Orbtrack</i> | 120 |
| 3.2.4 Efeito da variação de parâmetros do enlace nos resultados..... | 126 |
| 3.2.5 Um resultado com parâmetros aplicados a um enlace com o satélite AlfaCruz .. | 130 |
| 4 Conclusões | 135 |
| Referências | 136 |

1 Introdução

Este capítulo apresenta as motivações e os objetivos do trabalho, um pouco da história das comunicações via satélites e a estrutura geral do texto da monografia.

1.1 Origem e aplicações das comunicações via satélites

A comunicação está presente na espécie humana há milhares de anos, e sempre foi um dos aspectos mais fundamentais da sociedade, até os tempos atuais. Mas a comunicação teve um início gradual e lento antes de se tornar tão rápida e eficiente quanto é hoje em dia. Segundo Serrano (2009):

Tais indicações comunicativas, compartilhadas por todos os membros do grupo, promovem e dão fôlego ao empenho humanizador:

- Primeiro, no início da humanização, se expressaram por meio de atuações indicativas gestuais. A comunicação gestual permitiu os primeiros rituais expressivos, porque ainda não existiam as linguagens faladas e articuladas.
- Muitíssimo mais tarde, as referências aos vínculos do grupo social com a Natureza são comunicadas nas narrações orais sobre a origem da comunidade e sobre o seu destino (que são os relatos míticos). Rituais e mitos alimentam, desde então, representações sobre a utilidade, sobre a necessidade, sobre o valor, sobre a identidade dos grupos de pertencimento.

Após o surgimento da fala, a comunicação evoluiu para a forma escrita em pedras e paredes, possibilitando que ideias perdurassem por um longo tempo, permitindo a documentação da história das sociedades e a criação de normas e regras.

Depois disso, a comunicação escrita pôde ser realizada por meio de diversos canais móveis, como o papiro e o papel, fazendo com que fosse possível transportar mensagens para os mais distantes dos locais.

Ainda mais tarde, foi possível repassar a comunicação falada por meios físicos de longo alcance, como ondas de rádio e, pouco depois, tornou-se possível armazenar falas com gravadores de som. Então, o ser humano conseguiu transportar mensagens não só escritas, mas também faladas, por ondas de rádio ou por cabos. Essa forma de comunicação é a base das comunicações que utilizam satélites.

O primeiro satélite artificial lançado ao espaço pela humanidade foi o Sputnik-1, da ex-União Soviética, que enviava ondas de rádio que eram captadas por estações terrestres por fins de estudo científico. Seguindo o lançamento desse satélite em 1957,

vários outros foram enviados ao espaço ao longo dos anos, muitas vezes avançando a tecnologia empregada em suas partes e nos foguetes lançadores.

Atualmente, as comunicações via satélite estão se tornando cada vez mais presentes na vida da população humana. É possível verificar a participação de satélites artificiais em provimentos de serviços de televisão, acesso à Internet, serviços de posicionamento (como por exemplo GPS ou GLONASS), serviços de reconhecimento e sensoriamento, entre outras aplicações.

1.2 Desafios

O lançamento dos satélites artificiais em si é um procedimento extremamente custoso, dado que é preciso que um foguete transporte um satélite ou um carregamento deles para a altitude da órbita desejada. Segundo uma entrevista com o diretor executivo (CEO, do inglês *Chief Executive Officer*) da Arianespace, Stéphane Israël, o entrevistado afirma que “Quando se trata do Ariane 6, estamos entre US\$90 e US\$100 milhões, ao contrário do Ariane 5, que, em termos de custos, está por volta de US\$200 milhões” (SPACEFLIGHT NOW, 2015, tradução do autor). Os custos do trecho previamente citados se referem à produção dos foguetes lançadores.

Além do custo de lançamento, os satélites têm alto custo de fabricação, especialmente os geoestacionários, que normalmente são maiores e possuem dispositivos mais potentes, pois ficam mais distantes da crosta terrestre. Eles também precisam de combustível para ajustar sua posição de tempos em tempos, uma vez que saem da órbita desejada devido às forças que atuam sobre eles no espaço. Esse combustível dura uma certa quantidade de tempo e, quando ele esgota, o satélite para de funcionar, sendo necessário lançar um novo para substituir.

Satélites também precisam de bateria para alimentar os equipamentos eletrônicos presentes em seu interior. Normalmente, eles possuem células fotovoltaicas que convertem a luz do Sol em energia elétrica para permitir que os dispositivos operem de maneira correta. Isso implica um custo adicional na sua construção, além de um possível ponto de falha a mais, caso o painel solar não funcione corretamente.

Outros desafios presentes nas comunicações via satélites são aqueles relacionados às degradações dos sinais que os satélites transmitem ou recebem. A própria atmosfera terrestre e o caminho pelo espaço livre causam atenuações na

potência do sinal recebido de ambos os lados da comunicação, além de alterar outras características do sinal.

Também pode haver interferência por parte de outros satélites, de estações terrenas ou de outros dispositivos presentes na Terra, dado que o espectro eletromagnético é limitado e há uma série de bandas relativamente limitadas em que operam esses sistemas, sendo necessário reutilizar frequências em muitos casos.

De acordo com o *United States Government Accountability Office* (2020), o lançamento de vários satélites em órbita baixa gera um aumento de lixo espacial, o que pode danificar outros satélites, leva a uma maior emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera e refletem a luz solar, atrapalhando na observação astronômica.

Entre outros desafios experimentados por usuários desses sistemas, há a latência de comunicação relativamente alta entre um dispositivo na crosta terrestre e um satélite em órbita média ou geoestacionária, uma vez que a distância entre ambos é relativamente elevada, dificultando o provimento de serviços que necessitam de baixo atraso.

1.3 Tecnologias atuais

O estado da arte das comunicações via satélite vai sendo alterado à medida que novas tecnologias vão surgindo, mas uma das que podem ser destacadas é a tecnologia de sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto, segundo o documento 157 da EMBRAPA, “[...] pode contribuir significativamente por meio do fornecimento de uma visão rápida e acurada do setor agrícola, dada sua capacidade de coletar informações sobre vastas áreas com alta frequência de revisitas [...]” (ATZBERGER, 2013 apud BARBEDO, 2018, p. 9).

Dessa forma, é possível utilizar imagens provenientes de satélites para estudar o solo de uma área, detectar queimadas ou ações criminosas, entre outras utilidades. Sensoriamento de alta precisão é utilizado pela EMBRAPA, INPE e IBAMA, por exemplo, para avaliar o desmatamento e a incidência de queimadas sobre algumas regiões de vegetação.

Além do sensoriamento, há sistemas como o da Eutelsat, Viasat e Starlink que proveem acesso à Internet a pessoas ao redor do mundo, tendo como foco a

população que mora em áreas interioranas que não têm estrutura para receber acesso à internet por cabeamento.

Já os sistemas de localização, como GPS e GLONASS, permitem que os usuários usufruam de suas aplicações em diversos aparelhos, como telefones celulares, computadores ou até aparelhos menores, como relógios inteligentes. Com o avanço do tempo, esses sistemas melhoram a precisão da localização e o acesso aos seus serviços, e todos operam com o auxílio de satélites artificiais.

1.4 AlfaCruX

O satélite AlfaCruX é um satélite com fins didáticos e de rádio amador desenvolvido pelos integrantes do Laboratório de Simulação e Controle de Sistemas Aeroespaciais (LODESTAR) da Universidade de Brasília. O projeto foi coordenado pelo Prof. Dr. Renato Alves Borges. Foi financiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF) e lançado na missão *Transporter-4* do foguete *Falcon 9* da empresa *SpaceX*.

De acordo com Borges et al. (2022), o AlfaCruX é um satélite de órbita baixa que opera com um enlace *bent pipe* em 437,125 MHz, ou seja, esse enlace apenas armazena e reenvia dados recebidos de estações terrenas.

A órbita desse satélite é baixa, portanto ele realiza várias voltas completas em torno da Terra ao longo de um dia.

A missão do AlfaCruX é de caráter educacional, a fim de instruir alunos, professores e operadores de rádio amador na operação e nos fundamentos de comunicações via satélite, especialmente com satélites em órbitas baixas, para que futuramente seja facilitado o desenvolvimento de novas tecnologias nessa área.

1.5 Objetivos deste trabalho

Este trabalho tem como objetivo simular um enlace de comunicações entre um satélite e uma estação terrena, a fim de avaliar os efeitos de diversas degradações sobre o sinal transmitido por esse canal. Entre as degradações, podem-se citar atenuações troposféricas, desvio de frequência pelo Efeito Doppler, perda por percurso no espaço livre e algumas degradações ionosféricas.

Além disso, aprender mais sobre as etapas das comunicações via satélite também é uma finalidade deste trabalho.

O objetivo principal é aplicar essa simulação e esses estudos a um enlace entre o satélite AlfaCruz e uma estação terrestre, avaliando as atenuações presentes. Verificam-se os efeitos das degradações na relação sinal-ruído que chega ao receptor da comunicação simulada. É possível variar os parâmetros do enlace, como frequência de transmissão, ganho das antenas, entre outros.

Escolheu-se utilizar o ambiente *GNU Radio Companion* para a simulação, a fim de possibilitar futura integração do trabalho com Rádio Definido por Software (SDR, do inglês *Software Defined Radio*). O código dos módulos criados no *GNU Radio* foi todo feito na linguagem de programação *Python*, versão 3.10.5. Utilizou-se um ambiente virtual *Conda* para isolar e melhor gerenciar os aplicativos, bibliotecas e códigos utilizados.

1.6 Estrutura da monografia

O presente trabalho de conclusão de curso é dividido em quatro capítulos, sendo o primeiro de introdução, que detalha um pouco sobre a história e as dificuldades de comunicações via satélite, bem como sobre a missão AlfaCruz, o segundo de fundamentação teórica, que apresenta os conceitos e as equações fundamentais para o entendimento do trabalho, o terceiro de metodologia, resultados e discussão, que detalha como foi feita a simulação no ambiente GNU Radio e como as bibliotecas utilizadas operam, além de mostrar e comentar sobre alguns resultados obtidos, e o quarto de conclusões.

2 Fundamentação teórica

Este capítulo explica conceitos teóricos necessários para o entendimento da metodologia utilizada no trabalho e auxilia na interpretação dos resultados. Além disso, é feita uma breve revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes.

2.1 Satélites

Satélites artificiais são dispositivos construídos para serem colocados em órbita em torno da Terra ou de qualquer outro corpo celeste. Eles têm dispositivos chamados *transponders*, que são suas unidades básicas, têm baterias, placas solares, propulsores e antenas, entre outros componentes.

Segundo IPPOLITO JR. (2017, p. 1, tradução do autor), um satélite de comunicações é um satélite “[...] que recebe um sinal de comunicação de uma estação terrena transmissora, amplifica-o e possivelmente realiza um processamento nesse sinal, e o manda de volta ao solo para ser recebido por uma ou mais estações terrenas receptoras. ”. Portanto, eles permitem a comunicação entre um dispositivo terrestre e outro, apenas amplificando o sinal, ou então tratam um sinal de um dispositivo terrestre e o enviam de volta.

Eles possuem um papel importante nas comunicações, uma vez que, por estarem a centenas de quilômetros de altitude, têm uma visibilidade relativamente elevada da crosta terrestre, conseguindo receber informações de ou transmitir para estações terrenas em lugares remotos.

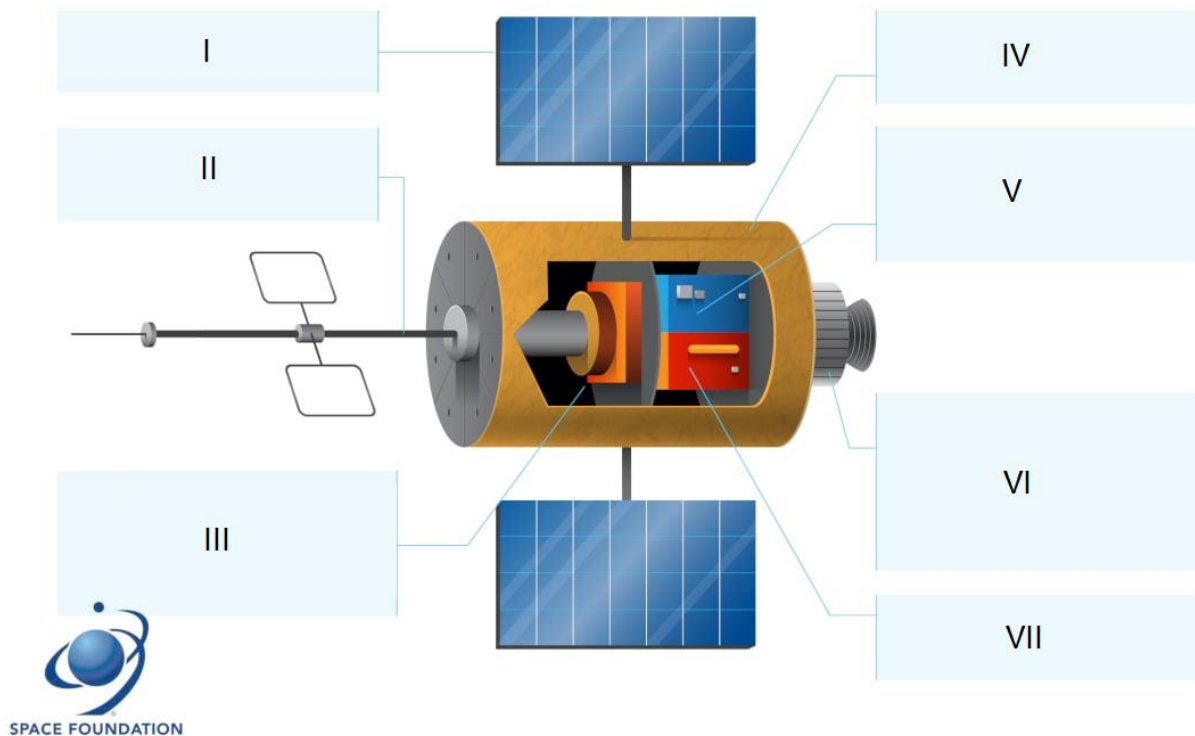
Para realizar uma comunicação cabeada por distâncias grandes, como no caso de cabos submarinos para prover acesso à Internet entre continentes, é necessário utilizar uma grande quantidade de cabos, se preocupando com o relevo, com a vegetação, com a fauna e com construções. Já para conseguir atingir a comunicação sem fio celular de longa distância, por exemplo, é necessário ter diversas estações-base no caminho para retransmitir o sinal e realizar conexões com o núcleo da rede, como no caso do LTE, por exemplo. Isso ocorre porque essas antenas possuem

alturas relativamente baixas, e os problemas de múltiplos percursos e desvanecimento são mais intensos.

Por sua vez, a comunicação via satélites permite que muitos usuários situados longe do transmissor original recebam a informação desejada, mesmo que estejam em locais isolados e de difícil acesso.

A figura 1, logo abaixo, mostra com mais detalhes alguns dos componentes de um satélite de comunicações.

Figura 1 Um satélite e seus componentes



Fonte: SPACE FOUNDATION [20--?], modificada pelo autor]

Na figura acima, o retângulo numerado com I mostra o arranjo de painéis solares do satélite, que converte luz do Sol em energia elétrica. Já o retângulo II está apontando para as antenas do satélite, que são usadas para transmitir e receber sinais de e para a Terra. O terceiro, numerado com III, mostra os *transponders* do satélite, que convertem a frequência do sinal de uplink para uma frequência de downlink, amplificam o sinal convertido e o reenviam para a Terra.

No lado direito da figura, o retângulo IV aponta para o casco do satélite. Esse elemento é feito de materiais resistentes para proteger os componentes internos do ambiente espacial severo. O segundo retângulo do lado direito, V, indica um elemento dentro do satélite, o centro de comando e controle, que monitora todos os componentes do satélite e recebe comandos da Terra.

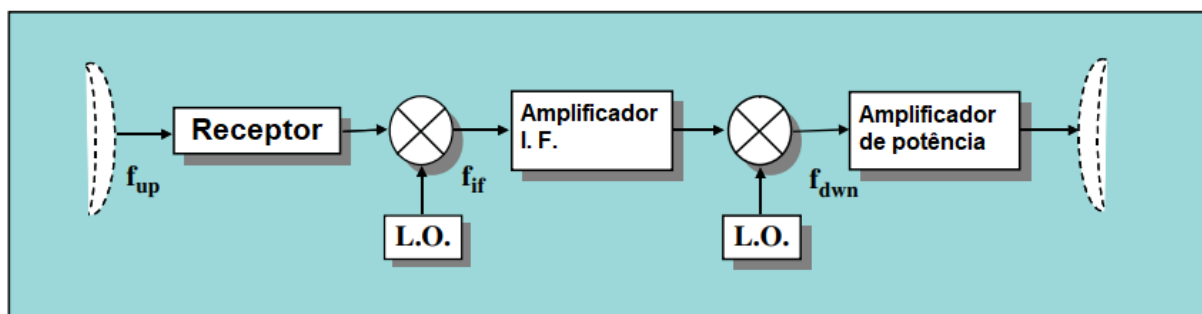
Já o retângulo VI mostra os propulsores do satélite. Sensores monitoram a posição do satélite para garantir que ele esteja na órbita correta e apontando para a direção certa e, caso necessário, os propulsores podem manobrá-lo para realizar ajustes finos em sua posição. Por fim, ainda do lado direito, o retângulo numerado com VII aponta para um outro componente interno ao satélite, o controlador térmico. Esse componente protege os equipamentos internos de mudanças extremas de temperatura.

Nas subseções seguintes, serão fornecidos mais detalhes sobre as estruturas que compõem o satélite, as órbitas em que eles atuam, as frequências de operação e sobre uma estrutura de dados utilizada para definir a órbita de qualquer satélite.

2.1.1 Transponders

Um *transponder* básico, chamado de *bent pipe*, simplesmente recebe um sinal vindo de um transmissor, que pode ser uma estação terrena ou outro satélite, amplifica-o e o reenvia em uma frequência diferente. Esse tipo de equipamento pode ser útil para transportar a informação de um ponto na Terra até outro bem distante, sem precisar passar por cabeamento.

Figura 2 Estrutura de um transponder *bent pipe*



Fonte: IPPOLITO JR. (2017, p. 46, tradução do autor)

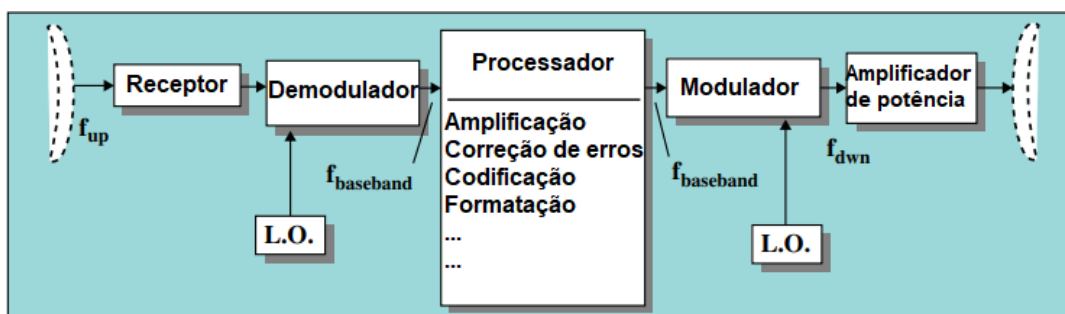
Na figura 2, ilustrada acima, é possível ver os elementos básicos do *transponder bent pipe*. Primeiramente, o sinal chega à antena receptora com uma frequência f_{up} . O sinal é injetado em um sistema receptor de filtros. Então, ele prossegue para um misturador de frequência, que tem como entrada o sinal de frequência f_{up} e o sinal de um oscilador local (L.O.). Na saída do misturador, tem-se o mesmo sinal de entrada, porém com uma frequência mais baixa f_{if} , filtrado, de maneira que apenas a frequência de interesse é mantida na saída, uma vez que o processo de multiplicação de sinais gera múltiplas componentes de frequências distintas.

Então, esse sinal segue para um amplificador de frequência intermediária (Amplificador I. F.) e o sinal amplificado vai para outro misturador, que dessa vez eleva a frequência para f_{down} e novamente filtra o sinal para manter apenas a componente de frequência desejada. Essa frequência f_{down} é mais alta que f_{if} , porém mais baixa que a frequência inicial f_{up} . Por fim, o sinal com frequência f_{down} segue para um amplificador de potência e é retransmitido nessa nova frequência por uma antena transmissora.

A frequência f_{up} normalmente é mais elevada que f_{down} para reduzir o efeito de atenuações troposféricas no enlace de descida, que são mais intensas em sinais de frequências mais altas. Isso porque o enlace de descida, que tem como transmissor um satélite e como receptor uma estação terrena, normalmente tem uma relação sinal-ruído menor, já que a potência de transmissão de um satélite é mais limitada que a de uma estação terrena, pois a energia disponível nos satélites para a transmissão de sinais vem dos seus painéis solares, que são mais limitados que as fontes de energia de estação terrenas.

Já um *transponder* mais complexo, chamado de regenerativo, tem processadores que conseguem demodular o sinal, interpretá-lo, alterá-lo e depois remodular antes de enviar de volta em outra frequência.

Figura 3 Estrutura de um transponder regenerativo.



Fonte: IPPOLITO JR. (2017, p. 46, tradução do autor)

A figura 3, logo acima, mostra com mais detalhes os elementos dentro de um *transponder* regenerativo. Primeiramente, o sinal modulado chega à antena receptora do satélite com frequência f_{up} e vai para um sistema receptor de filtragem. Então, segue para um demodulador e passa a ser um sinal em banda base, ou seja, de frequência $f_{baseband}$, com o auxílio de um oscilador local (L. O.). Depois disso, o sinal em banda base segue para um processador que pode fazer diversas alterações nesse sinal, como aplicar algoritmos de correção de erros, codificá-lo, amplificá-lo, entre outras. Após isso, o sinal processado, ainda em banda base, segue para um modulador, que altera sua frequência para f_{dwn} com ajuda de um oscilador local. Por fim, o sinal remodulado é amplificado por um amplificador de potência e é retransmitido pela antena transmissora do satélite.

Um satélite normalmente tem múltiplos *transponders*, cada um ajustado para uma pequena banda de frequências dentro da faixa de operação do satélite. Dessa forma, cada satélite pode realizar múltiplas operações ao mesmo tempo e até mesmo enviar para múltiplas áreas contendo estações terrenas, ou para outros satélites.

2.1.2 Baterias, propulsores e antenas

A bateria do satélite é a fonte de energia para ele transmitir sinais. Como ela é carregada por painéis solares, a potência máxima de transmissão de um satélite é normalmente mais baixa do que a potência de transmissão das estações terrenas. Já os propulsores utilizam o combustível que o satélite levou consigo durante o lançamento, que vai se esgotando ao longo do tempo, tornando a vida útil do satélite dependente de quanto combustível ele possui.

O lançamento de satélites é feito por foguetes, como por exemplo os da série Ariane, que levam sua carga para a altitude desejada e soltam o satélite. Então, ele ajusta sua posição até entrar na órbita calculada.

O satélite naturalmente sai de sua órbita desejada pela ação das forças gravitacionais dos corpos celestes ao seu redor, como a Lua, o Sol e a própria Terra, dentre outras forças externas. Por isso, é necessário acionar os propulsores de tempos em tempos, a fim de reposicioná-lo na órbita original.

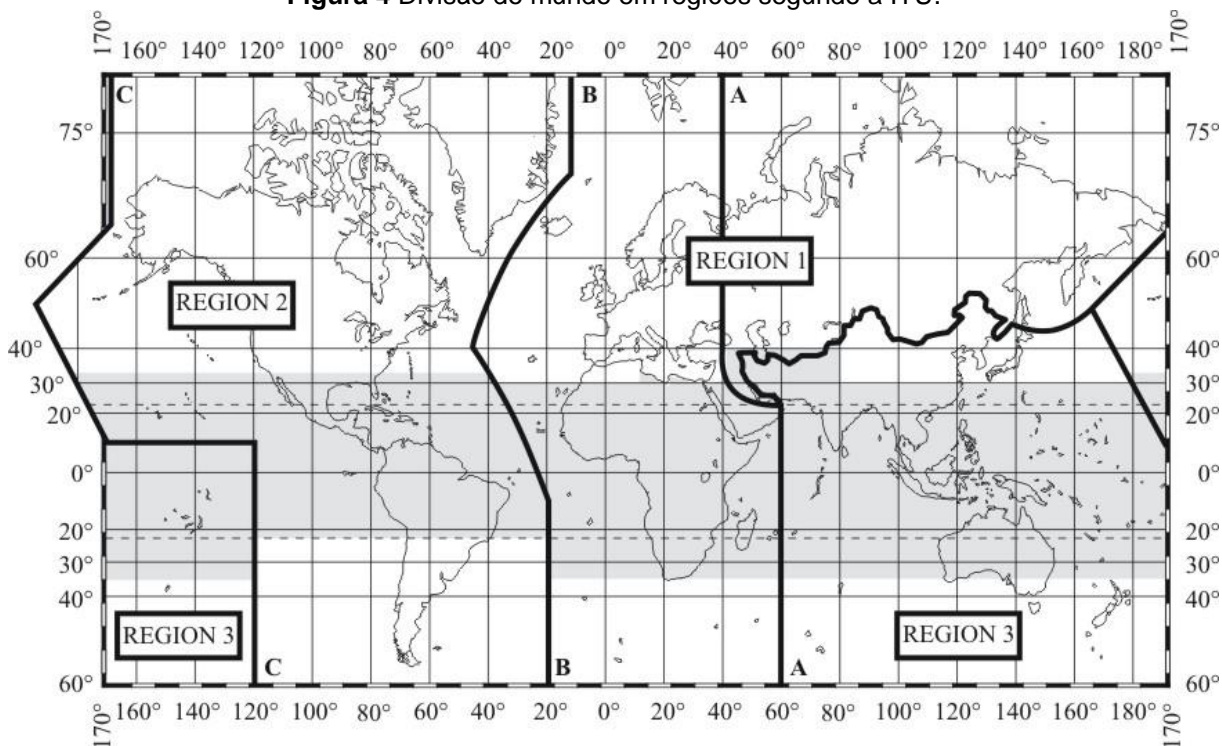
As antenas são uma parte fundamental da comunicação via satélites, uma vez que elas transformam ondas guiadas em ondas que se propagam por um meio de transmissão não guiado, que é o meio de comunicação sem fio. As operações com o sinal são realizadas no meio cabeado, e a onda que é transmitida se propaga pelo meio não guiado. As antenas podem ser tanto transmissoras quanto receptoras, e normalmente há múltiplas em um único satélite.

2.1.3 Frequências de operação

Sistemas de comunicação via satélite operam muitas vezes em frequências na casa dos GHz, mas podem operar também em frequências muito mais baixas ou até mais elevadas. A União Internacional de Telecomunicações (ITU, do inglês *International Telecommunication Union*) é uma agência da ONU que padroniza telecomunicações e faz recomendações a serem seguidas a fim de minimizar interferências, atenuações, entre outras degradações do sinal.

A ITU divide o mundo em três regiões: Região 1 (Europa, África e parte da Ásia), 2 (Américas) e 3 (Oceania e o restante da Ásia), como mostra o mapa abaixo:

Figura 4 Divisão do mundo em regiões segundo a ITU.



Fonte: ITU [20--?a]

O espectro de frequências é dividido em bandas, para classificar e facilitar o estudo dos diversos sistemas de comunicação. Sistemas que operam na mesma banda utilizam frequências próximas, logo se comportam de maneira parecida em relação a degradações do sinal. O espectro é dividido nas seguintes bandas, segundo a ITU:

| Tabela 1 Divisão do espectro eletromagnético em bandas pela ITU | | | | |
|--|----------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Número da banda | Símbolos | Alcance de frequências | Subdivisão métrica correspondente | Abreviação métrica da banda |
| 3 | ULF | 300 – 3000 Hz | Ondas hectoquilométricas | B.hkm |
| 4 | VLF | 3 – 30 kHz | Ondas miriamétricas | B.Mam |
| 5 | LF | 30 – 300 kHz | Ondas quilométricas | B.km |
| 6 | MF | 300 – 3000 kHz | Ondas hectométricas | B.hm |
| 7 | HF | 3 – 30 MHz | Ondas decamétricas | B.dam |
| 8 | VHF | 30 – 300 MHz | Ondas métricas | B.m |
| 9 | UHF | 300 – 3000 MHz | Ondas decimétricas | B.dm |
| 10 | SHF | 3 – 30 GHz | Ondas centimétricas | B.cm |
| 11 | EHF | 30 – 300 GHz | Ondas milimétricas | B.mm |
| 12 | --- | 300 – 3000 GHz | Ondas decimilimétricas | B.dmm |
| 13 | --- | 3 – 30 THz | Ondas centimilimétricas | B.cmm |
| 14 | --- | 30 – 300 THz | Ondas micrométricas | B.µm |
| 15 | --- | 300 – 3000 THz | Ondas decimicrométricas | B.dµm |

Fonte: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (2015, p. 2, tradução do autor)

Cada uma das regiões da figura 4 tem diferentes faixas de frequências alocadas dentro das bandas definidas na tabela 1. Por exemplo, dentro da banda MF, a faixa de 525 a 526.5 kHz é atribuída apenas à região 2, a faixa de 526.5 a 1606.5 kHz é dada às três regiões, a subdivisão de 1605.5 a 1705 kHz é dada apenas para a região 2, a banda de 2300 a 2495 kHz é disponível para todas as três e a de 2495 a 2498 kHz é atribuída apenas à região 1 (ITU, [20--?b]).

Há também uma divisão em bandas feita pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Essa divisão está descrita no padrão 521 do IEEE, como mostra a tabela 2.

| Tabela 2 Divisão do espectro eletromagnético em bandas pelo IEEE | |
|---|-------------------------------|
| Símbolo | Alcance de frequências |
| HF | 3 – 30 MHz |
| VHF | 30 – 300 MHz |
| UHF | 300 – 1000 MHz |
| L | 1 – 2 GHz |
| S | 2 – 4 GHz |
| C | 4 – 8 GHz |
| X | 8 – 12 GHz |
| Ku | 12 – 18 GHz |
| K | 18 – 27 GHz |
| Ka | 27 – 40 GHz |
| V | 40 – 75 GHz |
| W | 75 – 110 GHz |
| mm | 110 – 300 GHz |

Fonte: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (2002, p. 9, tradução e adaptação do autor)

2.1.4 Órbitas

Satélites lançados podem estar em vários tipos de órbita distintos. De acordo com as Leis de Kepler, da Física clássica, uma órbita possui seis números que a definem, que são os elementos keplerianos. Esses números definem todo o percurso que o satélite faz em torno do seu astro, em relação a um sistema de coordenadas fixo. É possível ainda incluir a época aos elementos keplerianos.

A época é o tempo de observação do satélite, dado em número de dias após 01/01 do ano de observação. Os dois primeiros dígitos desse número indicam o ano, e os demais indicam o número de dias dito anteriormente, incluindo frações de dias. É o instante de referência utilizado nos cálculos orbitais, cujos resultados variam de acordo com o tempo observado.

Os elementos keplerianos explicados abaixo estão de acordo com as definições dadas por Vallado (2013).

Um dos elementos keplerianos é a inclinação da órbita (i) em relação a um plano de referência, normalmente o Equador, no caso da Terra. Se o plano orbital é paralelo a esse plano de referência, a inclinação é de 0° . Esse elemento varia entre 0 e 180° .

Quanto à excentricidade (e), ela descreve o formato da cônica da órbita. Se esse valor for zero, a órbita é circular. Se $0 < e < 1$, a órbita é elíptica. Quando $e = 1$, ela é uma parábola. Por fim, se a excentricidade for maior do que 1 , classifica-se a órbita como hiperbólica.

A ascensão reta do nó ascendente (Ω) é o ângulo com vértice no corpo orbitado que vai do ponto vernal até o nó ascendente. O ponto, ou equinócio, vernal é, no caso da Terra, o ponto em que o Sol cruza o Equador ao se mover pela eclíptica (que é sua órbita aparente vista da Terra) do hemisfério sul para o norte. Já o nó ascendente é o ponto em que um corpo de interesse orbitando a Terra cruza o plano do Equador, em relação a um observador, do hemisfério sul para o norte. Segundo Vallado (2013), se a órbita for equatorial, ou seja, de inclinação zero, não há nó ascendente, portanto, o valor de Ω é indefinido.

Outro elemento kepleriano é o argumento do periastro (ω), ou argumento do perigeu para satélites orbitando a Terra. Ele é o ângulo com vértice no corpo orbitado entre o nó ascendente e o periastro (ponto da órbita em que o satélite está mais próximo do astro). Segundo Vallado (2013), no caso de a órbita ser circular, seu valor é indefinido, pois não há periastro nesse caso. O mesmo ocorre se a órbita for equatorial, ou seja, tiver inclinação zero (não há nó ascendente).

O próximo elemento é o semieixo maior da órbita (a). A partir do semieixo maior e da excentricidade, é possível descobrir também o semieixo menor (b) pela seguinte equação, que é uma equação da geometria das cônicas:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (1)$$

O último elemento kepleriano é a anomalia, podendo ser a anomalia média, a anomalia verdadeira ou a anomalia excêntrica. Para compreender as definições de anomalia, é preciso definir o movimento médio de um satélite. Chamado esse movimento de n e definindo T como o período da órbita, temos:

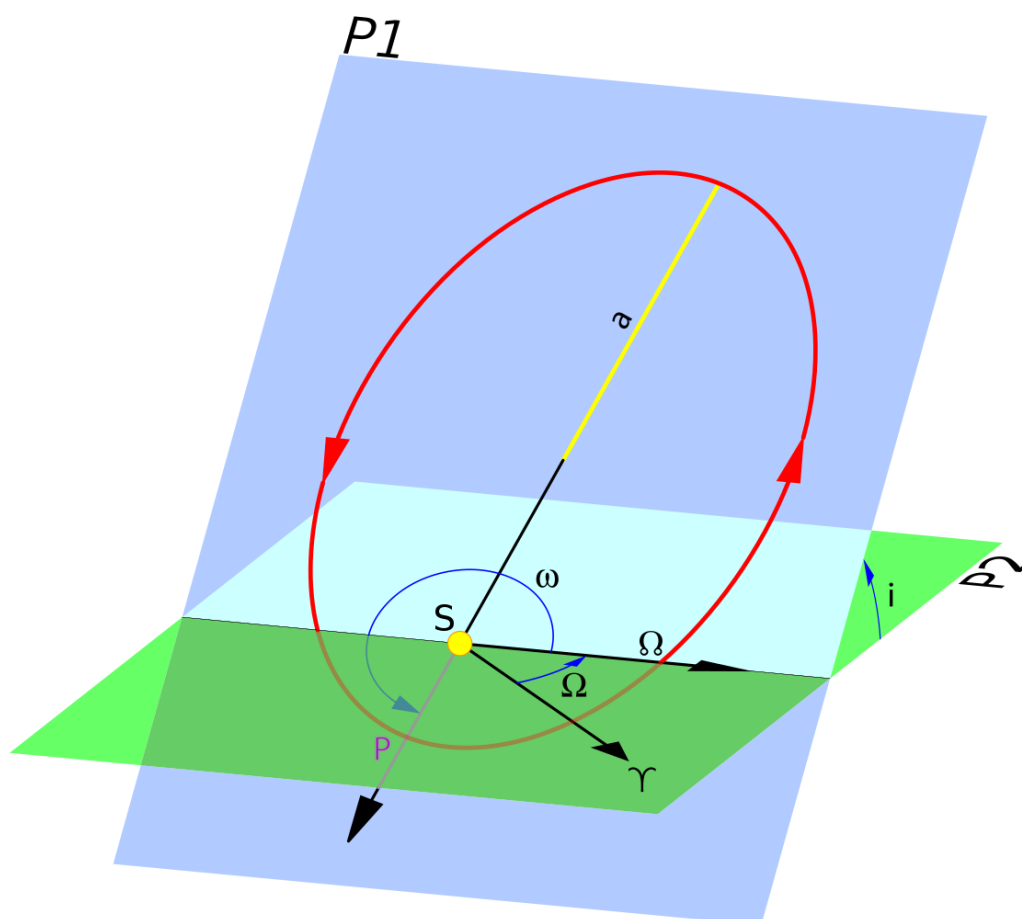
$$n = \frac{2\pi}{T} \text{ rad/s} \quad (2)$$

A partir do movimento médio, a anomalia média M é calculada multiplicando-se esse valor pelo tempo desde que o satélite passou pelo periastro. Se t_0 for a época e τ for o tempo desde a última passagem pelo periastro, então a anomalia média é dada por:

$$M = n(t_0 - \tau) \text{ rad} \quad (3)$$

Por fim, a anomalia verdadeira Mv é definida como o ângulo entre a posição do satélite na sua órbita no instante de observação e o periastro de sua órbita, com vértice no astro orbitado.

Figura 5 Ilustração de um corpo orbitando um astro, com ênfase nos elementos keplerianos



Fonte: WIKIPÉDIA (2021)

Na figura 5, ilustrada logo acima, é possível ver a órbita de um corpo que está girando em torno de um astro principal S. Na imagem, ϖ é o nó ascendente, P1 é o plano orbital, P2 é o plano de referência, P é o periastro e γ é o ponto vernal, ou ponto de Áries. Já Ω é a longitude do nó ascendente, ao invés da ascensão reta desse mesmo nó. Segundo Vallado (2013), essa longitude tem a mesma definição, porém usa como referência o meridiano de Greenwich ao invés do ponto vernal, e esse valor muda constantemente. Os demais símbolos são referentes aos seis elementos keplerianos, como já foi descrito.

Quanto à altitude da órbita em relação ao centro da Terra, pode-se classificá-las em órbita baixa, média ou alta.

Satélites de órbita baixa (LEO, do inglês *Low Earth Orbit*) possuem períodos orbitais pequenos e passam pelo mesmo local diversas vezes em um dia. Esse local é o mesmo em relação ao espaço, e não necessariamente em relação a um

observador terrestre. Como a Terra tem seu movimento de rotação, após o período orbital, o satélite pode se encontrar em uma posição relativa a um observador na Terra diferente de antes, dependendo da inclinação dessa órbita. Segundo a ESA (2020), órbitas baixas normalmente se encontram acima de 160 km e abaixo de 1000 km. Órbitas com altitudes muito baixas sofrem de instabilidade devida ao arrasto.

Satélites em órbita LEO são muito úteis para prover serviços que precisam de baixas latências, uma vez que sua distância até a crosta terrestre é a menor dentre as órbitas. Porém, a visibilidade de satélites em órbita baixa é relativamente curta, precisando ter múltiplos deles em um sistema caso seja necessário fornecer cobertura aos usuários a qualquer tempo.

Satélites de órbita média (MEO, do inglês *Medium Earth Orbit*) são os mais escolhidos para prover auxílios de navegação, como o GPS. Uma órbita média muito utilizada é a semissíncrona, com período de aproximadamente 12 h, utilizada pelo GPS. São classificadas como MEO todas as órbitas entre 2000 e 35786 km.

Os satélites de órbita alta mais utilizados são os geoestacionários (GEO, do inglês *Geosynchronous Equatorial Orbit*). Segundo a ESA (2020), eles possuem uma altitude orbital de cerca de 35786 km, e possuem uma velocidade de translação igual à velocidade de rotação da Terra, portanto sua velocidade relativa a qualquer observador na superfície terrestre é nula, fazendo com que o satélite esteja parado em relação a um observador na Terra. Além disso, segundo Vallado (2013), a órbita de um satélite geoestacionário sempre é equatorial, ou com inclinação nula. Satélites nesse tipo de órbita são muito utilizados para transmissão de televisão, por exemplo.

Há ainda satélites de órbita elíptica mais alta do que a geoestacionária (HEO, do inglês *Highly Elliptical Orbit*), com um apoastro (ponto em que o satélite está mais distante do astro orbitado) superior a 35786 km, apesar do periastro poder ser bem mais baixo.

Uma definição importante para os cálculos realizados neste trabalho é a do ponto subsatélite, que é a projeção da posição do satélite sobre a superfície terrestre. É definido por uma latitude e uma longitude.

2.1.5 *Two-line element set (TLE)*

Um TLE é uma estrutura de dados que representa a órbita de um satélite em torno da Terra para uma determinada época. Para isso, é composto dos elementos keplerianos da órbita e de algumas outras informações.

Essa estrutura de dados é utilizada em conjunto com um modelo de perturbações simplificadas para prever o estado de um satélite em determinado momento, ou seja, sua posição e sua velocidade. Esse tempo arbitrário pode ser tanto antes quanto depois da época escolhida. Modelos de perturbações simplificadas podem ser do tipo *Simplified General Perturbations* (SGP), que são mais utilizados para satélites próximos à superfície terrestre, ou *Simplified Deep Perturbations* (SDP), usados para satélites de órbitas mais altas. Há três modelos SGP (SGP, SGP-4 e SGP-8) e dois SDP (SDP-4 e SDP-8). O mais comumente utilizado é o SGP-4.

O modelo leva em consideração as ações da Terra, do Sol, da Lua e de outros astros sobre os satélites que orbitam nosso planeta, e tem um certo erro em sua previsão, que cresce quanto maior for a distância temporal da época escolhida. Segundo um documento do American Institute of Aeronautics and Astronautics, “De maneira geral, dados do TLE são precisos até cerca de um quilômetro na época e essa precisão rapidamente decresce.” (HARTMAN, 1993 apud VALLADO et al., 2006, p. 30, tradução do autor).

A estrutura do TLE é dada pelas tabelas abaixo, elaboradas a partir da estrutura em Vallado et al. (2006) e da definição do TLE apresentada pela NASA (1999):

Tabela 2 Campos do TLE, da coluna 1 à 17

| Coluna Linha | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|-----------------|-------------|---|----------------|---|---|---|-------------------|------------|--------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | Nº da linha | | Nº do satélite | | | | Confidencialidade | | Designador Internacional | | | | | | | | |
| 2 | Nº da linha | | Nº do satélite | | | | | Inclinação | | | | | | | | | |

Tabela 3 Campos do TLE, da coluna 18 à 33

| Coluna Linha | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 |
|-----------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------|----|----|----|----|----|----|
| 1 | Época | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | RAAN | | | | | | | | | Excentricidade | | | | | | |

Tabela 4 Campos do TLE, da coluna 34 à 52

| Coluna Linha | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | |
|-----------------|--------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 1 | Primeira derivada do movimento médio | | | | | | | | | | Segunda derivada do movimento médio | | | | | | | | | |
| 2 | Argumento do perigeu | | | | | | | | | | Anomalia média | | | | | | | | | |

Tabela 5 Campos do TLE, da coluna 53 à 69

| Coluna Linha | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | |
|-----------------|-----------------|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------------|---------------------------|----------------|----|----|----|----------|----------|
| 1 | | Coeficiente Bstar | | | | | | | | | Tipo de efeméride | | Nº do elemento | | | | | Checksum |
| 2 | Movimento médio | | | | | | | | | | | Nº de revoluções na época | | | | | Checksum | |

Explicando de maneira mais detalhada as tabelas de 2 a 5, o TLE possui duas linhas obrigatórias, com 69 colunas cada. Pode haver ou não uma primeira linha, chamada linha 0, com o nome do satélite analisado.

Cada coluna é representada por um caractere ASCII. As colunas em branco das tabelas representam elementos nulos no TLE, simbolizados por um caractere em branco.

A primeira linha do TLE é composta, da esquerda para a direita e sem considerar os espaços em branco, pelo número da linha (número 1) e o número do satélite (um valor de 0 a 99999 que identifica o satélite).

Após isso, há o código de confidencialidade quanto à restrição das informações do satélite, que pode ser, por exemplo, U para não-confidencial, ou *unclassified*, e o designador internacional, cujos dois primeiros dígitos são os dois últimos dígitos do ano de lançamento, o terceiro, o quarto e o quinto são o número desse lançamento no ano referido e os três últimos são uma letra que indica o identificador da peça no lançamento.

Depois, há a época, cujos dois primeiros dígitos representam os dois últimos dígitos do ano e os demais representam o número de dias após primeiro de janeiro daquele ano, incluindo a fração de dias com oito casas decimais.

Em seguida, vem a primeira derivada do movimento médio do satélite (coeficiente balístico) dividida por dois e a derivada segunda do mesmo parâmetro dividida por seis, que muitas vezes é nula.

Após isso, há o coeficiente B^* , que é um valor ajustado do coeficiente balístico para representar o arrasto no modelo SGP-4. Esse valor, segundo Vallado et al. (2006), é dado por:

$$B^* = \frac{r_e \rho_0}{2 \cdot B} \quad (4)$$

Na equação 4, B^* indica o coeficiente B^* , r_e indica o raio da Terra, ρ_0 é um valor de referência da densidade da atmosfera terrestre e B é o coeficiente balístico.

Na sequência, a 63ª coluna representa o tipo de efeméride que, segundo Vallado et al. (2006, p. 4), sempre é definido como zero para um TLE disponibilizado publicamente.

Depois, há o número do elemento, que é o número daquele TLE em relação ao total de TLEs já gerados para o satélite. Esse número incrementa a cada TLE gerado e, segundo a NASA (1999), volta a ser 1 após atingir 999.

Finalizando a primeira linha, há um checksum módulo 10 dessa linha, em que as letras, os espaços em branco, os pontos e os sinais de mais valem 0, os sinais de menos valem 1 e os números têm os valores absolutos de cada algarismo (CELESTRAK, 2022).

Na segunda linha do TLE, novamente a primeira coluna representa o número da linha (número 2) e as colunas de 3 a 7 representam o número do satélite.

Após isso, há a inclinação da órbita do satélite, em graus. O próximo termo, da coluna 18 à 25, representa a ascensão reta do nó ascendente (RAAN, do inglês *right ascension of the ascending node*), em graus.

Depois, há a excentricidade da órbita, seguida do argumento do perigeu (que é o argumento do periastro para satélites geocêntricos), em graus, da anomalia média, também em graus, e do movimento médio, em revoluções por dia.

Por fim, da coluna 64 à 68, tem-se o número de revoluções do satélite até a época especificada e, na coluna 69, há o checksum módulo 10 da linha 2, seguindo as mesmas regras do checksum da linha 1.

O TLE é gerado pelo Comando de Defesa Aeroespacial da América do Norte (NORAD, do inglês *North American Aerospace Defense Command*) e disponibilizado principalmente nos sites *CelesTrak*¹ e *Space-Track*², sendo o último da Força Espacial dos Estados Unidos.

2.1.6 Sistema Horizontal de Coordenadas

Um sistema de coordenadas muito utilizado para expressar a posição de um satélite em relação a um observador estacionado na superfície terrestre é o Sistema Horizontal de Coordenadas, que é um sistema de coordenadas topocêntrico.

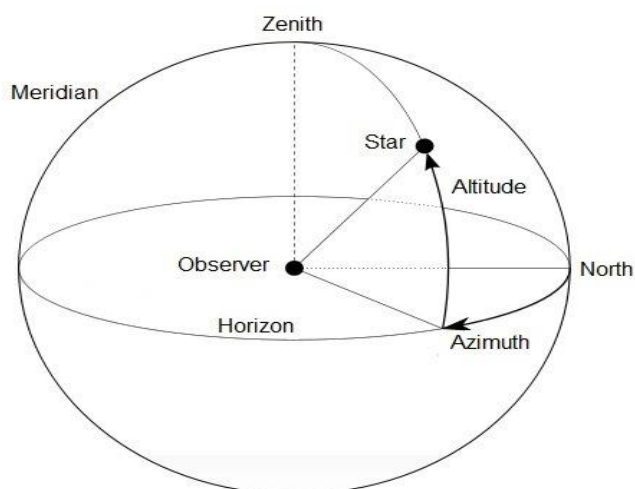
Esse sistema é uma adaptação do sistema de coordenadas esféricas. O observador é posicionado no centro e o satélite se encontra em algum ponto da superfície esférica formada em torno do observador. O plano horizontal é o horizonte local do observador, e do observador parte uma semirreta em direção ao norte, que indica esse ponto cardeal. A distância entre o satélite e o observador é o raio dessa esfera.

Os dois ângulos de interesse são o de elevação e o de azimute. O ângulo de elevação, também conhecido como altitude, é o ângulo entre o satélite e o plano horizontal, com vértice no observador. Ele varia de 0 a 90 °. Já o ângulo de azimute é o ângulo entre a projeção do objeto no plano horizontal e o ponto norte desse plano, também com vértice no observador. Esse ângulo vai de 0 até 360 °.

1 Disponível em <https://celestrak.org/>

2 Disponível em <https://www.space-track.org/>

Figura 6 Ilustração do Sistema Horizontal de Coordenadas



Fonte: SZÜCS-CSILLIK; POPUȚA (2015)

A figura 6 ilustra esse sistema de coordenadas. O observador (*Observer*) é situado no centro da esfera, o satélite é chamado de *Star*, o plano de referência é chamado *Horizon*, o ponto norte está indicado por *North*, os ângulos de altitude e zênite estão descritos como *Altitude* e *Azimuth*, respectivamente, e o polo superior, onde a altitude é 90° , é o zênite, chamado de *Zenith* na imagem.

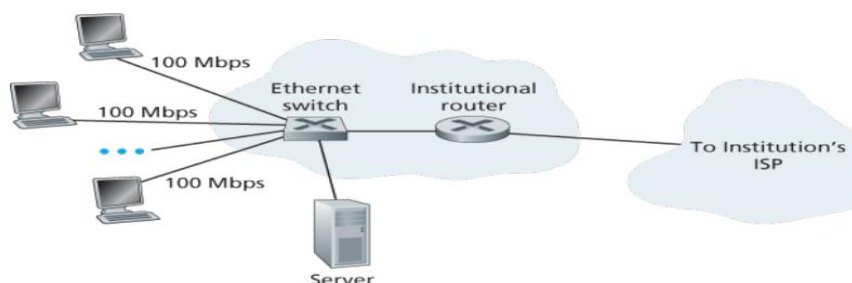
2.2 Fundamentos da Comunicação

Em uma comunicação, há, no mínimo, um transmissor, que envia a mensagem, um receptor, que recebe a mensagem enviada pelo transmissor, uma mensagem, que é uma série de dados que se querem transmitir, e um canal, que é o meio pelo qual a mensagem se propaga desde quando sai do transmissor até chegar ao receptor.

Um exemplo de comunicação é o de uma rede local cabeada entre um computador *desktop* e um computador *notebook*. Os dois têm suas interfaces de rede conectadas por um cabo Ethernet, como, por exemplo, um cabo de cobre de par trançado, e enviam dados de um a outro por meio desse canal. Analisando apenas o

enlace em que o *desktop* é o transmissor e o *notebook* é o receptor, considerando a mensagem como um quadro Ethernet, é possível identificar os elementos básicos da comunicação.

Figura 7 Sistema de comunicação Ethernet



Fonte: KUROSE, ROSS (2017)

Na figura 7, é possível identificar um sistema de comunicação Ethernet que provê acesso à Internet para um servidor e alguns computadores de uma instituição. Cada enlace pode ser tratado como um sistema de comunicação separado, ou seja, cada enlace possui um transmissor, um receptor, uma mensagem e um canal. Todos os enlaces utilizam canal cabeado, mas cada cabo pode ter especificações diferentes.

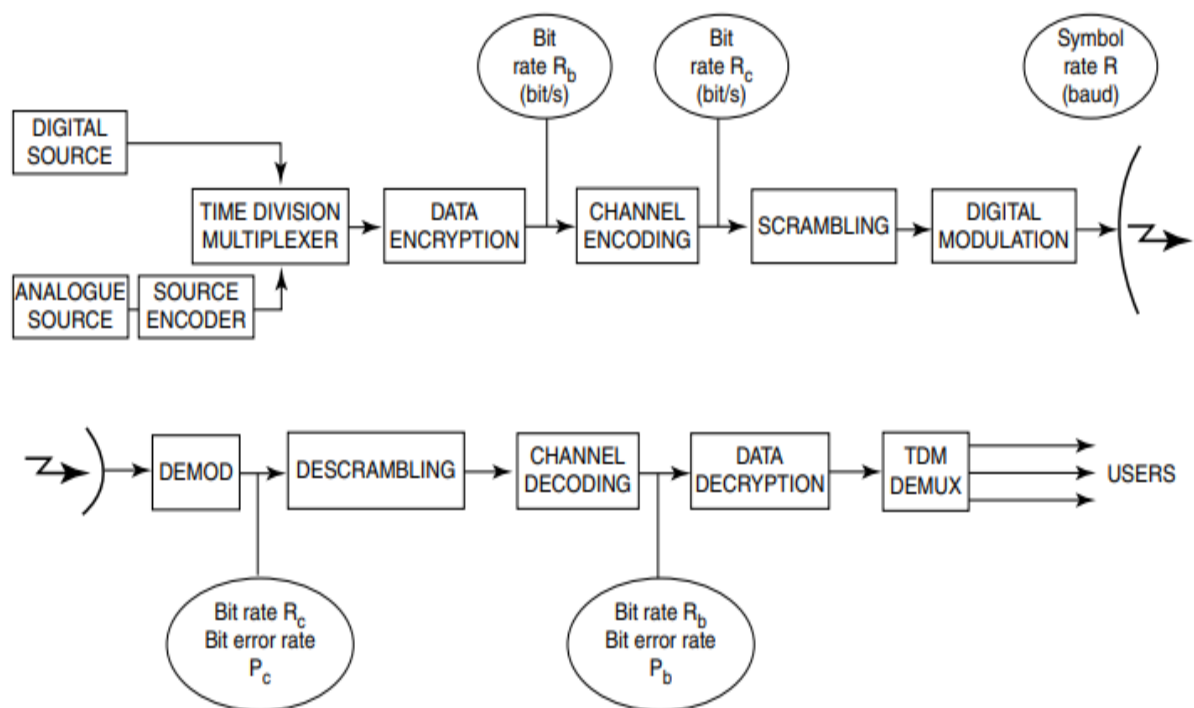
Entre os computadores e o servidor da figura acima, existe um comutador de pacotes, chamado de Ethernet switch na imagem, que é responsável por interconectar os computadores e o servidor, garantindo que eles possam se comunicar. Conectado ao comutador, há um roteador institucional, que é responsável por encaminhar corretamente mensagens que entram ou saem do comutador da rede. Ele está conectado à Internet pelo provedor de serviço de Internet da instituição (ISP, na figura).

No caso das comunicações via satélite, pelo menos um satélite assume o papel de transmissor ou receptor. Além disso, o canal da comunicação é o ar e/ou o espaço livre, dependendo da altitude da órbita do satélite em questão. Já a mensagem é portada por uma onda eletromagnética que é enviada de ou para o satélite. Dessa forma, a comunicação via satélites é classificada como sem fio, uma vez que o meio físico pelo qual a mensagem é transmitida não é cabeado.

2.2.1 Etapas da comunicação

Uma comunicação precisa passar por diversas etapas para ocorrer de forma eficiente. Muitas vezes, a comunicação via satélite é do tipo digital, portanto as mensagens são mapeadas em bits antes de serem transmitidas. Mas, além dessa conversão, há outras etapas que garantem maior eficiência, segurança e robustez à mensagem transportada, além de técnicas que permitem o transporte de múltiplas mensagens por um mesmo canal. A figura 8, retirada de Maral e Bousquet (2009), ilustrada abaixo, mostra várias possíveis etapas, incluindo etapas opcionais, pelas quais um sinal pode passar desde a fonte até o receptor.

Figura 8 Possíveis etapas de uma comunicação digital



Fonte: MARAL; BOUSQUET (2009, p.117)

Na figura 8, logo acima, no lado do receptor, o autor do livro supõe dois tipos diferentes de origem da informação: um em que a mensagem vem de uma fonte digital (*Digital Source*) diretamente, e outro em que o sinal sai de uma fonte analógica (*Analogue Source*) e passa por um codificador de fonte (*Source Encoder*).

Depois disso, ambas as informações entram em um multiplexador de divisão temporal (*Time Division Multiplexer*). A saída do multiplexador é, em seguida, criptografada (*Data Encryption*). Essa mensagem criptografada resultante, de taxa de transmissão R_b bits/s, segue para um codificador de canal (*Channel Encoding*), que altera a taxa de transmissão para R_c bits/s. A mensagem codificada sofre embaralhamento (*Scrambling*), e prossegue para ser modulada digitalmente (*Digital Modulation*), processo esse que gera uma taxa de símbolos R baud. Finalizando o lado transmissor, o sinal modulado é transmitido pela antena transmissora e prossegue para o canal.

No lado do receptor, o sinal chega pela antena receptora e segue para um demodulador (*Demod*), e volta a ter uma taxa de transmissão R_c bits/s e uma taxa de erro de bit P_c , pois o processo de recuperação da mensagem não é imune a erros. O sinal demodulado sofre desembaralhamento (*Descrambling*) e é decodificado (*Channel Decoding*), alterando a taxa de transmissão para R_b bits/s e a taxa de erro de bit para P_b . Por fim, o sinal decodificado é descriptografado (*Data Decryption*) e segue para o demultiplexador por divisão temporal (*TDM Demux*). O demultiplexador leva a mensagem resultante aos usuários receptores.

Nas próximas subseções, explicar-se-á mais detalhadamente cada um dos processos que ocorre na figura acima.

2.2.1.1 Codificação de fonte e multiplexação

O codificador de fonte pode aplicar diversas técnicas de codificação de fonte à mensagem. A modulação de pulsos é um tipo de codificação de fonte. Apesar de ser chamada de modulação, é diferente da modulação aplicada logo antes do sinal passar para o canal.

Na teoria de processamento de sinais, amostragem significa transformar um sinal contínuo no domínio do tempo em discreto nesse mesmo domínio, transformando-o em pulsos. Já a quantização é a transformação do sinal de contínuo para discreto na outra dimensão, ou seja, em sua amplitude. Um sinal quantizado tem

níveis finitos de amplitudes possíveis. Quando um sinal analógico é quantizado e amostrado, ele passa a ser chamado de sinal digital.

Na modulação de pulsos, um sinal analógico é amostrado, podendo ser quantizado ou não. Se for quantizado também, ele se torna um sinal digital, portanto a codificação de fonte também realiza uma conversão de analógico para digital.

A amostragem ocorre com uma determinada frequência (ou taxa) de amostragem f_s , que é o inverso do período de amostragem T_{samp} . Se uma amostragem for realizada com um período $T_{samp} = 1$ ms, isso significa que o sinal analógico original será dividido, durante sua duração total, em amostras a cada 1 milissegundo. Se a duração do sinal analógico for de 1 s, então o sinal amostrado terá $1 \text{ s} / 1 \text{ ms} = 1000$ amostras.

Para que uma amostragem seja reversível, deve-se obedecer ao Teorema da Amostragem de Nyquist. Esse teorema afirma que para o sinal amostrado poder ser recuperado, a frequência da amostragem f_s utilizada deve ser maior que o dobro da maior frequência presente no sinal. Definindo f_{max} como essa maior componente de frequência do sinal, tem-se que:

$$f_s > 2 \cdot f_{max} \quad (5)$$

Em técnicas como a Modulação por Amplitude de Pulso e a Modulação por Largura de Pulso (PAM e PWM, respectivamente, em inglês), o sinal analógico de entrada é apenas amostrado, e sai como pulsos de infinitos níveis de amplitude possíveis.

Já em técnicas como a Modulação por Códigos de Pulso (PCM, do inglês *Pulse Code Modulation*), o sinal entra analógico e sai digital, pois é realizada uma quantização após a amostragem. Segundo os autores do livro *Satellite Communications Systems*, na codificação PCM, “A quantização transforma cada amostra de tensão da saída do amostrador em um número finito [...] de níveis discretos [...]. Isso introduz um erro, chamado de ruído de quantização” (MARAL; BOUSQUET, 2009, p. 100, tradução do autor). Se a diferença entre cada nível de quantização for fixa, o processo é denominado uniforme.

Esse erro de quantização gera uma relação sinal-ruído para o processo de quantização, que pode ser modelado para cada tipo específico de codificação, dependendo de quantos níveis há e se a quantização é uniforme ou não. Por exemplo, se há uma quantização uniforme com 8 níveis entre 0 e 1,75 V, a diferença entre um nível e outro consecutivo é fixa e igual a 0,25 V. Se, em um determinado tempo em que será tomada uma amostra, o nível do sinal analógico original fosse de 1,32 V, essa amostra no sinal final assumiria um valor de 1,25 V, pois é o nível mais próximo de 1,32 V, de acordo com as condições impostas. Portanto, o ruído de quantização para essa amostra específica seria de $1,32 \text{ V} - 1,25 \text{ V} = 0,07 \text{ V}$.

Por fim, é possível avaliar a taxa de bits da codificação de fonte (R_b). Essa taxa depende apenas da quantidade M_{cod} de níveis de codificação e da taxa de amostragem. Definindo m como o número de bits utilizados na codificação, temos:

$$m = \log_2 M_{cod} \quad (6)$$

Quanto à taxa de bits R_b , em bits por segundo, segundo Maral e Bousquet (2009, p.100), a seguinte fórmula pode ser derivada:

$$R_b = m \cdot f_s \quad (7)$$

A codificação de fonte também pode ser utilizada para comprimir mensagens. Um exemplo muito conhecido é o algoritmo JPEG, que transforma arquivos de imagem grandes em versões compactas que requerem muito menos bits para armazenar, mantendo uma qualidade boa em relação ao arquivo original.

Já a multiplexação é um processo utilizado com o propósito de enviar múltiplas mensagens compartilhando um mesmo canal. Por exemplo, em transmissões de televisão, múltiplos sinais, divididos em canais de frequências distintas, chegam aos usuários por um mesmo meio, seja ele um cabo ou o ar. É o dispositivo receptor, como a televisão, no exemplo anterior, que é responsável por tratar os sinais recebidos e recuperá-los, a partir do processo denominado demultiplexação.

A multiplexação por divisão temporal (TDM, do inglês *Time Division Multiplexing*) é uma técnica de multiplexação em que cada sinal é dividido em partes chamadas quadros e o tempo de transmissão de cada quadro é dividido em intervalos de tempo denominados *time slots*. A alocação depende da política de divisão temporal utilizada. Por exemplo, um quadro de cada sinal pode ser revezado na transmissão de maneira uniforme, sem nenhuma política de enfileiramento complexa, ou pode depender da taxa de transmissão de cada sinal. Como normalmente os *slots* são bem curtos, esse esquema de multiplexação faz aparentar que os múltiplos sinais são transmitidos ao mesmo tempo.

Outra técnica de multiplexação muito utilizada é a por divisão de frequência (FDM, do inglês *Frequency Division Multiplexing*). Ela aloca uma faixa de frequências para cada transmissão distinta e transmite todas ao mesmo tempo. Cabe ao demultiplexador do receptor dividir as transmissões e aproveitar aquele sinal que ele quiser receber no momento. Existem ainda outras técnicas de multiplexação, como a de divisão por códigos (CDM, do inglês *Code Division Multiplexing*).

Uma outra técnica, que não está mostrada na figura 8, é a de múltiplo acesso. Ela expande a multiplexação para permitir que múltiplos transmissores e/ou múltiplos receptores acessem o mesmo canal simultaneamente ou quase que simultaneamente. Um exemplo muito comum é o do CSMA (do inglês *Carrier-Sense Multiple Access*, ou Múltiplo Acesso com Detecção de Portadora), utilizado em redes de computadores. Tanto redes cabeadas quanto sem fio utilizam um tipo de CSMA para dividir o canal compartilhado entre os diversos dispositivos de forma que se evitem colisões (transmissões simultâneas que resultam em perdas de dados).

2.2.1.2 Criptografia, codificação de canal e embaralhamento

A segurança da informação é algo fundamental em alguns tipos de transmissão. Dessa forma, para impedir que usuários não autorizados consigam ler o conteúdo de uma mensagem sensível, utiliza-se um esquema de criptografia. A criptografia não impede que um invasor consiga acesso à mensagem, e sim que ele consiga ler a mensagem original.

Assim, a encriptação transforma a mensagem original sensível para uma mensagem criptografada, que precisa de uma chave para ser transformada de volta à mensagem em texto aberto. Essa chave pode ser passada ao receptor por diversos esquemas, como Diffie-Hellman, apresentado em Diffie e Hellman (1976). As chaves podem ser do tipo compartilhado, ou seja, a mesma chave criptografar e descriptografar a mensagem, ou um par público-privado de chaves, em que uma das chaves é usada para criptografar e enviar a mensagem, e outra é usada para descriptografá-la.

Como é afirmado em Maral e Bousquet (2009), criptografia é muito necessária em comunicações via satélite, já que satélites têm grandes coberturas, o que facilita a interceptação de informações por estações pequenas.

Já a codificação de canal é utilizada para possibilitar a detecção e, possivelmente, correção de erros ocorridos durante a transmissão da mensagem. Para isso, adicionam-se bits redundantes aos bits de informação da mensagem. Dessa forma, mesmo se houver a perda de alguns bits úteis de informação, é possível detectar que houve erro e talvez até corrigir o erro da transmissão.

A taxa de codificação ρ_{cod} é definida como a divisão do total de bits úteis n_{cod} pelo total de bits da nova mensagem. O total de bits da nova mensagem é o número de bits de informação n_{cod} somado ao número de bits redundantes r_{cod} . Portanto:

$$\rho_{cod} = \frac{n_{cod}}{n_{cod} + r_{cod}} \quad (8)$$

O processo de codificação de canal altera a taxa de bits da transmissão, que era de R_b bits/s e passa a ser R_c bits/s. A nova taxa de bits é a divisão da anterior pela taxa de codificação. Assim, segundo Maral e Bousquet (2009), a fórmula abaixo representa essa taxa de bits após a codificação de canal, em bits/s:

$$R_c = \frac{R_b}{\rho} \quad (9)$$

No processo inverso, ou seja, de decodificação de canal, a recuperação da mensagem possui uma taxa de erro de bit (BER, do inglês *Bit Error Rate*) P_c . A BER da decodificação é dada em função da razão sinal-ruído E_c/N_0 , que é a divisão da energia por bit após o processo de codificação (E_c) pela densidade espectral de potência do ruído (N_0). Essa energia por bit é dada pela divisão da potência da portadora pela taxa de bit do processo. Portanto:

$$E_c = \frac{C}{R_c} \quad (10)$$

A energia por bit, em J/bits, é a potência C da portadora, em W, dividida pela taxa de transmissão de bits, em bits/s.

Quando expressas em dB, a relação sinal-ruído depois da codificação (E_c/N_0) se relaciona à relação sinal-ruído sem codificação (E_b/N_0) por:

$$\left[\frac{E_b}{N_0} \right]_{dB} = \left[\frac{E_c}{N_0} \right]_{dB} - 10 \log \rho \quad (11)$$

Já o embaralhamento é uma técnica para distribuir a energia de um sinal pelo espectro eletromagnético. Ou seja, é uma forma de uniformizar a potência de uma portadora em todas as frequências presentes na mensagem.

É utilizado para reduzir os efeitos de interferência entre sistemas que operam na mesma frequência. O embaralhamento faz uma sequência de bits qualquer assumir as características de uma sequência de bits totalmente aleatória, com níveis de potência similares para cada componente de frequência do espectro.

Um exemplo de embaralhador, mostrado em Maral e Bousquet (2009), é o em que uma sequência de bits de entrada é misturada com uma sequência pseudoaleatória por meio de adições módulo 2. No receptor, o desembaralhamento é

feito por um sistema que possui o mesmo gerador de sequência pseudoaleatória em sincronia com o gerador do embaralhador, e a sequência de entrada é misturada com essa sequência pseudoaleatória por adição módulo 2 para recuperar a mensagem original.

2.2.1.3 Modulação

A modulação é um processo que altera as características de um sinal para ele poder se transmitir por determinado canal. Essas características podem ser frequência, fase, amplitude, entre outras.

Um esquema de modulação analógico mistura uma onda portadora (sinal analógico) ao sinal de informação para formar o sinal modulado. Um exemplo é a modulação em amplitude (AM, do inglês *Amplitude Modulation*). Existem várias técnicas diferentes de AM, mas uma das mais comuns é a AM com banda lateral dupla (DSB, do inglês *Double Sideband*), em que uma portadora cossenoidal é multiplicada pelo sinal mensagem e pode ou não aparecer somada ao sinal na saída do modulador.

No caso AM-DSB-SC (SC vem de *Supressed Carrier*, ou com portadora suprimida), o sinal modulado resultante é simplesmente a multiplicação do sinal modulante pela portadora, que resulta em uma soma de duas componentes, uma de frequência igual à soma das frequências f_c da portadora e f_m do sinal mensagem, e outra cuja frequência é igual à diferença $f_c - f_m$.

Existem também modulações digitais. Nesse tipo de modulação, o sinal modulante (sinal que contém a mensagem) é um sinal digital, e ele é mapeado em um dos M_{mod} possíveis símbolos. Se o sinal de entrada tiver l bits de informação, então o total de símbolos possíveis é:

$$M_{mod} = 2^l \text{ símbolos} \quad (12)$$

O sinal de entrada é uma parte do sinal modulante. Pode ser um bit por vez, dois bits, quatro, entre outra quantidade, dependendo do tipo e da ordem de modulação.

A velocidade de sinalização R da figura 8 é, segundo Maral e Bousquet (2009), a quantidade de vezes por unidade de tempo que a portadora de uma modulação digital muda de estado, sendo M_{mod} possíveis estados. Ela depende da taxa de bit do sinal mensagem R_c (é R_c porque passou por uma codificação de canal anteriormente) e de M . A seguinte fórmula pode ser deduzida:

$$R = \frac{R_c}{\log_2 M_{mod}} \text{ baud} \quad (13)$$

Essa taxa de sinalização é dada em baud, ou símbolos por segundo.

A modulação BPSK é o tipo de modulação PSK com $M_{mod} = 2$. Nela, só há dois possíveis símbolos e a entrada é avaliada de um em um bit. Os símbolos possíveis são os mesmos dos bits (0 ou 1), e a diferença de fase entre ambos é de 180° . Com $M_{mod} = 4$, a técnica PSK vira QPSK, e os símbolos possíveis são quatro, com dois bits cada, um relativo à componente em fase e outra à componente em quadratura. Quanto maior a ordem de modulação M_{mod} , maior a eficiência espectral, mas uma modulação de ordem muito alta degrada a taxa de erro de bit BER na hora da recuperação do sinal no receptor, precisando compensar com uma maior energia por bit. Os símbolos PSK têm diferentes fases, mas suas amplitudes são sempre constantes.

Outro esquema de modulação digital bem comum é o QAM. Nele, diferentemente do PSK, não necessariamente a amplitude do sinal modulado é constante.

A probabilidade de erro de bit (BEP, do inglês *Bit Error Probability*) na demodulação é uma medida estatística teórica. Ela depende do tipo de modulação e da energia de bit.

Já a taxa de erro de bit (BER) é uma estimativa da BEP que avalia a taxa de erro de bit real em uma amostra, dividindo o número de bits errados pelo total de bits recebidos.

Como a BEP depende da energia de bit depois da codificação E_c , ou energia por bit de canal, é interessante conseguir calcular a relação sinal-ruído E_c/N_0 a partir da relação portadora-ruído C/N_0 , muito utilizada no balanço de potência de enlaces via satélite. Como E_c é a divisão da potência da portadora C pela taxa de bit R_c (equação 10), tem-se:

$$\frac{E_c}{N_0} = \frac{C}{R_c N_0} \quad (14)$$

2.2.2 Comunicações sem fio

Comunicações via satélite são um dos tipos de comunicações sem fio, devido à grande distância entre satélites ou entre um satélite e uma estação terrena, que dificulta a construção de um meio cabeado para realizar a transmissão de informações. Esta seção focará nos aspectos desse tipo de comunicações.

2.2.2.1 Antenas e enlaces de comunicação

De acordo com o IEEE, antenas são “a parte de um sistema transmissor ou receptor que é projetada para radiar ou receber ondas eletromagnéticas” (IEEE, 2013, p. 17, tradução do autor).

Antenas são transdutores, portanto convertem energia de uma forma para outra. No caso das antenas, elas convertem energia que está na forma de ondas guiadas (cabos, fibras, entre outros) para energia na forma de ondas livres (ondas eletromagnéticas se propagando pelo ar e/ou pelo espaço).

Esses dispositivos podem tanto transmitir sinais quanto recebê-los, realizando essa conversão dependendo de qual papel eles estão fazendo. Tanto na transmissão quanto na recepção de ondas, as antenas mantêm as mesmas características de ganho. Elas tornam possível o paradigma de comunicações sem fio, que é essencial em comunicações via satélite.

As antenas possuem diretividade, portanto elas têm ganho mais elevado em direções específicas do que nas demais. Dessa forma, a cobertura de uma antena que está em um satélite sobre a superfície terrestre abrange todas as regiões visíveis da antena, mas é possível que algumas dessas regiões recebam sinais mais potentes devido ao ganho da antena naquela direção em específico ser maior do que em outras direções.

A potência de uma antena é um valor fixo, mas a densidade de potência percebida por um receptor de um sinal dessa antena depende de sua posição em relação à antena, por causa da diretividade da antena.

O ganho de uma antena, segundo Pratt e Allnutt (2020, tradução do autor), é “uma medida da capacidade da antena de direcionar energia em uma direção específica, ao invés de ao redor dela inteira”.

Diferentemente das antenas reais, a antena isotrópica é um modelo ideal que é utilizado para calcular os ganhos de antenas reais. Essa antena emite radiação eletromagnética de maneira uniforme ao seu redor, gerando um diagrama de radiação na forma da superfície de uma esfera centrada na antena. Isso significa que, independentemente da direção em que esteja o receptor, ele vai receber a mesma densidade de potência que qualquer outro.

Assim, o ganho é definido para uma antena real em relação à antena isotrópica. Se, em determinada direção, a densidade de potência radiada por uma antena for o dobro daquele radiado pela antena isotrópica, o ganho é 2 em relação à antena isotrópica. Normalmente, utiliza-se o decibel para medir ganho. A equação abaixo mostra a transformação de uma razão entre potências (uma potência P_1 dividida por uma potência P_2) para decibel:

$$x \text{ dB} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (15)$$

Portanto, seguindo o exemplo em que o ganho de uma antena é 2 em relação a uma antena isotrópica, aplicando a equação 15, concluímos que seu ganho, em dB, é $10 \cdot \log(2) \approx 3$ dBi. O “i” após o decibel indica que o ganho é em relação a uma antena isotrópica na direção analisada.

O ganho de uma antena é algo característico dela. Por isso, é possível estimar o ganho de uma antena a partir de suas características físicas e da eficiência de abertura, que também é algo característico dela. Ele depende da área A dessa antena e da sua eficiência de abertura, ou eficiência de radiação, η . Portanto, segundo Maral e Bousquet (2009):

$$G = \frac{\eta \cdot 4\pi \cdot A}{\lambda^2} \quad (16)$$

Na equação 16, o ganho é dado sem unidade de medida, e a área A e o quadrado do comprimento da onda transmitida λ^2 devem estar na mesma unidade, normalmente m^2 .

O comprimento de onda λ pode ser calculado considerando-se a velocidade de propagação da onda como a velocidade da luz no vácuo. Portanto:

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ m} \quad (17)$$

Na equação 17, o comprimento de onda λ tem como unidade de medida o metro, caso a velocidade da luz c seja expressa em m/s e a frequência f seja em Hz.

Pelo vetor de Poynting, sem nenhuma perda adicional considerada, é possível calcular a densidade de potência radiada por uma antena isotrópica. De acordo com Maral e Bousquet (2009), devido ao diagrama de radiação da antena isotrópica ser

uma esfera centrada na própria antena, que é pontual, a densidade de potência radiada por ela a uma distância r qualquer é dada por:

$$\Phi_i = \frac{P_t}{4\pi r^2} \text{ W/m}^2 \quad (18)$$

Na equação acima, P_t é a potência transmitida, em W, r é a distância entre o ponto analisado e a antena e Φ_i é a densidade de potência radiada pela antena isotrópica, dada em W/m².

No caso de antenas diretivas, que possuem um ganho de transmissão G_t , a fórmula para a densidade de potência a uma distância r se transforma em:

$$\Phi = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \text{ W/m}^2 \quad (19)$$

A fórmula acima considera o ganho G_t como o ganho da antena transmissora na direção em que se encontra o ponto receptor, que está a uma distância r da antena.

Outro conceito relevante é o de Potência Efetivamente Radiada de Forma Isotrópica (EIRP, do inglês *Effective Isotropic Radiated Power*), que é a multiplicação da potência da antena pelo seu ganho, ou a soma das duas medidas em dB. É dada em W, no caso linear, ou em dbW no caso logarítmico. Ele indica quanto de potência é necessário utilizar para transmitir o mesmo sinal com as mesmas características por uma antena isotrópica, que tem ganho unitário. Portanto, chamando a potência transmitida de P_t e o ganho da transmissão de G_t :

$$EIRP = P_t \cdot G_t \quad (20)$$

A potência recebida por uma antena diretiva que se encontra a uma distância r da antena transmissora (também diretiva) pode ser calculada a partir da equação 19.

Segundo Maral e Bousquet (2009), essa potência recebida (P_r) é a multiplicação da densidade de potência transmitida Φ pela área efetiva da antena receptora A_{effr} , que nada mais é do que a multiplicação da área de abertura dessa antena pela sua eficiência de abertura. Logo:

$$P_r = \Phi \cdot A_{effr} = \frac{\eta_r P_t G_t A_{rec}}{4\pi r^2} W \quad (21)$$

Na equação 21, logo acima, o índice r denota grandezas relacionadas à antena receptora. Já a área da antena receptora é A_{rec} . Segundo a equação 16, o ganho de uma antena pode ser encontrado a partir de sua área efetiva. Chamando G_r de ganho da antena de recepção e isolando-o a partir da equação 16, a equação 21 se transforma em:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2} W \quad (22)$$

Na equação 22 acima, o denominador representa a perda de potência devida à distância entre as antenas no espaço livre. É uma perda por difusão pelo percurso percorrido pela onda eletromagnética. Chamando essa perda de L_{fs} , a equação toma a seguinte forma:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_{fs}} W \quad (23)$$

$$L_{fs} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 \quad (24)$$

Mas as equações 18, 19, 21, 22 e 23 funcionam apenas quando não há perdas adicionais nesse enlace de comunicações. Caso haja perdas, a potência recebida diminui. Cada perda adicional pode ser modelada como um circuito que gera uma perda e que está em série com os demais, o que leva a um efeito multiplicativo no cálculo do ganho, portanto os inversos das perdas são multiplicados. Chamando de L_{add} o resultado equivalente de várias perdas adicionais, a fórmula para a potência recebida em um meio com perdas adicionais se transforma em:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_{fs} L_{add}} W \quad (25)$$

Além das perdas de potência relacionadas a um enlace de comunicações, há o ruído presente no sistema de recepção, modelado como Ruído Gaussiano Branco Aditivo (AWGN, do inglês *Additive White Gaussian Noise*). Esse ruído AWGN possui uma densidade espectral de potência constante em toda a banda.

É possível definir a temperatura equivalente de ruído de um sistema (T_s) como a temperatura que um resistor conectado a uma versão não ruidosa do sistema deve ter para gerar a mesma potência de ruído gerada pela fonte do sistema real.

A partir do conceito de temperatura equivalente de ruído, é possível calcular a densidade espectral de potência de ruído de um sistema (N_0) (MARAL; BOUSQUET, 2009):

$$N_0 = kT_s \text{ W/Hz} \quad (26)$$

Na equação 26, logo acima, a densidade espectral de potência de ruído N_0 , em W/Hz, é a multiplicação da constante de Boltzmann k pela temperatura equivalente de ruído do sistema T_s , em K. A constante de Boltzmann, em dB, é:

$$k \approx -228,6 \text{ dBW/Hz.K} \quad (27)$$

Por sua vez, a potência de ruído N , em W, pode ser calculada a partir da densidade N_0 como:

$$N = N_0 \cdot B_t \text{ W} \quad (28)$$

O termo B_t indica a banda, em Hz, utilizada na transmissão de um sinal por aquele sistema.

A partir da equação 26, a densidade de potência de ruído N_0 pode ser substituída no cálculo da relação sinal-ruído C/N_0 . Além disso, a potência da portadora C é a potência recebida P_r da equação 25. Portanto, a relação sinal-ruído C/N_0 pode ser reescrita como:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_t G_t G_r}{L_{fs} L_{add} k T_s} \text{ Hz} \quad (29)$$

Pode-se converter essa razão na razão sinal-ruído C/N , considerando a largura da banda do sinal transmitido. Portanto:

$$\frac{C}{N} = \frac{C}{N_0 B_t} = \frac{P_t G_t G_r}{L_{fs} L_{add} k T_s B_t} \quad (30)$$

Assim, a partir da temperatura equivalente de ruído do sistema, é possível calcular a relação sinal-ruído, que é um indicador da qualidade de uma transmissão por esse sistema.

Mais um conceito relevante aos enlaces de comunicação é o da figura de mérito (G_r/T_s). Sua unidade é K^{-1} . Esse parâmetro caracteriza o ganho da antena dividido

pela temperatura equivalente de ruído do sistema que possui aquela antena, portanto é um indicador de desempenho característico de um sistema receptor.

A partir da figura de mérito, é possível isolar a temperatura equivalente T_s e alterar a equação 30. Antes, porém, convém explicar as diferenças entre os enlaces de um sistema de comunicações via satélite.

Um sistema de comunicações via satélite típico possui dois enlaces: um em que a estação terrestre transmite informações para o satélite, ou enlace de subida *uplink*, e outro em que o satélite transmite informações para a estação, o chamado enlace de descida (*downlink*).

Considerando apenas o enlace de descida, e levando em consideração a figura de mérito, a equação 30 pode ser reescrita como:

$$\frac{C}{N_d} = \frac{P_{td} G_{td} \left(\frac{G_r}{T_s} \right)_e}{L_{fs_d} L_{add_d} k B_t} \quad (31)$$

Na equação 31, o índice *d* representa parâmetros do *downlink*, e o índice *e* representa parâmetros da estação terrena. Portanto, P_{td} é a potência de transmissão no enlace de descida, que é a potência de transmissão do satélite, G_{td} é o ganho da antena transmissora do satélite, $(G/T_s)_e$ é a figura de mérito da estação terrena (que é a receptora nesse enlace) e as perdas são relativas a esse enlace.

É possível formular uma equação equivalente para o enlace de subida, trocando os parâmetros por aqueles relativos ao *uplink*, e a figura de mérito utilizada passa a ser a do satélite, que é o receptor nesse enlace. Então:

$$\frac{C}{N_u} = \frac{P_{tu} G_{tu} \left(\frac{G_r}{T_s} \right)_s}{L_{fs_u} L_{add_u} k B_t} \quad (32)$$

A relação sinal-ruído C/N total do sistema é a relação sinal-ruído conjunta dos dois enlaces. De acordo com Pratt e Allnutt (2020), essa razão equivalente é o inverso das somas dos inversos das relações sinal-ruído de cada enlace. Se houver apenas um enlace de subida e um de descida, então:

$$\frac{C}{N_T} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{C}{N_u}} + \frac{1}{\frac{C}{N_d}}} \quad (33)$$

Na equação acima, o índice T indica que é essa a relação sinal-ruído total do sistema.

As equações 31, 32 e 33 podem ser passadas para dB e passam a ter as seguintes formas:

$$\frac{C}{N_{d_{dB}}} = P_{t_{dB}} + G_{t_{dB}} + \left(\frac{G}{T_s}\right)_{e_{dB}} - L_{fs_{dB}} - L_{add_{dB}} - 10 \log k - 10 \log B_t \quad (34)$$

$$\frac{C}{N_{u_{dB}}} = P_{t_{u_{dB}}} + G_{t_{u_{dB}}} + \left(\frac{G}{T_s}\right)_{s_{dB}} - L_{fs_{u_{dB}}} - L_{add_{u_{dB}}} - 10 \log k - 10 \log B_t \quad (35)$$

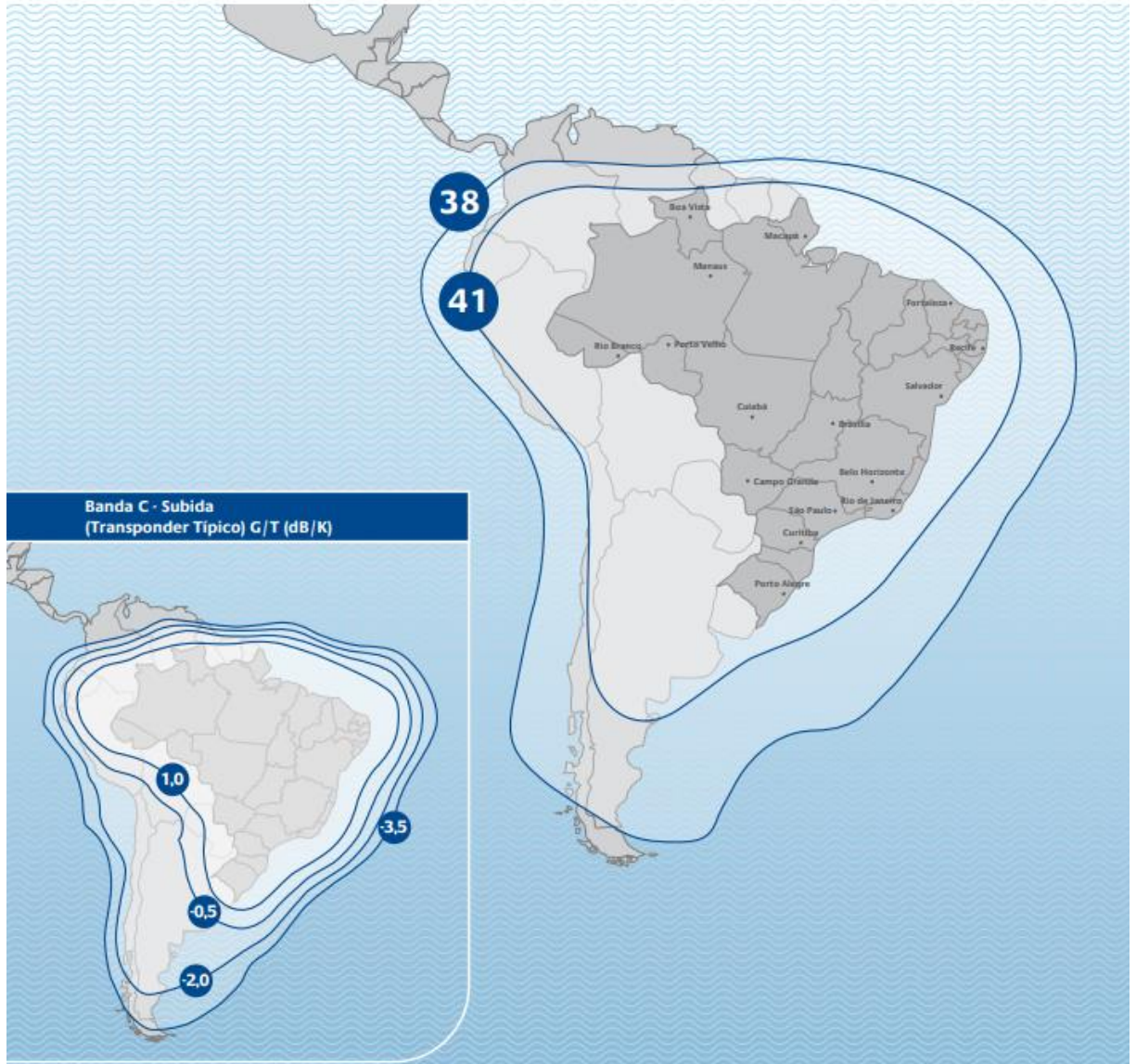
$$\frac{C}{N_{T_{dB}}} = -10 \log \left(10^{-\frac{C}{N_{u_{dB}}/10}} + 10^{-\frac{C}{N_{d_{dB}}/10}} \right) \quad (36)$$

Um exemplo prático de ganho e mapa de cobertura é o da antena que opera em banda C (aproximadamente entre 4 e 8 GHz) do satélite Star One C3, da Embratel, que tem o mapa de cobertura ilustrado na figura abaixo:

Figura 9 Mapa de cobertura do satélite Star One C3 em banda C

Banda C - Descida Brasil e Am. do Sul (Transponder Típico) – EIRP (dBW)

O Star One C3 é o terceiro satélite da terceira geração da frota Star One que cobre praticamente toda a América do Sul incluindo o offshore brasileiro. Na banda Ku cobre também a região Andina e Flórida.



Fonte: EMBRATEL (2023)

Na figura 9, veem-se dois mapas de cobertura: um para o enlace de descida e outro para o enlace de subida de um *transponder* operando em banda C no satélite Star One C3.

O mapa de cobertura da direita é relativo ao enlace de descida, e mostra a EIRP, em dBW. Em qualquer lugar dentro do Brasil, garante-se uma EIRP de pelo

menos 41 dBW. Já em outros lugares da América do Sul, como no centro da Colômbia e da Venezuela, no norte da Guiana, do Suriname e da Guiana Francesa, no oeste do Equador, no sudoeste do Peru e do Chile e no sul da Argentina, garante-se a recepção de um sinal com EIRP de pelo menos 38 dBW. Isso significa que a EIRP é maior e, caso os outros parâmetros da comunicação permaneçam fixos, isso leva a uma maior relação sinal-ruído em enlaces cuja estação terrena está presente no Brasil, de acordo com a equação 34.

Já o pequeno mapa na esquerda da imagem mostra a figura de mérito G_r/T_s do *transponder* no enlace de subida, em dB/K. Dentro do Brasil, garante-se uma figura de mérito de pelo menos 1 dB/K. Em outros lugares da América do Sul, essa figura de mérito vai descendo quanto mais se afasta do Brasil, chegando a -3,5 dB/K. Isso significa que, caso os outros parâmetros permaneçam fixos, o sinal vai perdendo relação sinal-ruído quanto mais se afasta do Brasil, conforme a equação 35.

2.2.2.2 Degradações do sinal

Comunicações sem fio sofrem muito mais com atenuações e outras degradações, pois as ondas eletromagnéticas que são transmitidas nesses tipos de enlace estão muito mais expostas ao ambiente externo, ao invés de estarem contidas em um guia de onda.

A mais básica das perdas é a perda por difusão no percurso pelo espaço livre (L_{fs}). Como foi mostrado na equação 24, ela depende do quadrado da distância entre transmissor e receptor e inverso do quadrado do comprimento da onda transmitida. Isso quer dizer que quanto mais distantes forem o transmissor e o receptor e quanto maior a frequência do sinal propagado pelo enlace entre eles, maior a perda por percurso.

Neste projeto, considera-se o ambiente em que se encontram as antenas das estações terrenas como um ambiente sem obstrução por árvores ou prédios, e sem reflexão do sinal. Considera-se que o sinal se propaga entre a estação terrena e o satélite sem refletir por nenhum obstáculo além daqueles presentes na atmosfera terrestre.

Outra grande degradação de sinal é a interferência eletromagnética, que não será considerada neste trabalho. Ela é o resultado da interação entre sinais que possuem componentes com a mesma frequência. Devido à grande quantidade de aparelhos que operam em radiofrequência, ela é um grande problema a ser considerado em qualquer sistema que utiliza ondas de rádio.

Além de uma banda de frequências, as ondas que portam os sinais transmitidos também possuem polarização. Polarizações ortogonais, como a vertical e a horizontal, permitem que dois sinais na mesma frequência não interfiram entre si. Já a interação entre polarizações lineares (vertical ou horizontal) e circulares gera uma interferência, porém com intensidade menor do que a interferência causada em sinais com a mesma polarização. Dessa forma, o transmissor e o receptor devem utilizar o mesmo esquema de polarização para a recuperação da onda ocorrer sem perdas adicionais.

Um outro tipo de degradação é o causado pelo efeito Doppler. Esse fenômeno físico faz com que, devido ao movimento relativo entre o transmissor e o receptor, a frequência do sinal que o receptor percebe seja diferente da frequência original transmitida. Esse efeito é importante de ser levado em consideração em satélites não geoestacionários, uma vez que eles se movem em relação a uma estação terrena fixa, no caso de um serviço de satélite fixo, ou até mesmo em relação a um usuário móvel, no caso de um serviço de satélite móvel.

Segundo CAVALCANTE (2018), o desvio de frequência Doppler em satélites de órbita não-geoestacionária, Δf , pode ser equacionado por:

$$\Delta f = \frac{-f}{c} \frac{ds(t)}{dt} \quad (37)$$

Na equação 37, f é a frequência original do sinal transmitido, c é a velocidade da luz no vácuo e $s(t)$ é a posição do satélite em relação ao receptor. Sabe-se que a derivada da posição de um corpo em relação ao tempo resulta na velocidade desse corpo. Portanto, chamando a velocidade do satélite em relação ao observador de $v(t)$, pode-se reescrever a equação acima como:

$$\Delta f = \frac{-f}{c} v(t) \quad (38)$$

Na fórmula acima, as frequências são dadas em Hz, a velocidade da luz no vácuo é de aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s e a velocidade do satélite é dada em m/s. Por conta do sinal negativo, a velocidade $v(t)$ é a subtração entre a velocidade do transmissor e a velocidade do receptor. Portanto:

$$v(t) = v_t(t) - v_r(t) \quad (39)$$

Dessa forma, considerando um enlace entre uma estação terrena fixa e um satélite, no caso do enlace de subida, o transmissor (estação terrena) está parado e o receptor (satélite) está se movendo, portanto $v(t)$ assume um valor menor que zero. No enlace de descida, porém, ocorre o oposto, e $v(t)$ se torna positivo.

O desvio de frequência Doppler precisa ser levado em consideração em satélites não-geoestacionários porque pode ser alto o suficiente para gerar um descasamento de frequências entre transmissor e receptor.

As formas de degradação dos sinais dos sistemas de comunicação via satélite que serão mais exploradas neste trabalho, além da perda por percurso e do desvio de frequência Doppler, são as degradações pela atmosfera.

Podem-se dividir essas degradações em duas grandes classes: degradações troposféricas, que ocorrem na camada atmosférica mais próxima à superfície terrestre, e degradações ionosféricas, que são fruto da interação do sinal transmitido com os elétrons presentes na ionosfera.

2.2.2.2.1 Degradações troposféricas

Elementos na troposfera, camada mais baixa da atmosfera, causam degradações que afetam mais os sinais de frequências mais elevadas, em especial da banda SHF em diante (vide tabela 1), e sinais transmitidos quando o ângulo de elevação do transmissor em relação ao receptor é pequeno, uma vez que isso significa que há uma distância maior entre esses dois terminais, resultando em um caminho maior pelo qual o sinal deve se propagar.

Neste projeto, consideraram-se apenas enlaces de comunicação entre uma estação terrena e um satélite, mais especificamente o enlace de subida, em que o transmissor é a estação terrena e o receptor é o satélite. Isso porque informações relacionadas à temperatura de ruído de alguns satélites podem ser facilmente encontradas, sendo possível utilizar dados de figuras de mérito reais, então é possível modelar satélites reais como receptores de forma mais precisa. Já as estações terrenas precisariam ter suas temperaturas de ruído modeladas de forma estimada.

A recomendação ITU-R P. 618 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2017) auxilia na estimativa das atenuações causadas pelos efeitos troposféricos.

Existem várias degradações troposféricas, mas as tratadas aqui serão apenas as que geram efeitos significantes em sinais quando o ângulo de elevação é maior que 10° , de acordo com a mesma recomendação da ITU. Essas degradações são a atenuação por gases atmosféricos, a atenuação por chuva, a cintilação troposférica, a atenuação causada pelas nuvens e a despolarização causada pela chuva.

Começando pela atenuação por absorção de gases atmosféricos, a recomendação ITU-R P. 618 apenas explica um pouco sobre quais são os parâmetros importantes para o seu cálculo e referencia a recomendação ITU-R P. 676 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2022), que é a recomendação que dá um passo a passo para o cálculo dos efeitos dessa atenuação. Essa atenuação depende da frequência do sinal transmitido pelo enlace, pressão atmosférica total no local da estação terrena, pressão atmosférica causada pelo vapor de água nesse local, temperatura da superfície no mesmo lugar, densidade do vapor de água nesse

lugar e ângulo de elevação entre estação terrena e satélite. O cálculo aproximado dessa atenuação, utilizado neste trabalho, é válido para frequências entre 1 e 350 GHz.

Já a atenuação causada pela chuva é toda quantificada na recomendação ITU-R P. 618. Ela depende do ângulo de elevação entre estação e satélite, da frequência do sinal transmitido, da altitude em que se encontra a estação terrena, do raio da Terra e da latitude da estação terrena. É calculada a atenuação causada pela chuva excedida em apenas 0,01% do ano, e esse resultado pode ser extrapolado para uma indisponibilidade (porcentagem do tempo em que a atenuação excede esse valor) entre 0,001% e 5% ao ano. O cálculo utilizado neste trabalho é válido para frequência de até 55 GHz.

A chuva também causa um efeito de despolarização no sinal, que gera mais atenuações na potência do sinal transmitido. Porém, a recomendação fornece um método de cálculo dessa atenuação apenas enlaces com ângulos de elevação menores ou iguais a 60 °. Portanto, essa degradação não será considerada neste trabalho.

A atenuação causada pela cintilação troposférica é devida aos múltiplos percursos gerados durante a transmissão de um sinal. Esses múltiplos percursos ocorrem pelas não homogeneidades presentes na troposfera, que é formada por vários gases distintos. Essas não-homogeneidades geram trechos com índices de refração distintos no meio por onde se propaga o sinal, alterando o curso das ondas eletromagnéticas e causando múltiplos percursos, que geram flutuações na amplitude e na fase do sinal recebido. Essa atenuação também é quantificada pela recomendação ITU-R P. 618.

O cálculo dessa atenuação utilizado é válido para ângulos de elevação maiores ou iguais a 5 °, e depende da temperatura do local onde se encontra a estação terrena, da umidade do ar nesse local, da frequência do sinal (entre 4 e 20 GHz), do ângulo de elevação e do diâmetro e da eficiência de abertura da antena da estação terrena.

A atenuação causada pelas nuvens é calculada na recomendação ITU-R P. 840 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2019a). O cálculo depende da frequência do sinal (até 200 GHz), do ângulo de elevação (entre 5 e 90 °), da densidade de água líquida na nuvem ou na névoa e da temperatura dessa água.

Por fim, na recomendação ITU-R P. 618, é dado um cálculo para a atenuação troposférica total, que é um resultado gerado a partir das quatro atenuações previamente descritas. Mais detalhes sobre os cálculos serão dados no capítulo 3, em que serão mostrados os códigos da simulação.

2.2.2.2 Degradações ionosféricas

A ionosfera, por conter diversos íons, tem uma grande presença de elétrons livres. Esses elétrons interagem com ondas eletromagnéticas, gerando diversos tipos de degradações nos sinais portados por elas. Esses efeitos ocorrem com maior intensidade em sinais de frequências mais baixas, ao contrário dos efeitos troposféricos.

Essas degradações são quantificadas pela recomendação ITU-R P. 531 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2019b). A primeira é a rotação de Faraday, um efeito que rotaciona o plano de polarização de uma onda eletromagnética de polarização linear. Essa rotação é causada pelo campo magnético da Terra, e depende da frequência do sinal, do campo magnético médio da Terra e da densidade total de elétrons (TEC, do inglês *Total Electron Content*) presentes no percurso do sinal. Essa rotação é dada em graus, e há uma atenuação relacionada a esse ângulo.

Além da rotação de Faraday, existe o atraso de grupo, que é a diminuição da velocidade de propagação da onda pela ionosfera, causada pelos íons presentes nessa camada da atmosfera. Ele depende da densidade total de elétrons (TEC) e da frequência do sinal. É o atraso adicional que a onda sofre ao se propagar pela ionosfera. Ambos os efeitos serão considerados no trabalho.

Já a absorção, refração e dispersão são também efeitos ionosféricos que não serão tratados neste trabalho, uma vez que geram atenuações muito pouco significativas para sinais de frequência igual a superior a 1 GHz e com ângulo de elevação maior ou igual a 30 ° (vide tabela 3 do anexo 1 da recomendação ITU-R P. 531).

Por fim, a cintilação ionosférica gera efeitos similares aos da cintilação troposférica, com rápidas flutuações na amplitude e na fase do sinal transmitido. Porém, a natureza dessa cintilação é diferente, uma vez que ela ocorre por causa dos íons presentes na ionosfera.

As regiões mais afetadas pela cintilação ionosférica são as equatoriais e as de altas latitudes. Como o fenômeno da chuva também é mais intenso nas zonas equatoriais, essas regiões sofrem bastante com ambas as degradações. Isso forma degradações conjuntas que tanto despolarizam quanto causam rápidas flutuações no sinal.

O índice que mede a intensidade dessa cintilação é o índice S_4 , que depende do local em que se está medindo a cintilação, do horário e da época do ano.

Como muitos sistemas de comunicações via satélite operam nas bandas UHF em diante, ou seja, com pelo menos 300 MHz de frequência, normalmente é preferível que a frequência utilizada no enlace de subida seja mais alta do que a frequência do enlace de descida. Isso porque, ao se elevar a frequência de um sinal, ele fica mais suscetível a degradações troposféricas e à perda por percurso no espaço livre (vide equação 24).

Como um satélite depende de baterias carregadas por energia solar para transmitir seus sinais, normalmente ele opera com potências de transmissão mais baixas do que as da estação terrena. Então, a relação sinal-ruído do enlace de subida já fica um pouco degradada por esse fator. Dessa forma, para compensar, utilizam-se frequências mais baixas no *downlink*, a fim de reduzir um pouco as perdas mencionadas e elevar um pouco a relação sinal-ruído do enlace.

2.3 Textos lidos

Alguns dos principais textos lidos para a realização deste trabalho serão organizados em uma tabela, com um breve resumo de seus conteúdos. Esses textos auxiliaram na fundamentação teórica de comunicações via satélite, na confecção dos códigos da simulação, na verificação dos cálculos implementados em forma de código e na análise dos resultados.

Tabela 6 Textos lidos para a realização do trabalho e resumos de seus conteúdos**(continua)**

| Número do texto | Resumo dos conteúdos |
|------------------------|---|
| I | Essa recomendação da ITU fornece informações e cálculos necessários para contabilizar os efeitos de múltiplas degradações troposféricas sobre um sinal de um enlace de comunicação via satélite, incluindo atenuações por chuva, nuvens, gases e cintilação troposférica, além da despolarização causada pela chuva. Os cálculos dessas atenuações são margens que só serão excedidas p por cento do tempo ao ano. O valor p é também chamado de indisponibilidade, e é uma função distribuição acumulada complementar. |
| II | Essa recomendação da ITU é referenciada pela I . Ela apresenta fórmulas que quantificam os efeitos da atenuação por gases atmosféricos, incluindo o oxigênio e vapor d'água. Esses cálculos também dependem da indisponibilidade p . |
| III | Outra recomendação referenciada por I . Essa quantifica os efeitos da atenuação causada por nuvens e névoa. A margem definida nessa recomendação também depende da indisponibilidade p . |
| IV | Essa recomendação da ITU apresenta cálculos e informações sobre degradações causadas ao sinal quando a onda eletromagnética que o porta se propaga pela ionosfera, uma camada da atmosfera que contém alta densidade de elétrons livres. Entre as degradações quantificadas nesse texto, levaram-se em consideração a rotação de Faraday e o atraso de grupo. Uma importante degradação é a cintilação ionosférica, que não foi levada em conta neste trabalho por falta de tempo. |
| V | Esse livro didático contempla os fundamentos e todas as etapas das comunicações via satélite, incluindo uma breve história sobre o assunto. |
| VI | Livro didático com um conteúdo bem similar ao de V , porém com uma abordagem didática diferente. |
| VII | Assim como V e VI , é um livro didático sobre comunicações via satélite. Por ser de outro autor, tem uma abordagem distinta dos dois anteriores. |
| | |

| Tabela 6 Textos lidos para a realização do trabalho e resumos de seus conteúdos (conclusão) | |
|--|--|
| VIII | Um <i>site</i> que possui diversas informações sobre satélites lançados, incluindo a divulgação do TLE de vários deles. Nessa página em específico, os autores explicam cada campo de um TLE, informação que foi essencial para a construção das tabelas de 2 a 5 deste trabalho. |
| IX | A documentação da biblioteca <i>Requests</i> , escrita em Python, foi útil para este trabalho porque essa biblioteca foi utilizada para baixar duas informações utilizadas no código: o TLE dos satélites e a TEC (densidade total de elétrons) na ionosfera, ambos atualizados de tempos em tempos. |
| X | Essa biblioteca (<i>PyEphem</i>) implementa cálculos astronômicos em Python. A partir de um TLE, ela permite modelar um satélite em órbita e uma estação terrena e calcula a distância entre ambos, ângulos de elevação e azimute, entre outras informações valiosas. |
| XI | A biblioteca <i>ITU-Rpy</i> , para Python, implementa diversas das equações formuladas nas recomendações de I a III . Foi utilizada para quantificar as atenuações troposféricas, que são uma parte fundamental do balanço de potência do enlace considerado. |
| XII | Essa biblioteca (<i>Matplotlib</i>) permite a confecção de gráficos no Python. As funções presentes nela são muito similares às funções de construção de gráficos presentes no <i>Matlab</i> , facilitando seu uso caso o programador tenha familiaridade com esse programa. |
| XIII | Essa documentação foi utilizada a fim de se conseguir fazer uma simulação de qualidade, explorando diversas funcionalidades do <i>GNU Radio</i> . |
| XIV | A simulação realizada neste trabalho tem vários parâmetros que podem ser alterados, mas ela é aplicada especialmente a um enlace satélite AlfaCruz e uma estação terrena. Dessa forma, esse relatório foi de suma importância para ser possível modelar esse satélite na simulação. |

Os números dos textos (primeira coluna da tabela 6) são referentes às bibliografias que serão explicadas a seguir.

I: International Telecommunication Union (2017). **II:** International Telecommunication Union (2022). **III:** International Telecommunication Union (2019a). **IV:** International Telecommunication Union (2019b). **V:** Maral e Bousquet (2009). **VI:** Pratt e Allnutt (2020). **VII:** Ippolito JR. (2017). **VIII:** CelesTrak (2022). **IX:** Read the Docs [20--]. **X:**

Rhodesmill (2020). **XI**: Read the Docs (2023). **XII**: Matplotlib (2023). **XIII**: GNU Radio (2023). **XIV**: Borges et al. (2022). Mais informações sobre alguns desses textos serão apresentadas no Capítulo 3.

3 Metodologia, resultados e discussões

Neste capítulo, entrar-se-á em detalhes sobre todas as etapas práticas realizadas neste trabalho, incluindo o funcionamento do *GNU Radio* e das bibliotecas utilizadas para criar a simulação dentro desse *software*. Além disso, serão vistos resultados gerados pela simulação para diversos parâmetros da transmissão e será feita uma análise desses resultados.

3.1 Metodologia

O *GNU Radio* é um programa que permite simular transmissões de rádio, além de possibilitar a construção de Rádio Definido por Software (SDR, do inglês *Software Defined Radio*) caso o usuário possua equipamentos de radiofrequência disponíveis. Foi utilizado neste trabalho como plataforma de simulação, mas com uma expectativa futura de criar uma SDR.

Utilizou-se o *GNU Radio* não só por sua possibilidade de construção de Rádio Definida por Software, mas também por sua interface, que facilita a visualização dos resultados pelo usuário sem a necessidade de construir uma interface utilizando Python. A versão utilizada desse programa foi a versão 3.10.3.0, com Python 3.10.5.

Para a realização deste trabalho, utilizou-se um ambiente virtual *Miniconda*, que é um instalador mínimo do *Conda*, um gerenciador de pacotes. Isso foi feito para isolar os pacotes de bibliotecas instalados da instalação do Python que já estava presente no computador utilizado, além de facilitar a instalação desses pacotes. Além disso, é possível instalar o *GNU Radio* dentro de um ambiente virtual, o que favorece ainda mais o uso desse tipo de instalação. A versão do *Conda* utilizada foi a 4.13.0.

A simulação criada pelo autor neste trabalho realiza uma análise quantitativa de várias degradações causadas sobre um enlace de subida de comunicações entre uma estação terrena e um satélite. O enlace tem como transmissor a estação terrena e o satélite é o receptor da informação. A onda portadora do sinal é considerada tendo uma polarização linear, e sem nenhum tipo de modulação ou codificação do canal.

Consideram-se as atenuações por nuvens, gases, chuva e cintilação troposférica, além da rotação de Faraday, do atraso de grupo, do desvio de frequência Doppler e da perda no espaço livre.

É feita uma quantificação das degradações no momento em que a simulação está executando, e também é possível fazer algumas previsões futuras ou acessar valores relacionados a momentos passados.

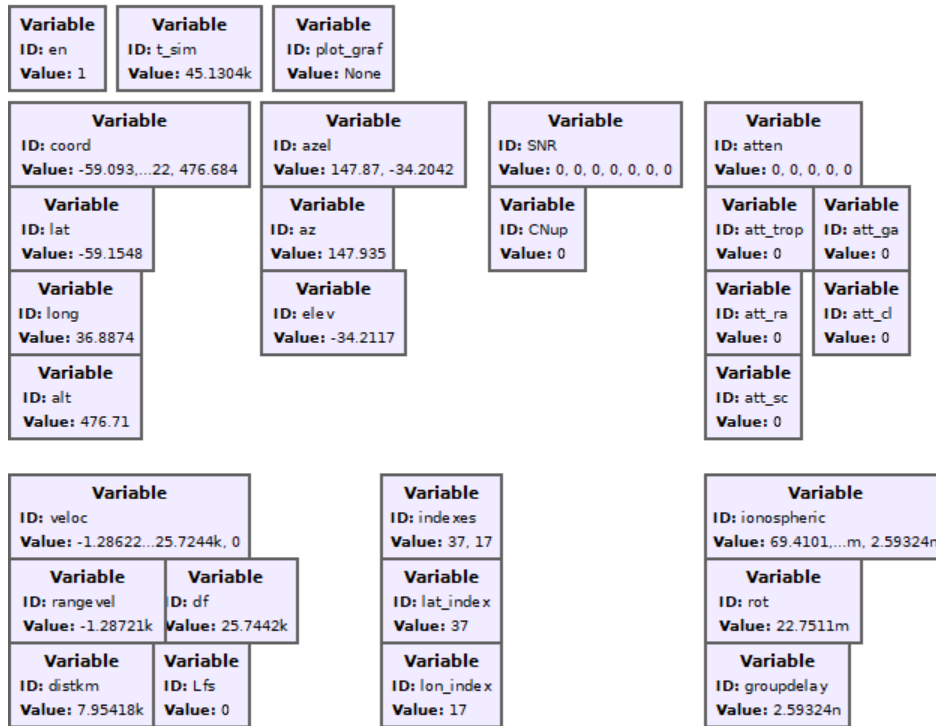
Além da análise das degradações individualmente, realiza-se um balanço de potência desse enlace. Para esse balanço, porém, não se consideram os efeitos da rotação de Faraday e do atraso de grupo, pois essas degradações dependem da densidade total de elétrons na ionosfera, que varia bastante conforme o horário, o que impossibilita, da forma como se está implementado o código, a realização de previsões futuras, que é uma das funcionalidades do código.

Os resultados gerados pela simulação são úteis no auxílio à operação de uma missão espacial, e não nas previsões iniciais de uma simulação, pois esse tipo de previsão requer modelos mais completos do que os modelos SGP, uma vez que modelos desse tipo geram imprecisões nos resultados que aumentam rapidamente com o decorrer do tempo após a época de observação inicial.

3.1.1 Estrutura da simulação

A simulação, feita no *GNU Radio*, é estruturada em blocos. Esses blocos podem fazer o papel de variáveis no código em *Python*, podem ser para a visualização de resultados, ou então botões da interface com que o usuário consegue interagir, além de poderem ser configurações gerais da simulação, como linguagem de programação usada (Python ou C++), tipo de interface de usuário, taxa de amostragem, entre outras. Por fim, um tipo especial de bloco é o módulo Python, que contém todo o código executado na simulação que não tenha a ver com a interface de usuário.

Figura 10 Variáveis da simulação do autor



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A figura 10, logo acima, ilustra as variáveis utilizadas na simulação. A primeira delas, chamada *en*, varia entre os valores 1 e 0 e habilita ou desabilita a simulação, respectivamente. Já a variável *t_sim* é o tempo que a simulação leva em consideração para calcular as degradações relacionadas, podendo ser o tempo atual, um tempo passado ou um tempo futuro (previsão). Ela é retornada pela função *get_date*, que será explicada na seção sobre o módulo Python.

A variável *plot_graf* serve apenas para chamar a função *grafico*, presente no módulo Python, que realiza um gráfico contendo o balanço de potência e o ângulo de elevação para cada passo temporal.

Uma variável chamada *coord* é resultado do retorno da função *get_coord*, que é do módulo Python. Ela é um vetor de três posições, e os valores de cada posição são armazenados nas seguintes variáveis: *lat*, que armazena a latitude do ponto subsatélite no momento, *long*, que é o valor da longitude desse mesmo ponto, e *alt*, que é a altitude da órbita do satélite naquele instante da simulação.

A variável *veloc* contém os valores do retorno da função *get_vel* do módulo Python. Essa variável é um vetor contendo os quatro valores que a função retorna, e cada um dos quatro é armazenado em uma variável: *rangevel*, que é a velocidade do satélite em relação à estação terrena, *df*, que é o desvio de frequência Doppler, *distkm*, que é a distância, em km, entre a estação e o satélite, e *Lfs*, que é a perda no espaço livre.

Continuando a explicação da figura, *azel* é mais uma variável que armazena o retorno de uma função do módulo Python, dessa vez da função *azel*. Ela é um vetor de duas posições, sendo cada uma armazenada em uma variável: *az* recebe o ângulo de azimute do satélite em relação à estação terrena no momento simulado e *elev* armazena o ângulo de elevação do satélite em relação a essa estação no mesmo momento.

A variável *SNR* armazena os resultados da função *balanço_pot*, que realiza o balanço de potência do enlace, retornando a relação sinal-ruído desse enlace, a área efetiva da antena, o ganho da antena transmissora, a potência dessa mesma antena em dB, o ganho dessa antena em dB, a perda por espaço livre novamente e a banda do sinal transmitido, em dB. Portanto, ela é um vetor de sete posições, mas apenas a primeira posição está armazenada em outra variável, que é *CNup* (relação sinal-ruído do *uplink*).

A variável *atten* guarda o retorno da função *get_att*, que calcula as atenuações troposféricas sobre o sinal, em dB. Ela é um vetor de cinco posições, e cada uma das cinco é armazenada em uma variável: *att_trop*, que é a atenuação troposférica total, *att_ga*, que é a atenuação por gases, *att_ra*, que é a atenuação por chuva, *att_cl*, que armazena o valor da atenuação por nuvens e *att_sc*, relacionada à atenuação por cintilação troposférica.

Outra variável, a chamada de *indexes*, guarda os dois resultados da função *get_indexes*, portanto é um vetor de duas posições. A primeira posição é armazenada na variável *lat_index*, e é relacionada à posição da latitude da estação terrena na tabela da densidade total de elétrons (TEC) baixada no código Python. Já a segunda posição é armazenada em *lon_index*, e é a posição da longitude dessa estação na mesma tabela.

Por fim, a variável *ionospheric* armazena resultados da função *get_tec*, e é um vetor de duas posições. A primeira é relacionada ao valor da rotação de Faraday e é armazenada na variável *rot*. Já a segunda, armazenada na variável *groupdelay*, tem como resultado o atraso de grupo calculado no módulo Python.

Essas variáveis que armazenam resultados de funções também servem para chamar as funções durante a execução da simulação, pois elas passam o tempo simulado como argumento para as funções.

Em seguida, serão explicadas as variáveis controladas pelo usuário da simulação.

Figura 11 Variáveis definidas pelo usuário durante a execução da simulação

| | | |
|---|---|--|
| <p>QT GUI Range ID: lat_e Label: Latitude...terrena (°) Default Value: -15.8 Start: -90 Stop: 90 Step: 100m</p> | <p>QT GUI Range ID: diff Label: Minutos ...tempo atual Default Value: 0 Start: -1.44k Stop: 1.44k Step: 1</p> | <p>QT GUI Range ID: bt Label: Banda do...itido (MHz) Default Value: 15m Start: 1m Stop: 10 Step: 1m</p> |
| <p>QT GUI Range ID: long_e Label: Longitud...terrena (°) Default Value: -47.9 Start: -180 Stop: 180 Step: 100m</p> | <p>QT GUI Range ID: freq Label: Frequenc...sinal (GHz) Default Value: 437m Start: 100m Stop: 20 Step: 100m</p> | <p>QT GUI Range ID: pt Label: Potencia...missora (W) Default Value: 10 Start: 1 Stop: 200 Step: 1</p> |
| <p>QT GUI Range ID: alt_e Label: Altitude...terrena (m) Default Value: 1k Start: -450 Stop: 8.85k Step: 50</p> | <p>QT GUI Toggle Button ID: enable2 Label: Habilitar o grafico Default Value: 0 Initial State: Released Pressed: 1 Released: 0</p> | <p>QT GUI Range ID: gts Label: Figura d...lite (dB/K) Default Value: -25 Start: -100 Stop: 100 Step: 1</p> |
| <p>QT GUI Range ID: pontos Label: Minutos ... do grafico Default Value: 1.44k Start: 1 Stop: 2.88k Step: 1</p> | <p>QT GUI Range ID: p Label: Indisponibilidade (%) Default Value: 100m Start: 1m Stop: 5 Step: 1m</p> | <p>QT GUI Range ID: eta Label: Eficienc...ransmissora Default Value: 500m Start: 50m Stop: 1 Step: 50m</p> |
| <p>QT GUI Range ID: D Label: Diametro...missora (m) Default Value: 1 Start: 100m Stop: 10 Step: 100m</p> | | <p>QT GUI Chooser ID: precisao Label: Precisao do grafico Num Options: 2 Default option: 0 Option 0: 0 Label 0: Um minuto Option 1: 1 Label 1: Um segundo</p> |

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A figura 11, logo acima, mostra todas as variáveis que o usuário da simulação pode controlar. A primeira, denominada *lat_e*, indica a latitude da estação terrena, em

graus, e pode assumir valores entre -90° e 90° , em passos de $0,1^\circ$. O valor padrão é $-15,8^\circ$, que é a latitude média de Brasília.

A variável *long_e*, de forma similar à *lat_e*, controla a longitude da estação terrena simulada, variando de -180° a 180° , em passos de $0,1^\circ$. O valor padrão é $-47,9^\circ$, que é a longitude média de Brasília.

De maneira análoga, *alt_e* controla a altitude de onde está presente a estação terrena, variando de -450 m (nas margens do Mar Morto) até 8850 m (no pico do Everest), em passos de 50 m. O valor padrão é 1000 m, altitude aproximada de Brasília.

A variável *pontos* indica o número de minutos após o tempo simulado que serão considerados para a construção do gráfico. Ela varia de 1 min até 2880 min, em passos de 1 min, o valor padrão é 1440 min (um dia).

Outra variável controlável pelo usuário é a *D*. Seu valor indica o diâmetro da antena transmissora, ou seja, da antena presente na estação terrena, e varia de $0,1$ m até 10 m, em passos de $0,1$ m. O valor padrão é 1 m.

A variável *diff* é a diferença, em minutos, entre o tempo simulado e o tempo real. Por exemplo, se o seu valor for 60 , então o tempo simulado é 60 minutos adiantado em relação ao tempo real. Seu valor varia entre -1440 min e 1440 min, em passos de 1 min, com valor padrão de 0 .

A variável *freq.*, por sua vez, controla a frequência da onda transmitida pelo enlace, em GHz. Ela varia de $0,1$ GHz a 20 GHz (frequência máxima para o cálculo da cintilação troposférica, segundo a recomendação ITU-R P. 618), com valor padrão de 437 MHz, que é a frequência de operação do satélite AlfaCruz.

Existe também um botão chamado *enable2*, que habilita a construção do gráfico. Ao pressionar, a construção é habilitada e, ao soltar, é desabilitada. O estado padrão é não pressionado.

A variável *p* indica a indisponibilidade do enlace, ou a taxa em que as atenuações troposféricas excedem as margens calculadas no módulo Python. Ela varia de $0,001\%$ até 5% (indisponibilidade máxima para os cálculos da atenuação por chuva fornecidos pela recomendação ITU-R P. 618), em passos de $0,001\%$. O pvalor padrão é $0,1\%$.

A variável *bt* controla a banda do sinal transmitido, em MHz. Ela varia entre 0,001 MHz (1 kHz) e 10 MHz, em passos de 0,001 MHz, com valor padrão de 15 kHz, que é a largura de banda dos sinais transmitidos ao AlfaCruz.

De forma similar, a variável *pt* controla a potência de transmissão do sinal, indo de 1 W até 200 W, em passos de 1 W, com valor padrão de 10 W, que é um valor típico de potência de antenas transmissoras.

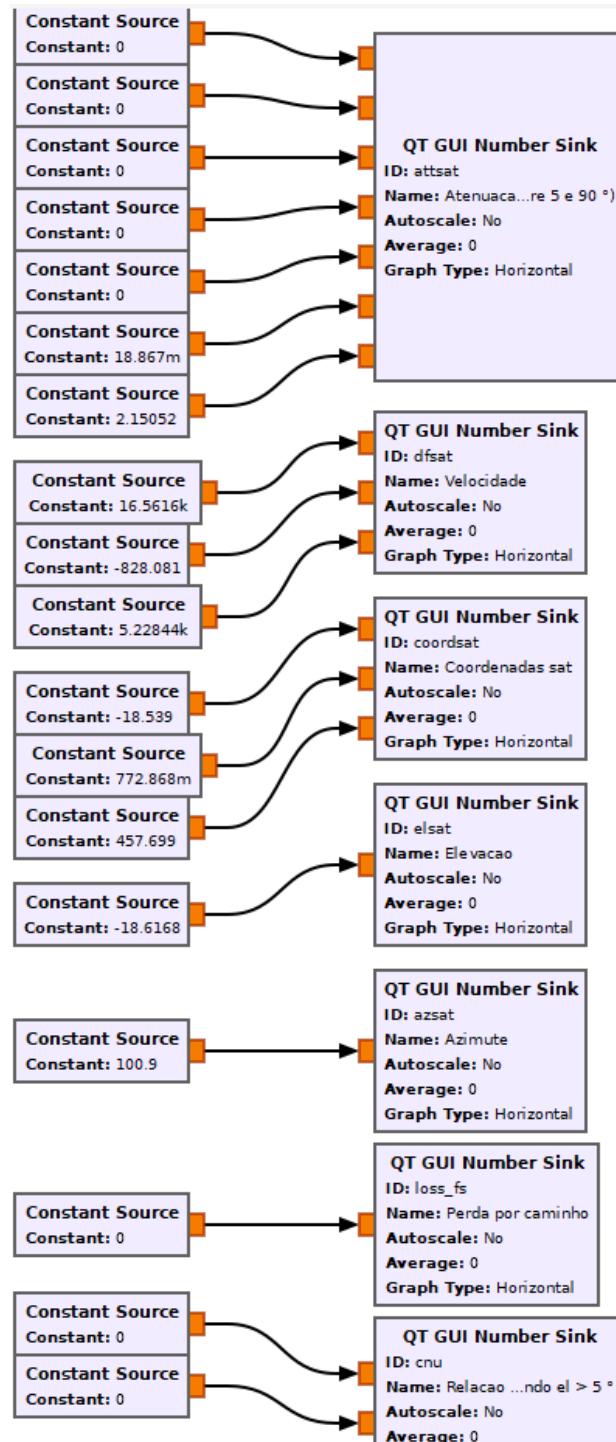
A variável *gts* controla a figura de mérito do satélite, variando de -100 dB/K a 100 dB/K, em passos de 1 dB/K, com valor inicial em -25 dB/K, que é a figura de mérito do AlfaCruz.

Outra variável é *eta*, que é a eficiência de abertura da antena transmissora. Ela varia de 0,05 até 1, (entre 5 % e 100 %), em passos de 0,05, com valor padrão igual a 0,5 (50 % de eficiência é um valor que pode ser encontrado em várias antenas reais).

Por fim, a variável *precisao* controla a precisão do gráfico gerado quando o botão *enable2* é pressionado. Ela tem dois valores: 0 e 1. O valor 0 indica uma precisão de 1 min, e o valor 1 indica uma precisão de 1 s. O valor padrão é 0. Uma precisão maior pode ser necessária em satélites com períodos de visibilidade curtos.

Em seguida, serão explicados os blocos que controlam os gráficos numéricos da simulação.

Figura 12 Estrutura dos blocos de visualização dos resultados



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A figura 12, logo acima, mostra-se a estrutura dos blocos que são utilizados para mostrar os resultados da simulação. Os blocos da esquerda são fontes constantes (*Constant Source*) cujos valores são as variáveis mostradas na figura 10, portanto são variáveis resultantes da execução do código Python, e não variáveis

controladas pelo usuário. Já os blocos da direita (*QT GUI Number Sink*) são responsáveis por gerar um resultado visual a partir das entradas (que são as fontes constantes da esquerda).

De cima para baixo, o primeiro *Number Sink*, *attsat*, gera gráficos numéricos para os resultados calculados das degradações sobre a onda eletromagnética transmitida no enlace. Ele possui 7 entradas, portanto produz 7 gráficos numéricos. A primeira entrada está conectada à fonte que tem como valor a atenuação troposférica total (*att_trop*). A segunda entrada está conectada ao valor de *att_ga*. A terceira, a quarta e a quinta estão conectadas, respectivamente, a fontes contendo os valores de *att_ra*, *att_cl* e *att_sc*. Todos esses cinco valores são dados em dB. Já a sexta e a sétima entrada, respectivamente, estão conectadas aos valores de *rot* e *groupdelay* multiplicado por 10^9 , para esse atraso ser dado em nanossegundos. As unidades de medida dessas duas últimas entradas são, respectivamente, rad e ns.

O segundo *Number Sink*, chamado *dfsat*, encontra-se conectado a três fontes constantes. Ele produz gráficos relacionados à velocidade relativa do satélite, à distância entre o satélite e a estação terrena e ao desvio de frequência Doppler. Suas três entradas estão conectadas, em ordem, aos valores de *df*, *rangevel* e *distkm*, que possuem as seguintes unidades de medida, respectivamente: Hz, m/s e km.

Ainda de cima para baixo, o terceiro *Number Sink*, *coordsat*, produz gráficos numéricos relacionados às coordenadas do ponto subsatélite e à altura do satélite naquele tempo simulado. Ele possui três entradas conectadas, nessa ordem, aos valores de *lat*, *long* e *alt*. Os dois primeiros possuem o grau como unidade de medida (°) e o último é dado em metros.

O quarto *Number Sink*, *elsat*, mostra o ângulo de elevação do satélite em relação à estação terrena. Ele só tem uma entrada, conectada ao valor de *elev*, em graus.

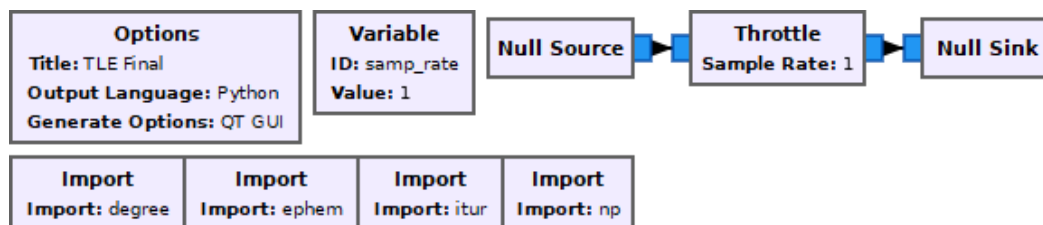
O quinto, *azsat*, produz gráficos numéricos quanto ao ângulo de azimute do satélite em relação à estação. Só tem uma entrada, que está conectada ao valor de *az*, em graus. Está separado do quarto *Number Sink* por questões de escala do gráfico numérico gerado, para uma melhor visualização.

O sexto *Number Sink* é chamado de *loss_fs*. Ele gera um gráfico numérico mostrando a perda no espaço livre (vide equação 24) que acomete a onda eletromagnética portando o sinal. Só tem uma entrada, que está conectada à variável *Lfs*. O resultado é dado em dB.

O último *Number Sink* de cima para baixo é o chamado *cnu*. Ele mostra o valor da relação-sinal ruído C/N, em dB, do enlace de subida calculado pelo módulo Python, e também mostra o ganho da antena transmissora, em dB. Tem duas entradas, estando a primeira conectada ao valor de *CNup* e a segunda ao valor da posição 4 do vetor *SNR*, que é o ganho da antena transmissora, em dB.

Em seguida, serão explicados os blocos responsáveis pelas configurações gerais da simulação.

Figura 13 Estrutura dos blocos de configuração da simulação



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A figura 13, mostrada acima, ilustra blocos essenciais para o funcionamento da simulação. O bloco *Options* tem o título da simulação, a linguagem de programação utilizada e o tipo de interface escolhido.

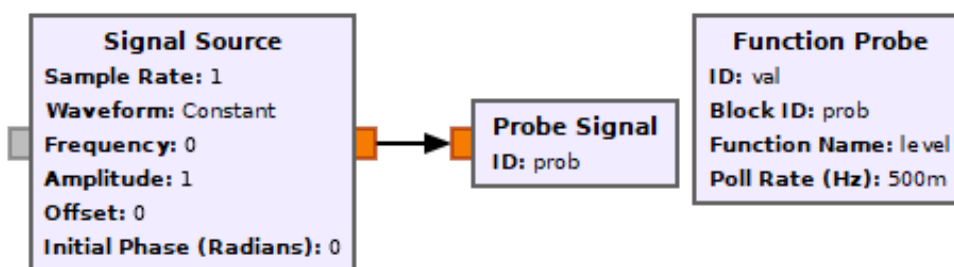
Há uma variável, chamada *samp_rate*, que controla a taxa de amostragem utilizada na simulação. Ela foi definida como 1 Hz, uma vez que o único bloco que depende da frequência de amostragem está no sistema de “*clock*”, que funciona a uma frequência de 0,5 Hz.

Do lado direito, há um pequeno sistema contendo um *Throttle*, que é uma construção de praxe em simulações criadas no *GNU Radio*. Ele limita as amostragens realizadas na simulação para que não excedam a taxa de amostragem definida anteriormente.

Por fim, há quatro blocos de importação, que importam as bibliotecas *ephem* (*PyEphem*), *itur* (*ITU-Rpy*) e *np* (*Numpy*) à simulação, além de importar uma função específica da *PyEphem*, sob o nome de *degree*, para converter ângulos de graus para radianos, e vice-versa.

Em seguida, mostrar-se-á o sistema que controla o tempo da simulação.

Figura 14 Diagrama de blocos do sistema que controla o tempo da simulação



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

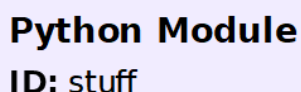
Esse sistema ilustrado na figura 14 é constituído de uma fonte de sinal (*Signal Source*), um bloco de sondagem de sinal (*Probe Signal*) e uma função de sondagem (*Function Probe*). Ele gera uma espécie de *clock* (sinal de relógio), que faz a simulação atualizar em tempo real durante a sua execução.

A fonte de sinal emite um sinal constante de amplitude 1, que é sondado pelo bloco *Probe Signal*. A função de sondagem controla o funcionamento dessa sondagem. Ela foi definida para medir a amplitude do sinal com uma frequência de 0,5 Hz, ou seja, a cada 2 segundos, e armazena essa amplitude na variável *val*. Essa variável é usada posteriormente no código Python como um sinal de relógio, fazendo a simulação refazer os cálculos a cada dois segundos.

3.1.2 Módulo Python

A única parte da simulação que não foi mencionada ainda é o módulo Python, chamado de *stuff*. O bloco relacionado a esse módulo está ilustrado na figura 15.

Figura 15 Módulo da simulação contendo os códigos em Python



Python Module
ID: stuff

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023).

Esse bloco contém todos os códigos de Python que são executados durante a simulação para gerar os resultados que serão analisados posteriormente.

Figura 16 Linhas 1 a 12 do código *stuff.py*

```
1 # this module will be imported in the into your flowgraph
2 import itur
3 import ephem
4 import numpy as np
5 from ephem import degree
6 import requests
7 from datetime import datetime
8 import os
9 import matplotlib as mpl
10 import matplotlib.pyplot as plt
11 import matplotlib.ticker as ticker
12 global sat
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023).

A figura 16, logo acima, mostra as 12 primeiras linhas do código dentro do módulo Python, chamado de *stuff.py*. A primeira é um comentário padrão do módulo de Python do *GNU Radio*, as linhas de 2 até 11 são importação de bibliotecas e a linha 12 realiza a declaração de uma variável global que vai modelar o satélite no código.

3.1.2.1 Biblioteca *Requests*

A biblioteca *Requests* facilita a realização de uma comunicação via HTTP (protocolo transferência de hipertexto). Esse tipo de comunicação é usado para acessar aplicações, como *sites*.

Ela foi utilizada para baixar o TLE do satélite AlfaCrux, disponibilizado no site CelesTrak³ junto com o TLE de alguns outros satélites. Esse TLE atualiza com uma baixa frequência, e o *site* bloqueia acessos repetidos se forem realizados em pouco tempo, a fim de evitar ataques cibernéticos. Portanto, baixa-se um TLE novo a cada duas horas. A biblioteca também foi utilizada para baixar a previsão da TEC disponibilizada no site do *Space Weather Prediction Center*⁴, do governo dos Estados Unidos. Nesse site, a previsão é atualizada a cada 15 minutos.

Essa previsão é um cálculo realizado em tempo real (a cada 15 minutos) com o auxílio do Modelo Eletrodinâmico Acoplado da Termosfera, Ionosfera e Plasmasfera (CTIPE, do inglês *Coupled Thermosphere Ionosphere Plasmasphere Electrodynamics Model*). Esse cálculo não é a TEC de um percurso inclinado, e sim a TEC de um percurso totalmente vertical, que é um valor menor. Portanto, as atenuações que serão calculadas neste trabalho que dependem desse valor serão menores do que na realidade.

Na figura 17, logo abaixo, serão mostradas as linhas 14 a 38 do código *stuff.py*:

³ Disponível em: <http://celestrak.org/NORAD/elements/gp.php?INTDES=2022-033>

⁴ Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/products/ctipe-total-electron-content-forecast>

Figura 17 Linhas 14 a 38 do código *stuff.py*

```
14 path1 = "tle.txt"
15
16 if (os.path.exists(path1) == False): #se nao existir o arquivo
17
18     arq = open(path1, "w+") #cria esse arquivo
19     URL = "http://celestrak.org/NORAD/elements/gp.php?INTDES=2022-033"
20     r = requests.get(URL)
21     str = r.text
22     sep = str.split("\r\n")
23     nome = next((s for s in sep if "ALFACRUX" in s))
24     pos = sep.index(nome)
25     line1 = sep[pos+1]
26     line2 = sep[pos+2]
27     name = sep[pos].split(" ")[0]
28
29     string_tle = name + "\n" + line1 + "\n" + line2
30     arq.write(string_tle)
31
32     arq.close()
33     print("TLE mais recente baixado!")
34
35 modtime1 = os.path.getmtime(path1)
36 now = datetime.now()
37 now = now.timestamp()
38 diferencial = now - modtime1
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A linha 14 da figura acima define o nome do arquivo em que será salvo o TLE. A condicional que vai da linha 16 à linha 33 só é executada caso não exista o arquivo com o nome *tle.txt* no diretório em que o código está salvo.

Na linha 18, cria-se o arquivo supracitado. Na 19, define-se uma variável com a URL do site CelesTrak, onde está localizado o TLE do AlfaCrux. Na linha 20, baixa-se o HTML (Linguagem de Marcação de Hipertexto) dessa página com a biblioteca *Requests*. Na linha 21, toma-se apenas o texto desse HTML, ignorando as outras partes desse código.

Nas linhas entre 22 e 27, trata-se o texto baixado e ele é separado em três partes: nome, linha 1 e linha 2. Essas três partes estão de acordo com o formato do TLE mostrado na seção 2.1.5. Na linha 29, juntam-se as três partes em apenas uma *string* (variável de texto), no formato correto do TLE. Nas linhas 30 e 32, escreve-se esse TLE no arquivo *tle.txt* e fecha-se o arquivo, respectivamente. A linha 33 mostra uma mensagem de sucesso no terminal do *GNU Radio*.

Já a linha 35 toma o horário da última modificação nesse arquivo *tle.txt*, que será utilizado para calcular há quanto tempo ele não é modificado. Nas linhas 36 e 37, o horário em que a simulação está ocorrendo é tomado, e, por fim, na linha 38, é calculada a diferença entre os dois horários, resultando no tempo desde a última modificação no arquivo.

Figura 18 Linhas 40 a 69 do código *stuff.py*

```
40 if diferencial > 7200: #2 horas
41
42     arq = open(path1, "w")
43
44     URL = "http://celestrak.org/NORAD/elements/gp.php?INTDES=2022-033"
45     r = requests.get(URL)
46     str = r.text
47     sep = str.split("\r\n")
48     nome = next((s for s in sep if "ALFACRUX" in s))
49     pos = sep.index(nome)
50     line1 = sep[pos+1]
51     line2 = sep[pos+2]
52     name = sep[pos].split(" ")[0]
53
54     string_tle = name + "\n" + line1 + "\n" + line2
55     arq.write(string_tle)
56
57     arq.close()
58     print("TLE mais recente baixado!")
59
60 arq = open(path1, "r")
61 dados = arq.read()
62 sep = dados.split("\n")
63 name = sep[0]
64 line1 = sep[1]
65 line2 = sep[2]
66
67 print("Tempo desde a ultima modificacao no TLE:", diferencial, "segundos")
68
69 sat = ephem.readtle(name, line1, line2) #variavel global que representa o satellite a partir do TLE selecionado
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Na figura 18, vê-se uma condicional que depende do tempo desde a última modificação do arquivo *tle.txt*. Se esse tempo for maior que 2 horas, a condicional é executada.

Nas linhas 42 a 58, realiza-se o mesmo procedimento das linhas 18 a 33 da figura 17, porém o arquivo dessa vez é aberto apenas no modo de escrita (“w”), e não no modo de criação e escrita (“w+”).

Nas linhas 60 a 65, é realizada uma leitura dos dados presentes no arquivo *tle.txt*, que são separados em linhas e armazenados em variáveis. Na linha 67, há uma mensagem que indica o tempo desde a última modificação no TLE, em segundos. Por fim, na linha 69, utiliza-se a biblioteca *PyEphem* para ler o TLE baixado e criar o

objeto que representa o satélite, passando-se as variáveis que armazenam cada uma das linhas do TLE.

Figura 19 Linhas 71 a 94 do código *stuff.py*

```
71 path2 = "tec.txt"
72
73 if (os.path.exists(path2) == False):
74     arq = open(path2, "w+")
75     URL = "https://services.swpc.noaa.gov/experimental/text/ctipe-tec-output.txt"
76     r = requests.get(URL)
77     str = r.text
78     arq.write(str)
79     print("TEC mais recente baixado!")
80
81 modtime2 = os.path.getmtime(path2)
82 diferenca2 = now - modtime2
83
84 if diferenca2 > 900: #15 minutos
85
86     arq = open(path2, "w")
87
88     URL = "https://services.swpc.noaa.gov/experimental/text/ctipe-tec-output.txt"
89     r = requests.get(URL)
90     str = r.text
91     arq.write(str)
92     print("TEC mais recente baixado!")
93
94 print("Tempo desde a ultima modificacao no TEC:", diferenca2, "segundos")
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

O último trecho de código que utiliza a biblioteca *Requests* está mostrado na figura 19. Na linha 71, similar ao que ocorre na linha 14 da figura 17, define-se o caminho do arquivo onde serão baixados os valores de TEC.

Nas linhas 73 a 79, há uma condicional que realiza o mesmo tipo de verificação da condicional das linhas 16 a 33 da figura 17. Portanto, se não existir o arquivo *tec.txt*, ele é criado. Dessa vez, a URL aponta para o site que possui os valores de TEC disponíveis. Até a linha 82, realizam-se verificações e operações similares às da figura 17, porém usando as variáveis pertinentes.

Entre as linhas 84 e 92, é realizada uma verificação do tempo desde a última modificação do arquivo *tec.txt*. Se ele for maior que 15 minutos, um arquivo novo é baixado. Por fim, na linha, mostra-se, na tela do terminal do *GNU Radio*, uma mensagem informativa sobre o tempo desde a última modificação no arquivo *tec.txt*.

3.1.2.2 Biblioteca *PyEphem*

A biblioteca *PyEphem* implementa cálculos astronômicos em Python, possibilitando que seja calculada a posição e a velocidade de um satélite ao redor da Terra a partir do seu TLE. A primeira função que utiliza essa biblioteca no código *stuff.py* pode ser vista na figura abaixo.

Figura 20 Linhas 97 a 105 do código *stuff.py*

```
97 def get_date(en, diff, clk): #calcula o tempo de observacao
98     if en == 1:
99         curr = ephem.now()
100        diff = diff/1440
101        dt = ephem.Date(curr + diff)
102        print("Hora simulada:", ephem.Date(dt - 180/1440), "BRT") #nosso fuso horario: GMT -3
103        return dt
104     else:
105        return 0
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A função mostrada na figura 20 calcula o tempo da simulação utilizando os padrões da biblioteca *PyEphem*. Ela recebe como argumentos o *enable*, que é um sinal com valor padrão em 1 e que, se for 0, para a execução de todas as funções, o valor *diff*, que é a diferença entre o tempo simulado e o tempo real, e o sinal de relógio *clk*, para executar a função a cada 2 segundos.

Na linha 99, atribui-se o tempo atual, nos formatos da *PyEphem*, à variável *curr*. Na linha 100, divide-se o valor de *diff* por 1440, a fim de se calcular essa diferença (que era em minutos) em número de dias. Na linha 101, transforma-se o horário real somado à diferença em um formato que a biblioteca entende e, na linha 102, esse horário é mostrado no terminal do *GNU Radio*, com as devidas conversões de fuso horário. Por fim, a função retorna essa diferença de tempo, que é atribuída à variável *t_sim* nos blocos da simulação (vide seção 3.1.1).

Figura 21 Linhas 107 a 115 do código *stuff.py*

```
107 def comp_est(en, lat_e, lon_e, alt_e, t):
108     if en == 1:
109         est = ephemer.Observer()
110         est.lon = lon_e * degree
111         est.lat = lat_e * degree
112         est.elevation = alt_e
113         est.date = t
114         sat.compute(est)
115     return
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A figura 21, logo acima, mostra a segunda função que utiliza a biblioteca *PyEphem*. Essa função recebe como argumentos o *enable*, a latitude da estação terrena (*lat_e*), em graus, a longitude dessa estação (*lon_e*), também em graus, sua altitude (*alt_e*), em metros, e o tempo simulado.

Na linha 109, cria-se um objeto do tipo *Observer* chamado *est*. Esse objeto modela uma estação terrena fixa. Nas linhas 110, 111 e 112, atribuem-se os valores de longitude, latitude e elevação, respectivamente, à estação terrena *est*. Um detalhe é que nas linhas 110 e 111, há uma conversão de graus para radianos, multiplicando-se os valores pela constante *ephem.degree*, que é a constante de conversão de graus para radianos.

Na linha 113, atribui-se o tempo da simulação à data na estação terrena. Por fim, na linha 114, computa-se a posição do satélite *sat* em relação à estação terrena *est* no tempo de simulação *t*. Esse cálculo implementa as equações presentes no código *SGP4.cpp*, que é um anexo de Vallado et al. (2006), disponível no site CelesTrak⁵. Esse código contém as equações do modelo SGP4, que é o mais utilizado para a confecção de um TLE, como foi dito na seção 2.1.5. São computadas a posição e a velocidade do satélite em relação a um observador que se encontra na superfície terrestre. Esses cálculos levam em consideração os elementos orbitais presentes no TLE, portanto são extensos e não serão reproduzidos nesta monografia.

⁵ Disponível em: <https://celestrak.org/publications/AIAA/2006-6753/>

Figura 22 Linhas de 177 a 185 do código *stuff.py*

```
177 def get_coord(en, t):
178     if en == 1:
179         sat.compute(t)
180         lat = sat.sublat / degree
181         long = sat.sublong / degree
182         altkm = sat.elevation / 1000
183         return lat, long, altkm
184     else:
185         return [0,0,0]
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A função da figura 22 recebe como argumentos o *enable* e o tempo de simulação *t*. Na linha 179, computa-se a posição e a velocidade do satélite em relação à Terra no determinado instante *t*, por isso o argumento passado foi o próprio tempo de simulação, ao invés da estação terrena como na linha 114 da figura 21.

O cálculo da posição do satélite em relação à Terra é utilizado para encontrar a latitude e a longitude do ponto subsatélite, bem como a altitude do satélite. Os dois ângulos são dados em radianos e transformados em graus pelas divisões presentes nas linhas 180 e 181, e a altitude é dada em metros, transformada em quilômetros pela divisão por 1000 da linha 182.

A latitude do ponto subsatélite, *sat.sublat* no código, segundo Brandon Rhoades (2020), é definida na função interna *GetSubSatPoint* como:

$$\varphi_{sat} = \tan^{-1} \left(\frac{z_{sat}}{\sqrt{x_{sat}^2 + y_{sat}^2}} \right) \quad (40)$$

A latitude φ_{sat} é dada em radianos. Os valores x_{sat} , y_{sat} e z_{sat} são, respectivamente, as coordenadas *x*, *y* e *z* do satélite em relação à Terra, calculadas na função interna *GetSatPosition*, que implementa os cálculos do arquivo SGP4.cpp, do modelo de propagação SGP-4.

A longitude desse mesmo ponto, chamada de *sat.sublong* no código, é definida na mesma função *GetSubSatPoint* como:

$$\lambda_{sat} = 2\pi \left((t - sid_{dia}) \cdot sid_{sol} + sid_{ref} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y_{sat}}{x_{sat}} \right) \quad (41)$$

A longitude λ_{sat} é dada em radianos. A grandeza sid_{dia} é o dia sideral no tempo de simulação, conseguido a partir da época do TLE. Além disso, sid_{ref} é uma referência de dia sideral calculada em outra função interna (*InitOrbitRoutines*). Por fim, a grande sid_{sol} é a divisão entre o número de dias solares e número de dias siderais em um ano na Terra.

Um dia sideral é uma rotação completa da Terra em torno de seu eixo em relação a uma estrela distante o suficiente para não ter movimento aparente no céu em relação a um observador terrestre. Já um dia solar é uma rotação da Terra em que, todo meio-dia, o Sol se encontra na mesma posição no céu para um observador terrestre. Devido à translação da Terra em torno do Sol, a cada dia ela se move aproximadamente $0,9863^\circ$ em sua órbita ($360^\circ/365$ dias). Por isso, com o passar dos dias em um ano, a cada rotação completa em torno de seu eixo, o Sol aparenta estar mais deslocado em relação ao primeiro dia observado. Assim, a Terra conclui mais dias siderais do que solares em um ano. A biblioteca considera essa razão entre dias siderais e dias solares como:

$$sid_{sol} = 1,0027379093 \quad (42)$$

Por fim, a altitude do satélite é calculada a partir da distância entre o satélite e o centro da Terra, chamada de r_{sat} . De acordo com Brandon Rhoades (2020), tem-se:

$$r_{sat} = \sqrt{x_{sat}^2 + y_{sat}^2 + z_{sat}^2} \quad (43)$$

Esse raio se relaciona à altitude do satélite. Se for considerado o achatamento da esfera terrestre, a altitude do satélite pode ser encontrada por:

$$h_{sat} = r_{sat} - r_e \sqrt{1 - (2f_e - f_e^2) \sin^2 \varphi_{sat}} \quad (44)$$

Na fórmula acima, h_{sat} é a altitude do satélite, r_{sat} é a distância entre ele e o centro da Terra, r_e é o raio da Terra, f_e é o achatamento da Terra e φ_{sat} é a latitude do ponto subsatélite. A altitude do satélite é dada em metros quando calculada como *sat.elevation*.

O raio e o achatamento da Terra são considerados, nessa biblioteca, como:

$$r_e = 6378,16 \text{ km} \quad (45)$$

$$f_e = \frac{1}{298,25} \quad (46)$$

Além dessas funções das figuras 20, 21 e 22, ainda há outras duas no código *stuff.py* que utilizam cálculos da biblioteca *PyEphem*. Na figura abaixo, está ilustrado o código de uma delas.

Figura 23 Linhas de 231 a 239 do código *stuff.py*

```

231 def azel(en, t, lat_e, lon_e, alt):
232     if en == 1:
233         comp_est(en, lat_e, lon_e, alt, t)
234         el = sat.alt / degree
235         az = sat.az / degree
236
237         return az, el
238     else:
239         return [0,0]
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A função *azel*, mostrada na figura 23, tem como argumentos o *enable*, o tempo de simulação *t* e a posição da estação terrena (latitude, longitude e altitude). Na linha

233, chama-se a função *comp_est*, que computa a posição e a velocidade do satélite em relação à estação terrena.

Então, nas linhas 234 e 235, pegam-se os ângulos de elevação e azimute, respectivamente, do satélite em relação à estação terrena, calculados na função interna *GetBearings*, que chama outra função interna, *GetTopocentric*, para realizar esses cálculos dos dois ângulos. A função *GetTopocentric* utiliza uma matriz com elementos keplerianos e as coordenadas da estação terrena para calcular as coordenadas do satélite no Sistema Horizontal de Coordenadas (vide seção 2.1.6), de acordo com os cálculos do modelo SGP-4.

Os ângulos de elevação (*e*) e azimute (*az*) resultantes são dados em radianos, por isso são convertidos pela divisão presentes nas linhas 234 e 235. O ângulo de elevação é retornado como negativo quando o observador não tem visão do satélite, pois ele está abaixo do horizonte local. Porém, nos cálculos de atenuações e balanço de potência do enlace, só são considerados os momentos em que esse ângulo de elevação é igual ou superior a 5 °.

A última função que utiliza essa biblioteca está ilustrada na figura abaixo:

Figura 24 Linhas de 213 a 229 do código *stuff.py*

```
213 def get_vel(en, f,t, lat_e, lon_e, alt, el):
214     if en == 1:
215         comp_est(en,lat_e, lon_e, alt, t)
216         vel = sat.range_velocity
217         ran = sat.range
218         c = 300000000 #vel. da luz em m/s
219         f = f*1000000000 #freq. em Hz
220         df = -vel*f/c #desvio de freq. Doppler
221         lmb = c/f
222         if el > 0:
223             Lfs = 4*np.pi*ran/lmb
224             Lfs = 20*np.log10(Lfs)
225         else:
226             Lfs = 0.0
227         return vel, ran, df, Lfs
228     else:
229         return [0,0,0,0]
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A função *get_vel*, mostrada na figura 24, recebe como argumentos o sinal *enable*, a frequência da onda portadora do enlace (*f*), o tempo de simulação *t*, a latitude, a longitude e a altitude da estação terrena, *lat_e*, *lon_e* e *alt*, respectivamente, e o ângulo de elevação *el* entre o satélite e a estação terrena, calculado na função mostrada na figura 23. Nesses cálculos, aproximou-se a velocidade da luz para o valor $c = 3.10^8$ m/s.

Na linha 215, novamente chama-se a função *comp_est* para realizar os cálculos de posição e velocidade do satélite em relação ao observador situado nas coordenadas da estação terrena.

Na linha 216, pega-se a velocidade do satélite em relação à estação terrena, utilizando a função *sat.range_velocity*, que chama a função interna *GetRange*. Essa função calcula tanto a velocidade do satélite em relação à do observador quanto sua distância. Os cálculos, segundo a documentação, são definidos a seguir:

$$d_{es} = \sqrt{(x_{sat} - x_{est})^2 + (y_{sat} - y_{est})^2 + (z_{sat} - z_{est})^2} \quad (47)$$

$$v_{es} = \frac{(v_{sat_x} - v_{est_x}) \cdot (x_{sat} - x_{est}) + (v_{sat_y} - v_{est_y}) \cdot (y_{sat} - y_{est}) + (v_{sat_z} - v_{est_z}) \cdot (z_{sat} - z_{est})}{d_{es}} \quad (48)$$

A equação 47 calcula a distância entre satélite e estação (d_{es}) em quilômetros. Nela, x_{sat} , y_{sat} e z_{sat} são, respectivamente, as coordenadas x, y e z do satélite (sua posição nos eixos x, y e z), e x_{est} , y_{est} e z_{est} são, respectivamente, as coordenadas x, y e z da estação terrena.

Já a equação 48 calcula a velocidade relativa do satélite para um observador em uma estação terrena (v_{es}). Ela é dada em m/s. Nessa equação, v_{sat_x} , v_{sat_y} e v_{sat_z} são, respectivamente, as velocidades do satélite nos eixos x, y e z. Já as velocidades v_{est_x} , v_{est_y} e v_{est_z} são, respectivamente, as velocidades da estação terrena nos eixos x, y e z. Essas velocidades e posições são calculadas em outras funções internas, baseadas no código do SGP-4.

Na linha 218 da figura 24, define-se a velocidade da luz, c , como $3 \cdot 10^8$ m/s. Na linha 219, transforma-se a frequência, que foi passada nos argumentos como GHz, para Hz. A linha 220 calcula o desvio de frequência Doppler, df , seguindo a equação 38, e a linha 221 calcula o comprimento de onda, λ , pela equação 17.

Nas linhas 222 a 226, calcula-se a perda por percurso no espaço livre (vide equação 24), apenas caso o satélite seja visível para a estação (se o ângulo de elevação for maior que 0°). Na linha 224, transforma-se essa perda em dB, segundo a equação abaixo:

$$L_{fs_{dB}} = 10 \log \left(\left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \right) = 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) \quad (49)$$

Na equação acima, o valor de r é aquele calculado como d_{es} na equação 47. Essa função conclui a utilização da biblioteca *PyEphem* no código *stuff.py*. Em seguida, explicar-se-á sobre a utilização da biblioteca *ITU-Rpy* no mesmo código.

3.1.2.3 Biblioteca *ITU-Rpy*

A biblioteca *ITU-Rpy* foi utilizada para calcular as atenuações troposféricas que afetam o enlace de subida de comunicações entre a estação terrena e o satélite. Ela implementa as equações de atenuação por gases, nuvens, chuva e cintilação troposférica descritas nas recomendações ITU-R P. 618, ITU-R P. 676 e ITU-R P. 840.

Figura 25 Linhas de 188 a 211 do código *stuff.py*

```
188 def get_att(en, lat_e, long_e, f, el, p, D, n): #variavel El depende do tempo de observacao
189     if en == 1:
190         if el < 5:
191             return [0,0,0,0,0]
192         else:
193             atten = itur.atmospheric_attenuation_slant_path(lat_e, long_e, f, el, p, D, eta=n, return_contributions=True)
194             if f >= 1:
195                 ga = atten[0].value
196             else:
197                 ga = 0
198             cl = atten[1].value
199             ra = atten[2].value
200             if f >= 4:
201                 sc = atten[3].value
202                 att = atten[4].value
203             else:
204                 sc = 0
205                 att = ga + np.sqrt((ra + cl) ** 2 + (sc ** 2))
206
207             return att, ga, ra, cl, sc
208     else:
209         return [0,0,0,0,0]
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Na figura 25, logo acima, mostra-se a primeira função que utiliza cálculos da biblioteca *ITU-Rpy*. A função recebe como argumentos o *enable*, a latitude e a longitude da estação terrena, em graus, a frequência do enlace, em GHz, o ângulo de elevação calculado na função *azel* (vide figura 23), em graus, a indisponibilidade *p*, em porcentagem, o diâmetro da antena transmissora (da estação terrena) *D*, em metros, e a eficiência η de abertura da antena, chamada de *n* nessa função.

Há uma verificação do valor do ângulo de elevação, *el*. Se esse ângulo for menor do que 5 °, não se calculam as atenuações (retorna-se zero para cada um). Caso contrário, elas são calculadas na linha 193.

Esse cálculo chama a função *itur.atmospheric_attenuation_slant_path*, que depende da latitude e longitude da estação terrena, frequência do enlace, indisponibilidade, diâmetro da antena e de uma variável chamada *return_contributions* que, quando é verdadeira, faz a função retornar um vetor contendo cada atenuação troposférica em uma posição, além da atenuação total. Quando não se menciona a altitude da estação terrena, a função utiliza os valores dados pela recomendação ITU-R P.1511-2⁶, que trata da topografia da Terra.

⁶ INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.1511-2**: Topography for Earth-space propagation modelling. Genebra: ITU, aug. 2019c. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1511-2-201908-I/en>. Acesso em: 25 jul. 2023.

A parte seguinte da função *get_att* é composta por múltiplas verificações de frequência para atender às validades das equações das recomendações da ITU.

Guarda-se o valor de cada atenuação em uma variável. Esses valores são pegos do vetor que armazena o retorno da função *itur.atmospheric_attenuation_slant_path*, e utiliza-se o método *value* para retornar apenas valores numéricos, sem unidades de medida, pois essa função retorna o valor seguido da unidade dB.

Na linha 205, caso a frequência seja menor que 4 GHz, calcula-se manualmente a atenuação troposférica total A_t sobre o enlace, utilizando a fórmula abaixo, dada pela recomendação ITU-R P. 618:

$$A_{t_{dB}}(p) = A_{g_{dB}}(p) + \sqrt{(A_{r_{dB}}(p) + A_{c_{dB}}(p))^2 + (A_{s_{dB}}(p))^2} \quad (50)$$

Nessa equação, o índice *t* indica total, o *g* indica por gases, *r* significa por chuva, *c* é por nuvens e *s* é por causa da cintilação troposférica. Todas as atenuações estão em dB. Se $p < 1\%$, então $A_c(p) = A_c(1\%)$ e $A_g(p) = A_g(1\%)$, pois grande parte dessas duas atenuações está incluída na atenuação de chuva quando $p < 1\%$, segundo a recomendação da ITU.

Essa equação é implementada dentro da *itur.atmospheric_attenuation_slant_path*, porém, quando é preciso forçar alguma atenuação a ter valor nulo, é preciso recalculá-la externamente à biblioteca, por isso esse cálculo foi implementado na linha 205 da figura 25.

A função *itur.atmospheric_attenuation_slant_path*, da biblioteca *ITU-Rpy*, será explicada em detalhes nas próximas subseções, dividindo-se cada uma das atenuações.

A outra função do código *stuff.py* que utiliza a biblioteca *ITU-Rpy* está ilustrada na figura abaixo:

Figura 26 Linhas de 241 a 258 do código *stuff.py*

```
241 def balanço_pot(en, f, p, eta, D, pt, GTs, bt, trop_loss, Au, el):
242     if en == 1:
243         if el >= 5:
244             c = 300000000
245             f = f*1000000000
246             lmb = c/f
247             Aeff = eta*np.pi*(D/2)**2
248             gt = Aeff*4*np.pi/(lmb**2)
249             ptdb = 10*np.log10(pt)
250             gtodb = 10*np.log10(gt)
251             bt = bt*1000000
252             btodb = 10*np.log10(bt)
253             CNu = ptodb + gtodb + GTs - Au - btodb + 228.6 - trop_loss
254             return CNu, Aeff, gt, ptodb, gtodb, Au, btodb
255         else:
256             return [0,0,0,0,0,0,0]
257     else:
258         return [0,0,0,0,0,0,0]
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A função da figura 26, *balanço_pot*, recebe como argumentos o *enable*, a frequência *f* do enlace, em GHz, a indisponibilidade *p*, em valores percentuais, a eficiência de abertura da antena transmissora (da estação terrena) *eta*, o diâmetro da antena transmissora *D*, em metros, a potência *pt* dessa mesma antena, em W, a figura de mérito do satélite *GTs*, em dB/K, a banda do sinal transmitido *bt*, em MHz, as perdas troposféricas *trop_loss* calculadas na função da figura 25, a perda por percurso no espaço livre, *Au*, calculada na função da figura 24, e o ângulo de elevação *el* entre o satélite e a estação, calculado na função da figura 23.

Primeiro, verifica-se se o ângulo de elevação é maior ou igual a 5 °. Caso não seja, retorna-se 0 para a relação sinal-ruído.

Depois, define-se a velocidade da luz, em m/s, a frequência *f* é transformada em Hz e calcula-se o comprimento de onda. Na linha 247, é calculada a área efetiva da antena transmissora, considerando a antena como circular. Esse valor é calculado como:

$$A_{eff} = \eta \cdot \pi \cdot (r_{antena})^2 \quad (51)$$

Na equação acima, r_{antena} é o raio da antena, e A_{eff} é a sua área efetiva, além de η ser sua eficiência de abertura.

A função *itur.atmospheric_attenuation_slant_path*, da biblioteca *ITU-Rpy*, será explicada em detalhes nas próximas subseções, dividindo-se cada uma das atenuações.

3.1.2.3.1 Atenuação por gases atmosféricos

Para o cálculo da atenuação por gases, a função *atmospheric_attenuation_slant_path* chama outra função, a *gaseous_attenuation_slant_path*, que utiliza o cálculo aproximado disponibilizado pela ITU, de acordo com as subseções 1.1 e 2.1 do Anexo 2 da recomendação ITU-R P. 676 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2022). Essa aproximação é válida para enlaces cujas frequências de operação estão entre 1 e 350 GHz, e em que o ângulo de elevação entre o satélite e a estação terrena é maior ou igual a 5 °. Por isso que há uma verificação do ângulo de elevação na linha 190 da figura 25.

Como os cálculos são válidos para frequências entre 1 e 350 GHz, e atenuações troposféricas aumentam conforme aumenta-se a frequência do enlace, então considerou-se essa atenuação como nula quando se simula um enlace de frequência inferior a 1 GHz.

A função *gaseous_attenuation_slant_path*, segundo sua implementação, usa o cálculo aproximado por padrão, mas também é capaz de realizar o cálculo exato disponível na seção 1 do anexo 1 da ITU-R P. 676.

O cálculo aproximado divide a atenuação por gases em duas atenuações: uma pelo oxigênio e outra pelo vapor d'água presentes na atmosfera. Essas duas atenuações são dadas pelas seguintes equações:

$$A_o(f, P_S, T_S, \rho_{w_S}) = \frac{\gamma_o(f, p_S, T_S, e_S) h_o(f, P_S, T_S, \rho_{w_S})}{\sin(el)} \quad (52)$$

$$A_w(f, p_S, T_S, \rho_{w_S}) = \frac{\gamma_w(f, p_S, T_S, e_S) h_w(f)}{\sin(el)} \quad (53)$$

Na equação 50, A_o é a atenuação causada pelo gás oxigênio, em dB, f é a frequência do enlace, em GHz, P_S é a pressão atmosférica instantânea no local da estação terrena, em hPa, T_S é a temperatura da superfície instantânea nesse mesmo local, em K, ρ_{w_S} é a densidade de vapor d'água instantânea no mesmo local, em g/m³, e p_S é a pressão da superfície seca no mesmo local, também em hPa. Além disso, el é o ângulo de elevação entre o satélite e a estação terrena.

T_S é disponibilizado na recomendação ITU-R P. 1510⁷, que trata da temperatura média da superfície global. Já ρ_{w_S} pode ser retirado da recomendação ITU-R P. 836⁸, e dados de P_S são disponibilizados na recomendação ITU-R P. 835⁹.

O valor e_S é uma constante que indica a pressão parcial da superfície gerada pelo vapor d'água, que vale:

$$e_S = \frac{\rho_{w_S} \cdot T_S}{216,7} \text{ hPa} \quad (54)$$

⁷ INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.1510-1**: Mean surface temperature. Genebra: ITU, jun. 2017c. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1510-1-201706-I/en>. Acesso em: 25 jul. 2023.

⁸ INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.836-6**: Water vapour: surface density and total columnar content. Genebra: ITU, dec. 2017d. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.836-6-201712-I/en>. Acesso em: 25 jul. 2023.

⁹ INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.835-6**: Reference standard atmospheres. Genebra: ITU, dec. 2017e. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.835-6-201712-I/en>. Acesso em: 25 jul. 2023.

Os mesmos valores valem para a equação 51, porém A_w é a atenuação causada pelo vapor d'água, em dB.

Já os valores γ_o , γ_w , h_o e h_w são funções. Seus valores estão definidos nas quatro equações abaixo:

$$\gamma_o = 0,1820 \cdot f \cdot N''_o(f) \quad (55)$$

$$\gamma_w = 0,1820 \cdot f \cdot N''_w(f) \quad (56)$$

$$h_o = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_S + c_o(f) \cdot P_S + d_o(f) \cdot \rho_{wS} \quad (57)$$

$$h_w = A \cdot f + B + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{(f - f_i)^2 + b_i} \quad (58)$$

Nas equações acima, γ_o é a contribuição do gás oxigênio na atenuação específica por gases atmosféricos, em dB/km, γ_w é a contribuição do vapor d'água nessa mesma atenuação específica, em dB/km, e a_o , b_o , c_o e d_o , são constantes tabeladas na parte 1 da recomendação, que é um anexo de dados, e A , B e f_i são constantes cujos valores são dados na tabela 4 do anexo 2 dessa recomendação.

Já os valores $N''_o(f)$ e $N''_w(f)$ são, respectivamente, as partes imaginárias da refratividade de rádio do gás oxigênio e do vapor d'água. Seus valores dependem de constantes tabeladas que estão disponíveis na tabela 1 do anexo 1 dessa recomendação.

Por fim, a atenuação total por gases, calculada por esse método aproximado, é dada por:

$$A_g = A_o + A_w \quad (59)$$

Esses cálculos são todos implementados corretamente dentro da função *gaseous_attenuation_slant_path* da biblioteca *ITU-Rpy*, de acordo com as recomendações da ITU pertinentes.

3.1.2.3.2 Atenuação pela chuva

A atenuação por chuva é calculada na função *atmospheric_attenuation_slant_path*. Essa função chama uma função interna à biblioteca, chamada *rain_attenuation*, que calcula a atenuação por chuva de acordo com a seção 2.2.1.1 da ITU-R P. 618 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2017).

Esse cálculo é válido para frequências de até 55 GHz e para indisponibilidades (p) entre 0,001% e 5%. Primeiro, calcula-se a altura da chuva h_R com base no mapa da recomendação ITU-R P. 839¹⁰, que dá alturas de chuva para todos os lugares do globo terrestre.

Depois, é calculado o comprimento do caminho inclinado abaixo da altura da chuva, em km (L_S). Caso o ângulo de elevação e seja maior ou igual a 5°, ele é dado por:

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin(e)} \quad (60)$$

¹⁰ INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.839-4**: Rain height model for prediction methods. Geneva: ITU, sept. 2013. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.839-4-201309-I/en>. Acesso em: 25 jul. 2023.

Na equação acima, h_S é a altitude da estação terrena, e el é o ângulo de elevação. Então, é calculada a projeção horizontal desse comprimento, chamada de L_G , também em km:

$$L_G = L_S \cos(el) \quad (61)$$

Depois, encontra-se a taxa de chuva excedida em 0,01% de um ano no local onde está localizada a estação terrena, $R_{0,01}$. Um valor estimado dessa taxa pode ser encontrado no mapa da recomendação ITU-R P. 837¹¹.

Então, calcula-se a atenuação específica causada pela chuva, γ_R , dada em dB/km:

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha \quad (62)$$

Os valores k e α são coeficientes calculados a partir das tabelas dadas na recomendação ITU-R P. 838¹² e da frequência do enlace.

Após isso, seguindo a recomendação ITU-R P. 618, calcula-se o coeficiente de redução horizontal $r_{0,01}$ para $p = 0,01\%$ do tempo ao ano:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0,38(1 - e^{-2L_G})} \quad (63)$$

¹¹ INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.837-7**: Characteristics of precipitation for propagation modelling. Genebra: ITU, jun. 2017b. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.837-7-201706-1/en>. Acesso em: 25 jul. 2023.

¹² INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.838-3**: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Genebra: ITU, mar. 2005. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-1/en>. Acesso em: 25 jul. 2023.

Depois, calcula-se o coeficiente de ajuste vertical $v_{0,01}$, que vale:

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin(el)} \left(31(1 - e^{-((el)/(1+\chi))}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0,45 \right)} \quad (64)$$

Na equação 64, o valor de L_R depende de outra variável, chamada ξ , que é dada, em graus, por:

$$\xi = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0,01}} \right) \quad (65)$$

Então, o valor de L_R é dado, em km, por:

$$L_R = \begin{cases} \frac{L_G r_{0,01}}{\cos(el)}, & \text{se } \xi > 0 \\ \frac{(h_R - h_S)}{\sin(el)}, & \text{se } \xi \leq 0 \end{cases} \quad (66)$$

O último valor que ainda não foi definido que é necessário para o cálculo de $v_{0,01}$ é χ , que depende do ângulo de elevação. Seu valor, em graus, é dado por:

$$\chi = \begin{cases} 36 - |(el)|, & \text{se } el < 36^\circ \\ 0, & \text{se } el \geq 36^\circ \end{cases} \quad (67)$$

O próximo passo é calcular o comprimento efetivo do percurso chuvoso, chamado L_E , dado, em km, por:

$$L_E = L_R v_{0,01} \quad (68)$$

Após isso, a atenuação causada pela chuva que é excedida em 0,01% do ano, $A_{0,01}$, em dB, é encontrada pela fórmula:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \quad (69)$$

Por fim, para extrapolar o valor dessa atenuação para indisponibilidades (taxas de excedência) entre 0,001% e 5%, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$A_r = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655+0,33 \ln(p)-0,045 \ln(A_{0,01})-\beta(1-p) \sin(el))} \quad (70)$$

Na equação 70, logo acima, o valor de β depende da indisponibilidade p , do ângulo de elevação el , em graus, e da latitude da estação terrena φ_{est} , em graus. Ele é encontrado por:

$$\beta = \begin{cases} 0, & \text{se } p \geq 1\% \text{ ou } |\varphi_{est}| \geq 36^\circ \\ -0,005(|\varphi_{est}| - 36), & \text{se } p < 1\%, |\varphi_{est}| < 36^\circ \text{ e } el \geq 25^\circ \\ -0,005(|\varphi_{est}| - 36) + 1,8 - 4,25 \sin(el), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (71)$$

Todas essas equações (de 60 a 71) são implementadas corretamente na função *rain_attenuation* da biblioteca *ITU-Rpy*, de acordo com o código.

3.1.2.3.3 Atenuação pelas nuvens

A atenuação troposférica causada pelas nuvens e por névoa é quantificada pela recomendação ITU-R P. 840 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2019a). No código da biblioteca *ITU-Rpy*, a função *atmospheric_attenuation_slant_path* também calcula essa atenuação. Para isso, ela chama outra função, a *cloud_attenuation*.

Os cálculos são válidos para frequências de até 200 GHz e para ângulos de elevação maiores ou iguais a 5 °. Na função *cloud_attenuation*, por padrão, são implementados os cálculos descritos na seção 3.1 da recomendação ITU-R P. 840, que consideram os valores dados no mapa anexado à recomendação de L_{red} , em kg/m^2 , como o conteúdo colunar total de água líquida em nuvens a uma temperatura de 273,15 K.

Esses valores de L_{red} dados no mapa, para um ano médio, dependem da taxa de excedência p , que pode variar de 0,1% a 99%. Porém, quando essa atenuação é calculada pela chamada da função *atmospheric_attenuation_slant_path*, que calcula todas as atenuações troposféricas, o valor mínimo que p assume é 1%, para atender aos requisitos da equação 50.

A atenuação por nuvens, segundo a recomendação ITU-R P. 840, é dada, em dB, por:

$$A_c = \frac{L_{red} K_l(f, (273,15))}{\sin(el)} \quad (72)$$

O valor L_{red} é extraído do mapa anexado a essa recomendação, e K_l é definido na seção 2, em $(dB/km)/(g/m^3)$, como:

$$K_l = \frac{0,819f}{\varepsilon''(1 + \eta_c^2)} \quad dB/km / g/m^3 \quad (73)$$

Na equação 73, a frequência f do enlace é dada em GHz e ε é a permissividade dielétrica complexa da água. Já η_C é uma constante dada por:

$$\eta_C = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (74)$$

Já a permissividade dielétrica da água é dada pelas duas seguintes equações:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_P \left[1 + \left(\frac{f}{f_P} \right)^2 \right]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_S \left[1 + \left(\frac{f}{f_S} \right)^2 \right]} \quad (75)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_P} \right)^2 \right]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_S} \right)^2 \right]} + \varepsilon_2 \quad (76)$$

Os valores ε_0 , ε_1 e ε_2 dependem um do outro e de um valor θ . Esses três são dados por:

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3(\theta - 1) \quad (77)$$

$$\varepsilon_1 = 0,0671\varepsilon_0 \quad (78)$$

$$\varepsilon_2 = 3,52 \quad (79)$$

Já esse valor θ é relacionado à temperatura da água líquida presente nas nuvens, T_C , e é calculado como:

$$\theta = \frac{300}{T_C} \quad (80)$$

Por fim, as frequências de relaxamento principal e secundária do dielétrico, f_P e f_S , respectivamente, ainda de acordo com a seção 2 da recomendação ITU-R P. 840, são calculadas pelas equações abaixo, em GHz:

$$f_P = 20,2 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \quad (81)$$

$$f_S = 39,8f_P \quad (82)$$

Com esses valores da equação 74 até a 82, é possível resolver a equação 73 e calcular K_i , a partir do qual é possível calcular a atenuação por nuvens e névoa, em dB, resolvendo-se a equação 72.

As equações de 72 a 82 são implementadas corretamente na biblioteca *ITU-Rpy*, no modelo relacionado à recomendação ITU-R P. 840.

3.1.2.3.4 Atenuação por cintilação troposférica

A última das grandes atenuações troposféricas, a causada por cintilação troposférica, também é calculada ao se chamar a função *atmospheric_attenuation_slant_path* da biblioteca *ITU-Rpy*. Essa função, por sua vez, chama a função *scintillation_attenuation* para o cálculo dessa atenuação em específico.

A quantificação dessa atenuação para ângulos de elevação maiores que 5 ° é dada pela seção 2.4.1 da recomendação ITU-R P. 618. Essa quantificação é válida para frequências entre 4 GHz e 20 GHz. Por isso, como atenuações troposféricas são

mais significativas com o aumento da frequência, considerou-se essa atenuação como 0 dB para enlaces simulados cujas frequências são menores que 4 GHz.

Primeiramente, calcula-se o termo úmido da refratividade de rádio, N_{wet} , de acordo com a recomendação ITU-R P. 453¹³. Também é possível obter esse termo diretamente do mapa digital anexado a essa recomendação, que é o método utilizado na biblioteca *ITU-Rpy*.

Depois, calcula-se o desvio padrão da amplitude de referência do sinal, chamado σ_{ref} , em dB, de acordo com a fórmula abaixo:

$$\sigma_{ref} = 3,6 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} N_{wet} \quad (83)$$

Então, calcula-se o comprimento efetivo do percurso com cintilação, L_{sc} , em metros:

$$L_{sc} = \frac{2000}{\sqrt{\sin^2(el) + 2,35 \cdot 10^{-4} + \sin(el)}} \quad (84)$$

Na equação acima, a constante 2000 vem do dobro da altura da camada turbulenta, h_L , que é igual a 1000 metros e el é o ângulo de elevação entre o satélite e a estação.

Após isso, calcula-se o diâmetro efetivo D_{eff} da antena, em m, a partir do seu diâmetro D , também em metros, e da sua eficiência de abertura η :

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D \quad (85)$$

¹³ INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.453-14**: The radio refractive index: its formula and refractivity data. Genebra: ITU, aug. 2019d. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.453-14-201908-l/en>. Acesso em: 25 jul. 2023.

Então, calcula-se o *averaging fator* da antena, chamado $g(x)$, pela equação abaixo:

$$g(x) = \sqrt{3,86(x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin \left[\frac{11}{16} \tan^{-1} \left(\frac{1}{x} \right) \right] - 7,08x^{5/6}} \quad (86)$$

Na fórmula acima, o valor x depende do diâmetro efetivo da antena, da frequência do enlace e do comprimento efetivo do caminho com cintilação:

$$x = 1,22D_{eff}^2 \cdot \frac{f}{L_{SC}} \quad (87)$$

Ainda segundo a recomendação ITU-R P. 618, se o argumento da raiz quadrada da equação 86 for menor que 0, não há atenuação por cintilação ionosférica.

Então, calcula-se o desvio padrão da amplitude do sinal (σ) a partir do desvio padrão de referência, de $g(x)$, da frequência do enlace e do ângulo de elevação. O cálculo é como segue:

$$\sigma = \sigma_{ref} \cdot f^{7/12} \cdot \frac{g(x)}{\sin(el)^{1,2}} \quad (88)$$

Depois, calcula-se o fator relacionado à indisponibilidade p , ou taxa de excedência da atenuação, chamado $a(p)$. Esse fator é dado por:

$$a(p) = -0,061(\log p)^3 + 0,072(\log p)^2 - 1,71 \log p + 3 \quad (89)$$

Por fim, encontra-se a atenuação por cintilação troposférica, em dB, multiplicando-se esse fator pelo desvio padrão:

$$A_s = a(p) \cdot \sigma \quad (90)$$

Todas as equações de 83 a 90 foram implementadas de maneira correta na biblioteca *ITU-Rpy*. Finalmente, a função *atmospheric_attenuation_slant_path* realiza a equação 50 para gerar a atenuação troposférica total sobre o enlace.

3.1.2.4 Biblioteca *Matplotlib*

A biblioteca *Matplotlib* foi utilizada para construir os gráficos com os resultados da simulação, uma vez que ela é fácil de ser utilizada e possui funções similares às do *Matlab*.

Antes de construir os gráficos, uma função foi criada no código *stuff.py* para criar os vetores que são utilizados na construção dos gráficos. O primeiro vetor é o valor da relação sinal-ruído do enlace calculado de acordo com a função de balanço de potência da figura 26, e o segundo é o ângulo de elevação entre o satélite e a estação, computado utilizando-se a função *azel*, mostrada na figura 23.

A figura abaixo mostra a função *create_vectors*, que prepara esses vetores antes de construir o gráfico:

Figura 27 Linhas de 301 a 336 do código *stuff.py*

```
301 def create_vectors(precisao, lat_e, lon_e, alt, f, p, n, D, pt, GTs, bt, pontos, curr):
302     elev = []
303     cnu = []
304     inicios = []
305     fins = []
306     for i in range(0, pontos+1, 1):
307         if precisao == 0:
308             diff = i/1440
309         else:
310             diff = i/86400
311         dt = ephem.Date(curr + diff)
312         elev.append(azel(1, dt, lat_e, lon_e, alt)[1])
313
314         if elev[i] >= 5:
315             trop_loss = get_att(1, lat_e, lon_e, f, elev[i], p, D, n)[0]
316             Au = get_vel(1, f, dt, lat_e, lon_e, alt, elev[i])[3]
317             cnu.append(balanco_pot(1, f, p, n, D, pt, GTs, bt, trop_loss, Au, elev[i])[0])
318         else:
319             cnu.append(np.nan)
320
321         if 100*i/pontos % 10 == 0:
322             print ("Progresso:", 100*i/pontos, "%")
323
324     for i in range(1, pontos, 1):
325         if elev[i-1] < 5 and elev[i] >= 5:
326             inicios.append(i)
327         else:
328             if elev[i] >= 5 and elev[i+1] < 5:
329                 fins.append(i)
330
331     elev = np.asarray(elev)
332     cnu = np.asarray(cnu)
333     len_i = [len(inicios)]
334     len_f = [len(fins)]
335     vec = np.concatenate([len_i, len_f, elev, cnu, inicios, fins])
336     return vec
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Na figura 27, mostra-se a função *create_vectors*. Ela recebe, como argumento, a variável *precisao*, que é a precisão do gráfico (1 minuto ou 1 segundo), as coordenadas da estação terrena, a frequência do enlace, a disponibilidade, a eficiência de abertura da antena de transmissão η (chamada aqui de n), o diâmetro dessa antena, sua potência de transmissão, a figura de mérito do satélite, a banda do sinal transmitido, o número de pontos do gráfico (quantos minutos constarão no eixo das abscissas do gráfico) e o horário em que a função é chamada, *curr*.

Criam-se vetores para os ângulos de elevação calculados, para as relações sinal-ruído calculadas e para os momentos de início e fim das janelas de computação dos valores, que ocorrem quando o ângulo de elevação se encontra entre 5 e 90 °.

É feito um laço do tipo *for* para calcular as relações sinal-ruído e os ângulos de elevação de cada minuto das abscissas do gráfico.

Se a precisão for de um minuto, cada passo de tempo, chamado *diff*, vale $i/1440$, sendo *i* o iterador do laço. Já se a precisão for de um segundo, esse passo temporal vale $i/86400$, que é $1/60$ do *diff* com precisão de um minuto.

Na linha 311, define-se a variável *dt* como sendo o minuto (ou segundo, dependendo da precisão) em que se encontra o cálculo do gráfico dentro do laço. Esse tempo de computação do gráfico é o tempo de início da construção do gráfico, *curr*, somado ao passo temporal previamente descrito.

Então, na linha 312, calcula-se o ângulo de elevação no tempo *dt*, que é uma previsão. Se o ângulo de elevação for igual ou superior a 5° , também se calculam as atenuações troposféricas, a perda por percurso no espaço livre e a relação sinal-ruído C/N nesse instante *dt*. Caso esse ângulo seja menor que 5° , atribui-se um valor que não é um número (*np.nan*) ao vetor de relação sinal-ruído na posição relativa ao tempo *dt*. Esse valor não aparecerá no gráfico depois, então a ordenada naquele instante de tempo ficará vazio.

Mostra-se o progresso da construção do vetor, que pode ser útil caso o gráfico esteja demorando para ser construído.

Depois, é realizado mais um laço que percorre o vetor dos ângulos de elevação, que procura onde está o começo e o fim de cada janela de cálculo do gráfico (uma janela de cálculo ocorre quando o ângulo de elevação se encontra entre 5° e 90°).

Por fim, montam-se os vetores, e todos são concatenados em um único vetor, chamado *vec*, que será passado para a função da construção do gráfico.

A primeira parte da função que constrói os gráficos está ilustrada na figura abaixo:

Figura 28 Linhas de 258 a 283 do código *stuff.py*

```
258 def grafico(enable, precisao, lat_e, lon_e, alt, f, p, eta, D, pt, GTs, bt, pontos):
259     if enable == 1:
260         if precisao == 1:
261             pontos = pontos * 60
262             curr = ephem.now()
263             t = np.linspace(0, pontos, pontos+1)
264             vectors = create_vectors(precisao, lat_e, lon_e, alt, f, p, eta, D, pt, GTs, bt, pontos, curr)
265             len_i = int(vectors[0])
266             len_f = int(vectors[1])
267
268             y1 = vectors[2:pontos+3]
269             y2 = vectors[pontos+3:(2*pontos)+4]
270             inicios = vectors[(2*pontos+4):(2*pontos+4+len_i)]
271             fins = vectors[(2*pontos+4+len_i):]
272
273             fig, ax = plt.subplots(figsize=(5, 2.7), layout='constrained')
274             twin1 = ax.twinx()
275             p1, = ax.plot(t, y1, "b-", label='E1 (°)')
276             p2, = twin1.plot(t, y2, "r-", label='C/N (dB)')
277             ax.set_xlabel('Minutos a partir da hora computada inicial')
278             ax.set_ylabel('Angulo de elevacao (°)')
279             twin1.set_ylabel('Relacao portadora-ruído (dB)')
280             ax.yaxis.label.set_color(p1.get_color())
281             twin1.yaxis.label.set_color(p2.get_color())
282             p3 = plt.vlines(x = inicios, ymin = -100, ymax = 100, colors = 'green', label = "Inicio da janela de calculos", linestyle = 'dotted')
283             p4 = plt.vlines(x = fins, ymin = -100, ymax = 100, colors = 'orange', label = "Fim da janela de calculos", linestyle = 'dotted')
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A função *grafico*, que pode ser observada na figura 28, recebe os mesmos argumentos da função *create_vectors*, exceto que ela não recebe o horário atual *curr* e recebe o sinal de *enable*, diferentemente da anterior.

Se a precisão for igual a 1, ou seja, for de 1 segundo, o número de pontos no gráfico é multiplicado por 60. Utiliza-se a função *np.linspace*, da biblioteca *Numpy*, para criar um vetor temporal para o eixo das abscissas do gráfico. Essa função cria um vetor de 0 até *pontos*, com *pontos+1* posições, portanto ela gera o vetor temporal inteiro utilizado no gráfico.

Na linha 264, chama-se a função da figura 27. Depois, das linhas 265 à 271, trata-se o vetor para desfazer a operação de concatenação realizada no final da função *create_vectors*.

Na linha 273, cria-se a figura do gráfico. Na 274, cria-se outro eixo das ordenadas, pois o gráfico tem o tempo nas abscissas e tanto o ângulo de elevação quanto a relação sinal-ruído nas ordenadas, cada uma dessas grandezas em um eixo y com sua própria escala.

Depois disso, são definidos os estilos das linhas, as legendas e dois tipos de linhas verticais que são plotadas sobre o gráfico: uma linha vertical verde indica o

início de uma janela de computação, e uma linha vertical laranja indica o fim dessa janela, para todas as janelas dentro do tempo calculado.

A segunda parte da função *grafico* está mostrada na figura abaixo:

Figura 29 Linhas de 284 a 299 do código *stuff.py*

```
284
285 ax.set_title("Angulo de elevacao e C/N")
286 plt.legend(bbox_to_anchor = (1.0, 1), loc = 'upper right', handles = [p1,p2,p3,p4])
287
288 curr = ephem.Date(curr - 180/1440)
289 ax.annotate("Data dos calculos: {}".format(curr), xy=(pontos-10,-90))
290 ax.set_xlim(0, pontos)
291 ax.set_ylim(-100,100)
292 twin1.set_xlim(0,pontos)
293 twin1.set_ylim(0,100)
294 ax.grid(True)
295 if precisao == 1:
296     scale_x = 60
297     ticks_x = ticker.FuncFormatter(lambda x, pos: '{0:g}'.format(x/scale_x))
298     ax.xaxis.set_major_formatter(ticks_x)
299 plt.show()
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Na parte mostrada na figura 29, define-se o título do gráfico, a posição das legendas, uma anotação contendo o horário em que se iniciou a construção do gráfico, os limites dos eixos e, caso a precisão seja de um segundo, altera-se a numeração do eixo temporal para ficar na escala correta. Então, mostra-se o gráfico na linha 299.

3.1.2.5 Cálculos das degradações ionosféricas

As últimas funções do código *stuff.py* são relacionadas às degradações ionosféricas. A primeira delas está mostrada na imagem abaixo:

Figura 30 Linhas de 117 a 139 do código *stuff.py*

```
117 def get_indexes(en, lat_e, lon_e):
118     if en == 1:
119         lat_vec = np.linspace(-90, 90, num=91) #de -90 a 90, em 91 passos
120         lon_vec = [9, 27, 45, 63, 81, 99, 117, 135, 153, 171, -171, -153, -135, -117, -99, -81, -63, -45, -27, -9]
121         valor1 = lat_e - lat_vec[0]
122         lat_index = 0
123         for i in range(len(lat_vec)):
124             if abs(valor1) > abs(lat_vec[i] - lat_e):
125                 valor1 = lat_vec[i] - lat_e
126                 lat_index = i
127
128         valor2 = lon_e - lon_vec[0]
129         lon_index = 0
130         for i in range(len(lon_vec)):
131             if abs(valor2) > abs(lon_vec[i] - lon_e):
132                 valor2 = lon_vec[i] - lon_e
133                 lon_index = i
134
135         print("Latitude da estacao: ", lat_e, " °")
136         print("Longitude da estacao: ", lon_e, " °")
137         return lat_index, lon_index
138     else:
139         return 0,0
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A função *get_indexes*, mostrada na figura 30, recebe o *enable* e a latitude e longitude da estação terrena, em graus. Essa função gera índices que serão utilizados para manipular o arquivo *tec.txt*, onde estão guardadas as informações de densidade total de elétrons (*TEC*) de todo o mundo.

São gerados dois vetores, um de latitudes e outro de longitudes. O vetor de latitudes vai de -90 a 90 °, em passos de 2 ° (91 posições), e o de longitudes é mostrado na linha 120. Ambos os vetores estão relacionados a como os valores de *TEC* são disponibilizados pelo *site* do *Space Weather Prediction Center*.

Os dois vetores são percorridos e são feitas comparações com a latitude e a longitude da estação terrena, para achar o índice do valor de *TEC* referente às coordenadas da estação terrena simulada.

A segunda função relacionada a degradações ionosféricas é mostrada na figura abaixo:

Figura 31 Linhas de 284 a 299 do código *stuff.py*

```
141 def get_tec(en, f, lat_index, lon_index):
142     if en == 1:
143         arq = open(path2, "r")
144         dados = arq.read()
145         arq.close()
146         sep = dados.split("\n")
147         if lon_index >= 0 and lon_index <= 5:
148             inc = 0
149         else:
150             if lon_index >= 6 and lon_index <= 11:
151                 inc = 1
152             else:
153                 if lon_index >= 12 and lon_index <= 17:
154                     inc = 2
155                 else:
156                     inc = 3
157
158         bloco = lat_index*4
159         linha = sep[bloco + inc + 1] #numero do bloco so
160         sep2 = linha.split()
161         pos = lon_index - 6*inc
162         tec = sep2[pos]
163         print("TEC: ",tec, "x 10^16 e/m²")
164         tec_float = float(tec)
165         tec_float = tec_float * pow(10,16)
166         Bav = 50 * pow(10,-6)
167         const = 2.36 * pow(10,-14) * Bav * tec_float
168         farad = const/(f ** 2)
169         const2 = 1.345 * tec_float * pow(10,-7)
170         freq_hz = f * pow(10,9)
171         delay = const2/(freq_hz ** 2)
172         return tec,farad,delay
173     else:
174         return 0,0,0
```

Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A função da figura 31, *get_tec*, recebe o sinal de *enable*, a frequência de operação do enlace e os índices calculados na função da figura 30.

Primeiro, ela lê o arquivo *tec.txt*, onde estão salvos os valores de *TEC* e, a partir dos índices, manipula o texto até encontrar o valor correto relativo às coordenadas da estação terrena simulada. Esse valor de *TEC* dado no arquivo *tec.txt* é o valor real dividido por 10^{16} .

Depois, esse valor de *TEC* é multiplicado por 10^{16} para ficar no formato convencional, em e/m^2 .

Então, na linha 168, calcula-se a rotação de Faraday, utilizando-se o cálculo da seção 4.2 da recomendação ITU-R P. 531 (INTERNATIONAL

TELECOMMUNICATION UNION, 2019b). A rotação de Faraday é dada, em radianos, pela equação abaixo:

$$\theta_F = 2,36 \cdot 10^{-14} \cdot \frac{B_{av}(TEC)}{f^2} \quad (91)$$

Na equação acima, a rotação de Faraday, θ_F , é dada em rad, B_{av} é o campo magnético médio da Terra (considerado 50 μ T nos cálculos desta simulação), TEC é a densidade total de elétrons, em e/m², e a frequência do enlace é dada em GHz.

Por fim, na linha 171, calcula-se o atraso de grupo t_g sobre o sinal devido aos efeitos ionosféricos, quantificado na seção 4.3 da mesma recomendação da ITU. Esse atraso, em segundos, é dado pela equação:

$$t_g = 1,345 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(TEC)}{f^2} \quad (92)$$

Na equação acima, a frequência é dada em Hz, por isso a conversão na linha 170 da imagem 31.

Tanto a rotação de Faraday quanto o atraso de grupo dependem da *TEC*, que é atualizado a cada 15 minutos no *site* que os gera. Por isso, não se implementou a discriminação de polarização cruzada relativa à rotação de Faraday, uma vez que essa atenuação afetaria a relação sinal-ruído e, como a simulação é atualizada em tempo real e permite fazer previsões futuras, não seria possível fazer esse tipo de previsão considerando a atenuação na potência pela polarização cruzada da rotação de Faraday.

Então, ambas as degradações ionosféricas ficam fixas até que seja baixado um novo arquivo contendo novos valores de *TEC*.

3.2 Análise dos resultados

Nesta seção, serão analisados vários resultados gerados pela simulação, comparando-os com alguns resultados disponibilizados por vários *sites* que rastreiam satélites e montando tabelas e gráficos de resultados similares, porém variando alguns parâmetros para analisar os efeitos desses parâmetros individuais sobre a qualidade do enlace.

3.2.1 Estrutura geral dos resultados da simulação

Ao se executar a simulação no *GNU Radio*, os resultados da simulação são mostrados em uma janela que é aberta. A janela possui três divisões, cada uma mostrando alguns resultados que têm características comuns entre si.

Executou-se a simulação à 00:45 do dia 26/07/2023, para demonstrar um resultado de exemplo. Utilizaram-se os valores padrão dos parâmetros, que foram ajustados para melhor representar um enlace entre uma estação terrena e o satélite AlfaCruz. Além disso, utilizou-se o TLE desse satélite.

Ao se executar a simulação, as primeiras informações a aparecer no terminal foram aquelas relacionadas ao tempo desde a última modificação nos arquivos do TLE e do TEC, o horário simulado, a latitude e a longitude da estação terrena simulada, e a densidade total de elétrons naquele instante para o local daquela estação terrena, como mostra a figura abaixo:

Figura 32 Primeiras mensagens do terminal da simulação realizada à 00:45 do dia 26/07/2023

```
Tempo desde a ultima modificacao no TLE: 2250.1760499477386 segundos
TEC mais recente baixado!
Tempo desde a ultima modificacao no TEC: 2249.4506182670593 segundos
Hora simulada: 2023/7/26 00:45:44 BRT
Latitude da estacao: -15.8 °
Longitude da estacao: -47.9 °
TEC: 29.0219 x 10^16 e/m^2
```

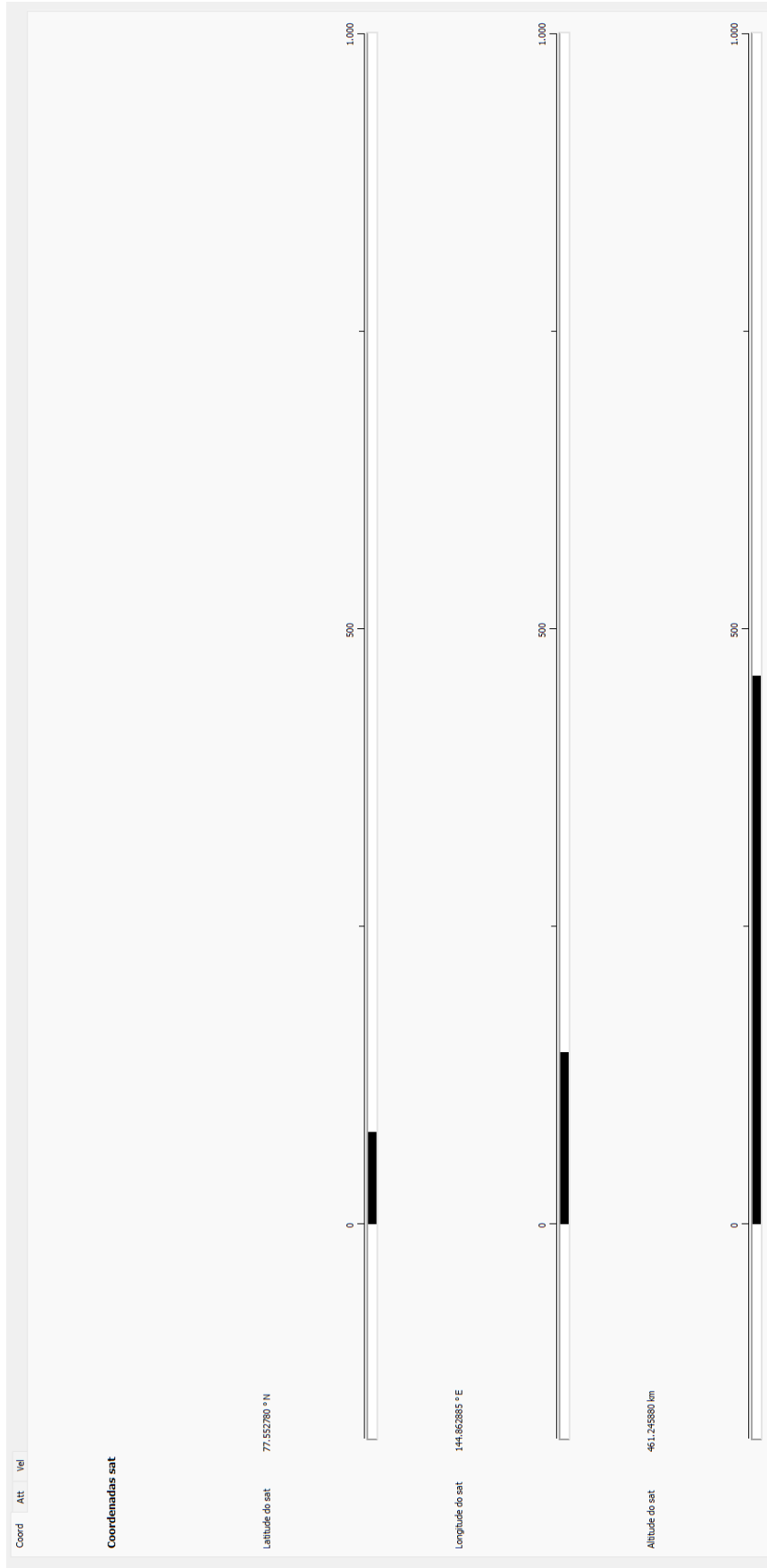
Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Na figura 32, logo acima, é possível perceber que, por ter mais de 15 minutos (900 segundos) desde a última modificação no arquivo *tec.txt*, o código *stuff.py* utilizou a biblioteca *Requests* para baixar uma nova lista com os valores de *TEC* para todas as localidades do mundo.

Além disso, pelo fato do tempo desde a última modificação no arquivo *tle.txt* ser menor do que 2 horas (7200 segundos), o código não precisou baixar uma nova versão desse elemento.

Em relação aos resultados em si, a primeira janela ou aba é chamada *Coord*, que mostra dados das coordenadas do ponto subsatélite e da altitude do satélite no determinado instante de simulação. A figura 33, logo abaixo, mostra os dados dessa primeira janela após essa mesma execução da simulação:

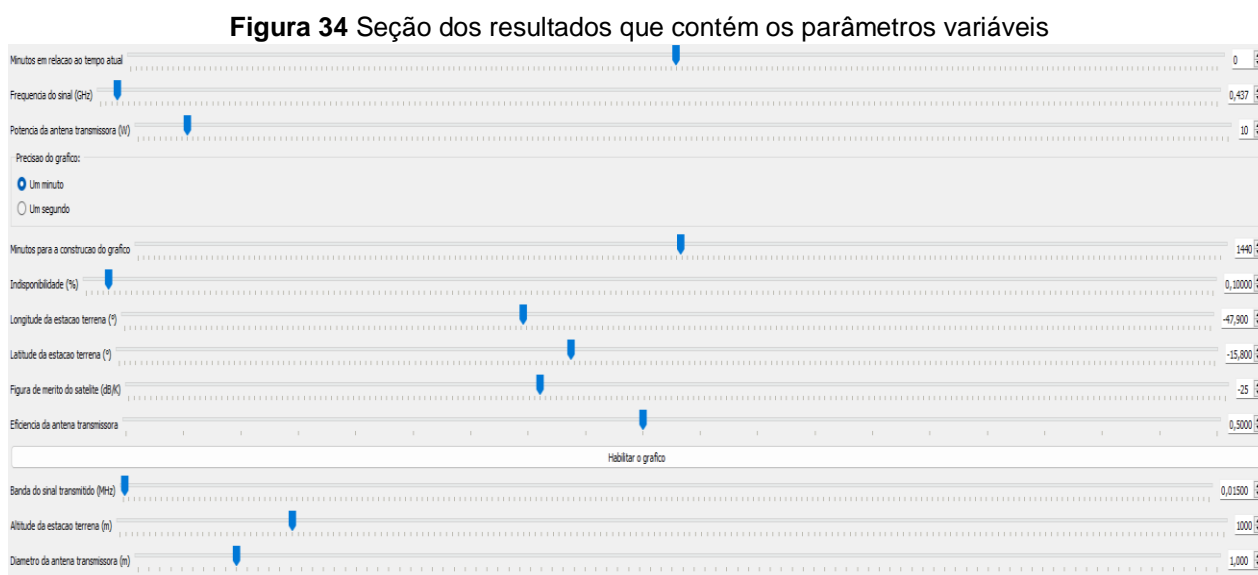
Figura 33 Aba *Coord* dos resultados gerados à 00:45 do dia 26/07/2023



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A imagem acima mostra a janela *Coord*, que mostra que o satélite, naquele momento (à 00:46 de 26/07/23), se encontrava a uma altitude de 461,245880 km, e seu ponto subsatélite possuía latitude de 77,552780 °N e longitude de 144,862885 °E.

Na parte inferior de cada uma das três janelas, há uma seção com os parâmetros que o usuário pode alterar durante a execução da simulação. Essa seção é mostrada na figura abaixo:



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Na seção mostrada na figura 34, a primeira variável que pode ser alterada durante a execução do código é a de minutos em relação ao tempo real, que gera o tempo simulado. Ela é a variável *diff* da figura 11, e pode tanto fazer o tempo de simulação ser passado em relação ao tempo real ou ser um tempo adiantado, fazendo com que a simulação realize uma previsão de resultados futuros.

O segundo parâmetro variável é o de frequência do enlace, em GHz, cuja alteração gera grandes diferenças nos valores de atenuação mostrados na janela seguinte de resultados.

O terceiro é a potência da antena transmissora, em Watts, que pode ser ajustado caso se queiram avaliar os efeitos de uma antena mais potente (ou menos potente) sobre a qualidade do enlace de comunicações.

A quarta variável que pode ser mexida durante a execução da simulação é a de precisão do gráfico. Essa variável é em forma de seleção, podendo-se escolher ou uma opção ou a outra.

Depois disso, pode-se alterar a indisponibilidade percentual p , ou a taxa de excedência, que é utilizada apenas nos cálculos das atenuações troposféricas, como já foi mencionado. Se um enlace com um valor baixo de p possuir uma boa relação sinal-ruído, isso significa que provavelmente será possível manter uma boa comunicação durante quase todo o tempo de utilização desse enlace.

Abaixo da indisponibilidade, é permitido ao usuário alterar as coordenadas da estação terrena simulada.

Depois dessas coordenadas, pode-se alterar a figura de mérito do satélite, parâmetro que é característico de cada satélite e pode ser útil para simular um enlace de comunicações com outro satélite que não seja o AlfaCruz.

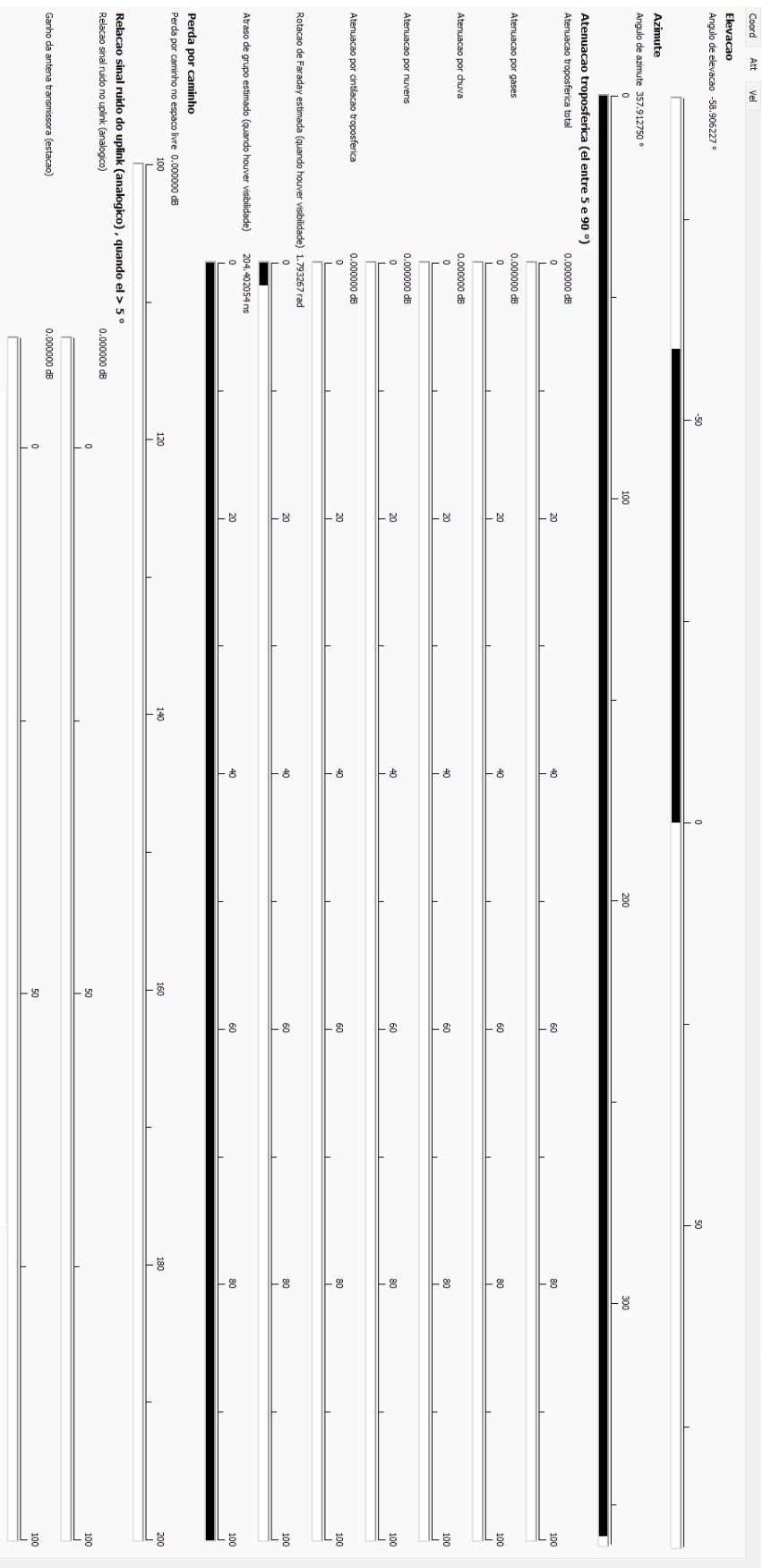
Então, há a variável que controla a eficiência de abertura da antena transmissora. Pode-se variar essa grandeza caso se avalie a mudança dos equipamentos de transmissão de uma estação terrena, ou apenas para fins pedagógicos.

Abaixo dessa eficiência, há um botão que habilita o gráfico da relação sinal-ruído do enlace e do ângulo de elevação entre o satélite e a estação terrena no tempo simulado.

Depois, é possível alterar a banda do sinal transmitido, em MHz, a altitude da estação terrena e o diâmetro da antena transmissora, que altera o ganho dessa antena, de acordo com a equação 16. Como se considera uma antena circular nessa simulação, a área da antena está relacionada com seu diâmetro pela relação da área do círculo.

Na figura abaixo, mostrar-se-ão os resultados da segunda aba, chamada *Att*:

Figura 35 Aba Att dos resultados gerados à 00:45 do dia 26/07/2023



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A janela *Att*, mostrada na figura 35, contém informações relacionadas às degradações que acometem o enlace de comunicações.

A primeira informação dessa aba é o ângulo de elevação entre o satélite e a estação terrena simulados. Como já foi explicado, a biblioteca *PyEphem* retorna valores negativos de elevação quando não há visibilidade do satélite, portanto, nessa simulação, esse ângulo varia entre -90 e 90 °. No momento simulado, esse ângulo era de $-58,906227$ °.

Depois, há o ângulo de azimute entre o satélite e a estação terrena, de acordo com o Sistema Horizontal de Coordenadas, como explicado na seção 2.1.6. Esse ângulo varia de 0 a 360 °. No momento simulado, ele valia $357,912750$ °, portanto o satélite estava bem próximo do eixo norte (vide figura 6).

Abaixo desses dois ângulos, há uma parte de atenuações que contém sete dados. Cinco desses sete são atenuações troposféricas, e só são calculados quando o ângulo de elevação é igual ou superior a 5 °, e os dois últimos são degradações causadas pela ionosfera.

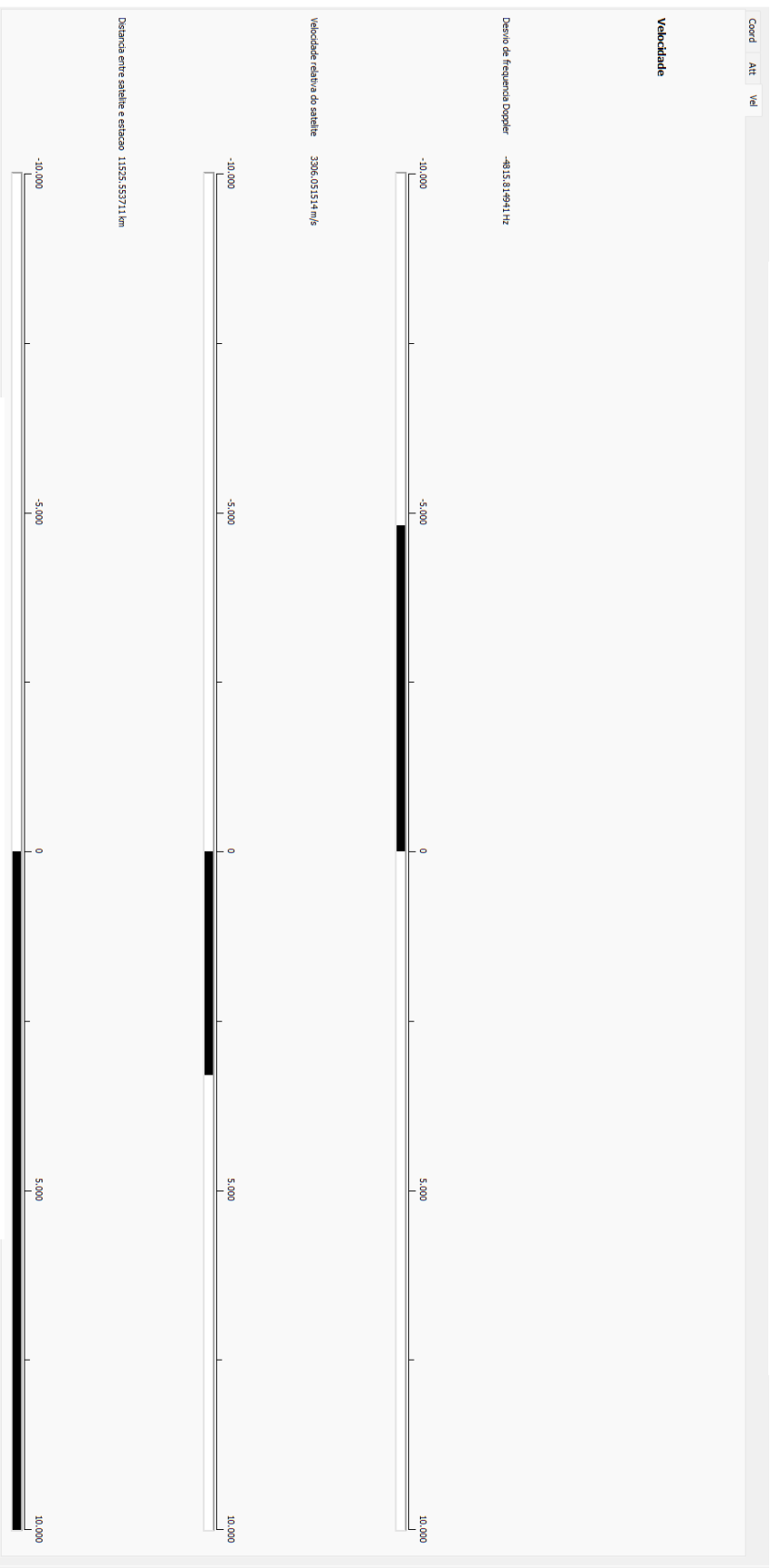
O primeiro dado dessa parte é a atenuação troposférica total, calculada conforme a equação 50. Abaixo dela, há a atenuação por gases, a por chuva, a por nuvens e, por fim, a por cintilação troposférica. Abaixo dessas cinco atenuações troposféricas, todas nulas, há a rotação de Faraday, em radianos, estimada conforme o valor da *TEC*. Com os dados de *TEC* no momento de simulação, ela estava em $1,793267$ rad. Abaixo dela, há o atraso de grupo, em nanossegundos, que também depende da *TEC*. Ele valia $204,402054$ ns no momento simulado.

Abaixo dessas atenuações atmosféricas, há a perda por caminho no espaço livre, dada em dB, que só é calculada quando o ângulo de elevação é maior que 0 ° (quando há visibilidade do satélite, considerando um horizonte não obstruído).

Por fim, há o resultado relacionado à relação sinal-ruído analógica C/N, em dB, desconsiderando qualquer modulação ou codificação de canal. Essa relação só é calculada quando o ângulo de elevação é igual ou superior a 5 °. Como a função que calcula essa relação também transforma o ganho da antena transmissora em dB, esse ganho também é mostrado na aba *Att*.

A última aba de resultados, chamada *Vel*, é mostrada na figura 36:

Figura 36 Aba Vel dos resultados gerados à 00:45 do dia 26/07/2023



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

A aba mostrada na figura 36 contém informações relacionadas à velocidade do satélite.

A primeira delas é o desvio de frequência devido ao efeito Doppler, dado em Hz. Esse desvio de frequência é devido à velocidade relativa entre o satélite e a estação terrena e, no momento, valia -4815,814941 Hz.

Abaixo do desvio de frequência Doppler, há a velocidade relativa do satélite ao observador, que é a velocidade utilizada para o cálculo desse desvio, segundo a equação 38. No momento, ela valia 3306,051514 m/s. Aplicando-se a equação 38, sabendo-se que a frequência original do enlace é de 437 MHz, tem-se:

$$\Delta f = \frac{-f}{c} v(t) = \frac{-437 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \cdot 3,306051514 \cdot 10^3$$
$$\Delta f \approx -4815,815 \text{ Hz}$$

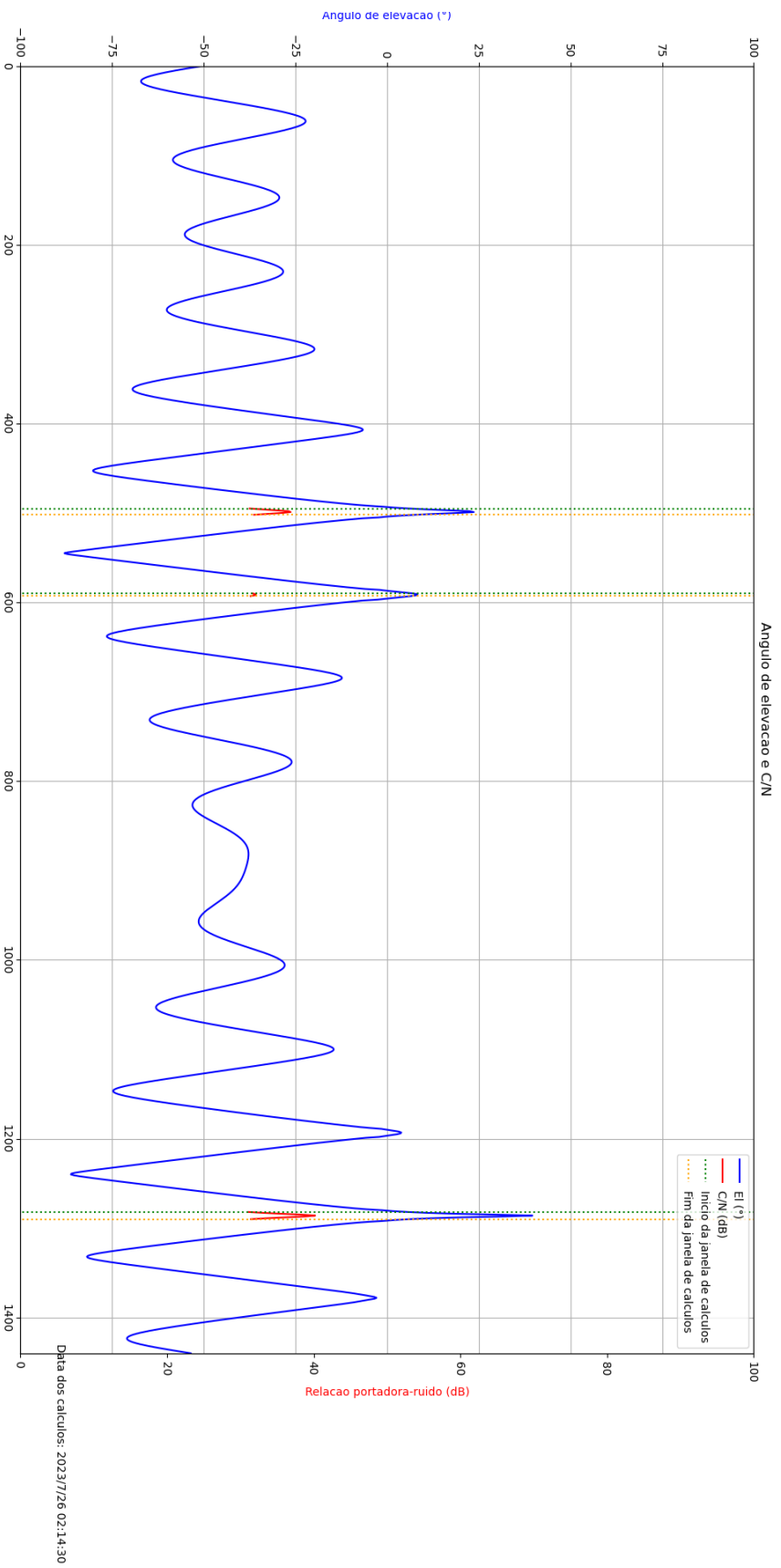
Dessa forma, os cálculos do desvio de frequência Doppler foram implementados corretamente.

Por fim, abaixo da velocidade relativa, há a distância entre a estação e o satélite, que, no momento simulado, era de 11525,553711 km.

O último tipo de resultado que é gerado na simulação é o gráfico da relação sinal-ruído e do ângulo de elevação em função do tempo simulado, dado em minutos após o horário inicial em que se executou a simulação.

Gerou-se esse gráfico às 02:14:30 do dia 26/07/23, utilizando precisão de 1 minuto e tamanho do eixo temporal de 1440 minutos, e o resultado pode ser visto na figura abaixo:

Figura 37 Gráfico dos resultados gerados às 02:15 do dia 26/07/2023



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Nesse gráfico da figura 37, o eixo das abscissas é o eixo do tempo, dado em minutos após o horário em que se gerou o gráfico, e há dois eixos das ordenadas. O eixo das ordenadas à esquerda do gráfico, em azul, é o eixo relativo aos valores de ângulo de elevação entre o satélite e a estação, e é mostrado entre -100 e 100 °, e o eixo à direita do gráfico, em vermelho, é aquele relacionado à relação sinal-ruído C/N do enlace, abrangendo valores entre 0 e 100 dB nas definições de *zoom* nativas.

No canto inferior direito do gráfico, é possível ver o tempo de início de sua construção, que é a origem do eixo x. Além disso, a relação sinal-ruído só é desenhada quando o ângulo de elevação se encontra entre 5 e 90 °, que é a chamada janela de cálculos do gráfico.

Cada linha vertical verde indica onde começa cada janela de cálculos, e cada linha vertical laranja indica onde elas terminam. É possível perceber um padrão periódico na órbita do satélite AlfaCruz, com uma janela de visibilidade de cerca de 10 minutos a cada 720 minutos (12 horas), aproximadamente.

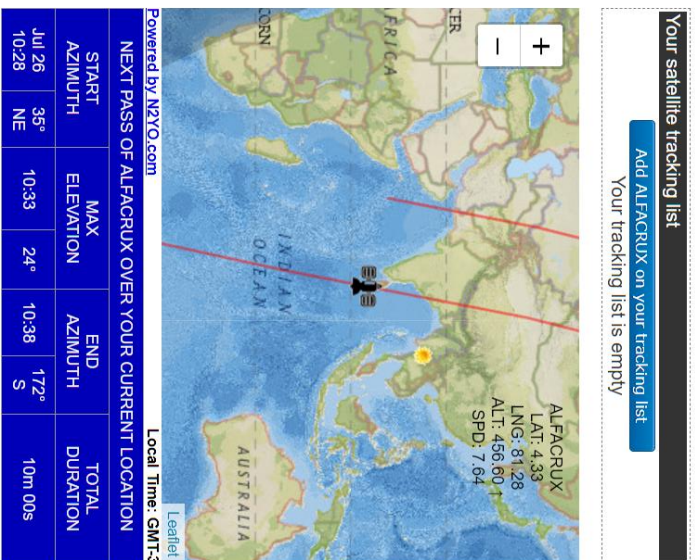
Nas subseções seguintes, serão comparados alguns resultados da simulação com resultados disponíveis em *sites* que rastreiam satélites.

3.2.2 Algumas comparações de resultados com o *site N2YO*

O *site N2YO*¹⁴ rastreia diversos satélites em tempo real, utilizando o TLE desses dispositivos. Além disso, ele detecta onde a localização do usuário pelo endereço IP do computador utilizado. Às 02:40 do dia 26/07/23, executou-se a simulação e compararam-se os resultados da aba *Coord* com aqueles disponibilizados no *site N2YO*. A imagem abaixo mostra a comparação:

¹⁴ Disponível em: <https://www.n2yo.com/satellite/?s=52160#results>

Figura 38 Comparação entre os resultados da simulação e os gerados pelo site N2YO



Fonte: montagem elaborada pelo autor (2023)

Os dados do *site N2YO* estão na metade da esquerda da figura 38, enquanto os resultados da simulação se encontram na metade direita.

Nessa imagem, no instante capturado, o *site* previa a latitude do satélite AlfaCruz como sendo 4,33 °, enquanto que a simulação deste trabalho previa essa latitude como 4,302874 °.

Quanto à longitude, o *site* afirmava que o satélite se encontrava na longitude 81,28 °, enquanto que a simulação calculava a longitude do satélite como sendo 81,280952 °.

Por fim, a altitude do satélite nesse determinado instante, segundo o *site*, era de 456,60 km. Já segundo a simulação, a altitude nesse momento era de 456,606049 km.

Por esses três valores, é possível concluir que ambas as previsões do *site* e da simulação realizada geraram valores bem próximos.

Além de fornecer esses dados de posição do satélite, o *site N2YO* também mostra a próxima janela de visibilidade do satélite para um observador localizado nas coordenadas do usuário, obtidas pelo seu endereço IP. Segundo o *N2YO*, o início da próxima janela de visibilidade seria às 10:28 do dia 26/07/23, com elevação máxima de 24 ° às 10:33, e o fim dessa janela seria às 10:38 do mesmo dia.

Então, executou-se a construção do gráfico para verificar se os resultados da simulação estavam de acordo essas informações. O gráfico resultante de uma execução às 02:52:59 do mesmo dia é mostrado na figura abaixo, e as três figuras subsequentes (40, 41 e 42) mostram o *zoom* nas três partes de interesse desse gráfico: o começo da janela de visibilidade, a elevação máxima e o término dessa janela.

Figura 39 Gráfico dos resultados gerados às 02:52:59 do dia 26/07/2023

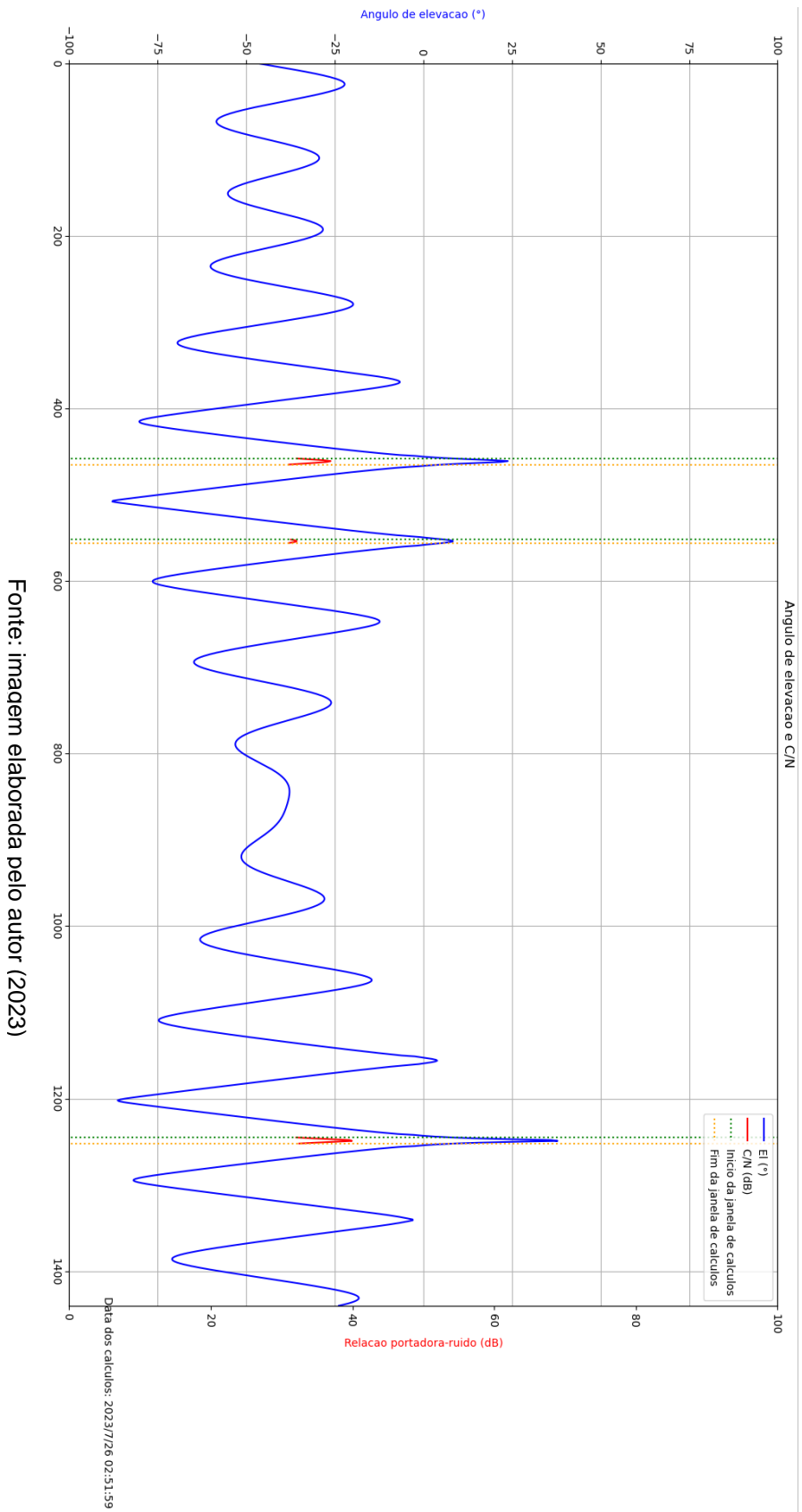
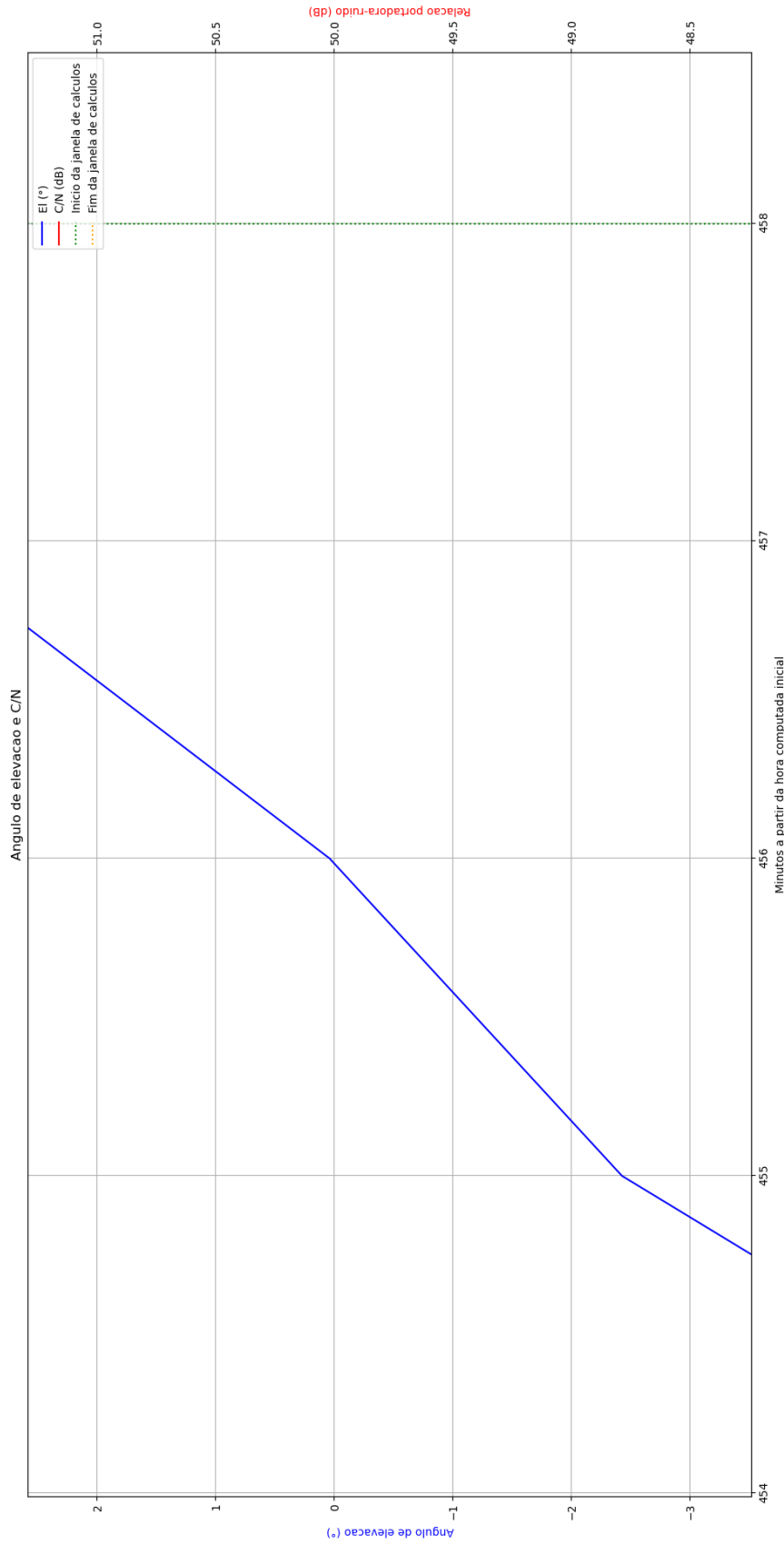
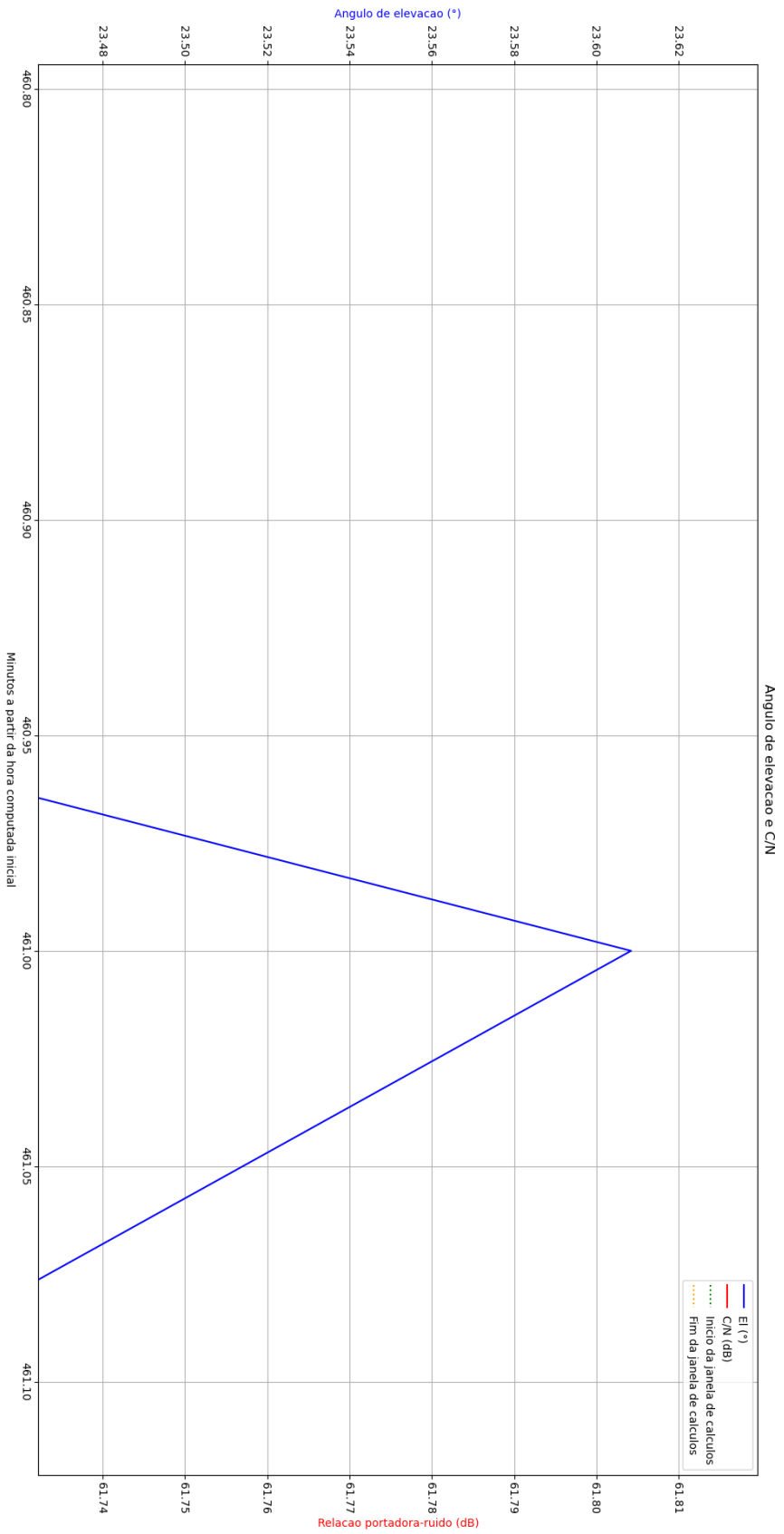


Figura 40 Gráfico dos resultados gerados às 02:52:59 do dia 26/07/2023, com destaque no início da janela de visibilidade



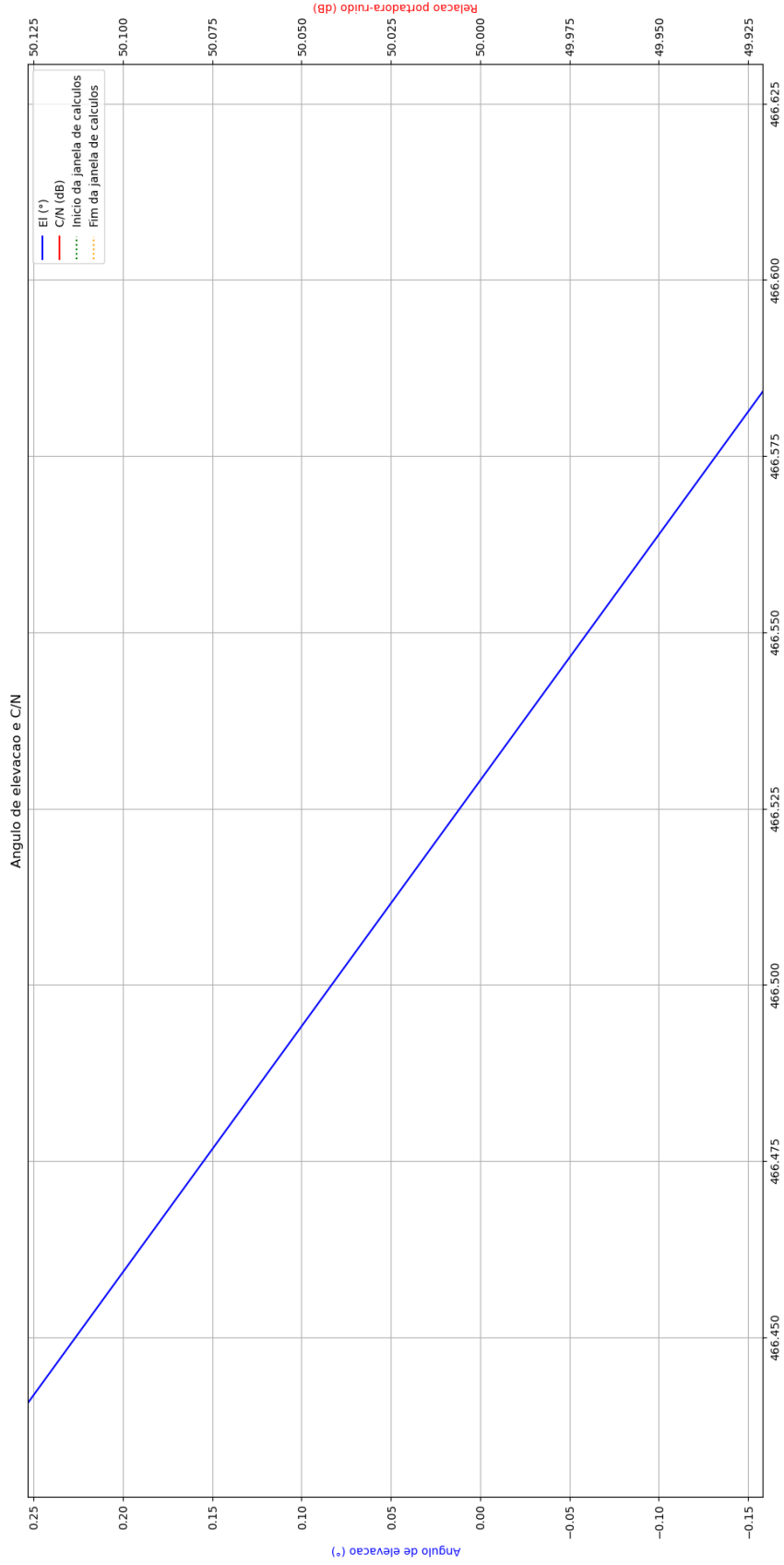
Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Figura 41 Gráfico dos resultados gerados às 02:52:59 do dia 26/07/2023, com destaque na elevação máxima da janela de visibilidade



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Figura 42 Gráfico dos resultados gerados às 02:52:59 do dia 26/07/2023, com destaque no término da janela de visibilidade



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Na figura 40, é possível ver um *zoom* no gráfico gerado para analisar com maiores detalhes a próxima janela de visibilidade após o momento de construção do gráfico.

Percebe-se que o ângulo de elevação cruza a marca de 0° , vindo de um valor negativo, aproximadamente 456 minutos após a construção do gráfico. O horário inicial é de 02:52:59 do dia 26/07/23. O horário resultante ao se somarem 456 minutos, ou 7 horas e 36 minutos ao horário inicial, é às 10:28:59 do mesmo dia, o que está de acordo com o dado do *site N2YO*.

Já na figura 41, vê-se o ângulo máximo de elevação nessa mesma janela de visibilidade, que é de, aproximadamente, $23,61^\circ$, aos 461 minutos após a construção do gráfico. O valor de $23,61^\circ$ está de acordo com os 24° dados pelo *site*, uma vez que o resultado de lá não mostra casas decimais. Além disso, 461 minutos após a construção do gráfico é 7 horas e 41 minutos após esse horário, o que resulta no horário de 10:33:59 do dia 26/07/23, que também está de acordo com o horário dado pelo *site N2YO*.

Por fim, na figura 42, há um destaque para a região do gráfico que contempla o fim dessa janela de visibilidade do satélite AlfaCruz. O ângulo de elevação cruza a marca de 0° , vindo de valores positivos, aproximadamente 466,525 minutos após a construção do gráfico, ou 7 horas, 46 minutos e 31 segundos após essa hora, resultando em um horário de 10:39:30 do dia 26/07/23, o que também está de acordo com o horário de término da janela de visibilidade dado pelo *site N2YO*, a menos de alguns segundos.

3.2.3 Algumas comparações de resultados com o *site OrbTrack*

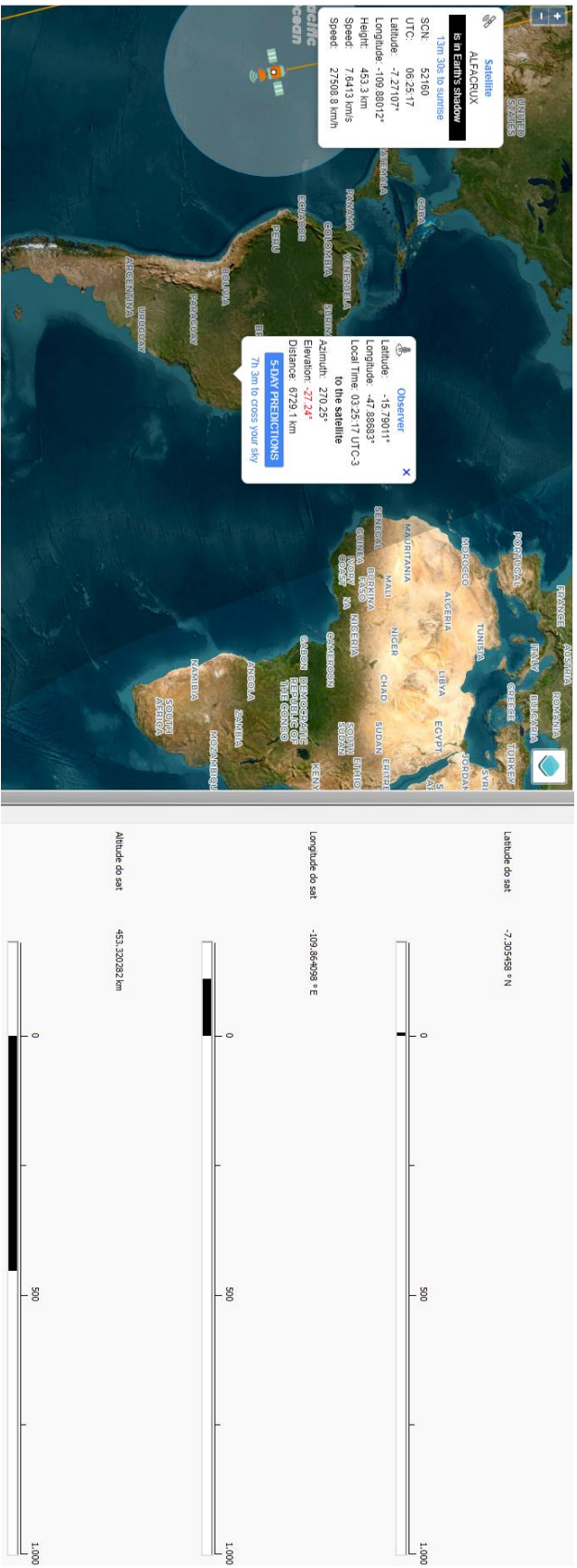
O *site OrbTrack*¹⁵ é outro *site* que rastreia diversos satélites em tempo real, incluindo o AlfaCruz.

Nesse *site*, é possível definir um observador em qualquer lugar da superfície terrestre, e são gerados resultados de ângulo de elevação, azimute e distância entre o satélite e o observador.

Para realizar a comparação, rastreou-se o AlfaCruz por esse *site* e definiu-se um observador na latitude $-15,79^\circ$ e na longitude $-47,89^\circ$, que são coordenadas próximas às que foram definidas na simulação do *GNU Radio* (latitude $-15,8^\circ$ e longitude $-47,9^\circ$).

Então, executou-se a simulação concomitantemente com o rastreamento em tempo real do *OrbTrack* às 03:25 do dia 26/07/23, e comparou-se a aba *Coord* da simulação com os dados gerados pelo *site*, conforme a figura ilustrada abaixo:

¹⁵ Disponível em: <https://www.orbtrack.org/#/?satName=ALFACRUX>



Fonte: montagem elaborada pelo autor (2023)

Figura 43 Comparação entre os resultados da simulação e os gerados pelo site *OrbTrack*, com foco na aba *Coord*

Na figura 43, verifica-se que o *OrbTrack* diz que o AlfaCruX, nesse horário de 03:45 BRT (ou 06:45 UTC) tem seu ponto subsatélite com latitude em $-7,27107^\circ$ e longitude em $-109,88012^\circ$, além uma altitude de 453,3 km.

Já na simulação deste trabalho, a latitude do ponto subsatélite calculada foi de $-7,305458^\circ$, a longitude foi de $-109,864098^\circ$ e a altitude valia 453,320282 km. Todos os três resultados se aproximam bastante daqueles dados pelo *site*.

Além disso, o *OrbTrack* afirma que o AlfaCruX irá cruzar o céu (ser visível) do observador em 7 horas e 3 minutos. Como o horário nesse momento era 03:25 do dia 26/07/23, isso significa que o *site* fez uma previsão de que o AlfaCruX seria visível às 10:28 do dia 26/07/23. Esse resultado bate com aquele mostrado na figura 40 e comentado na subseção 3.2.2.

O *site OrbTrack* dá outras informações além das coordenadas do satélite. Então, executou-se novamente a simulação no mesmo instante em que se verificaram outros dados do *OrbTrack*, com foco na aba *Att*, conforme a figura abaixo:

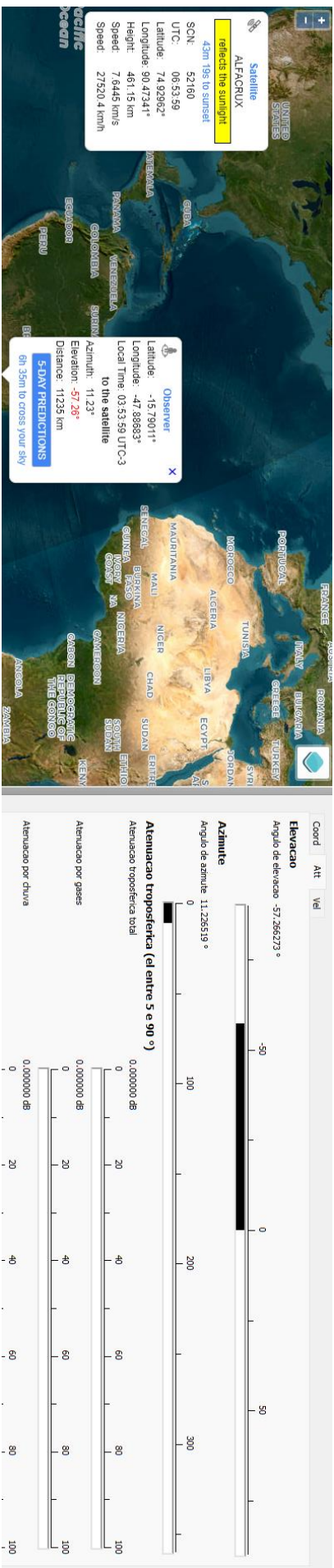


Figura 44 Comparação entre os resultados da simulação e os gerados pelo site *OrbTrack*, com foco na aba *Att*

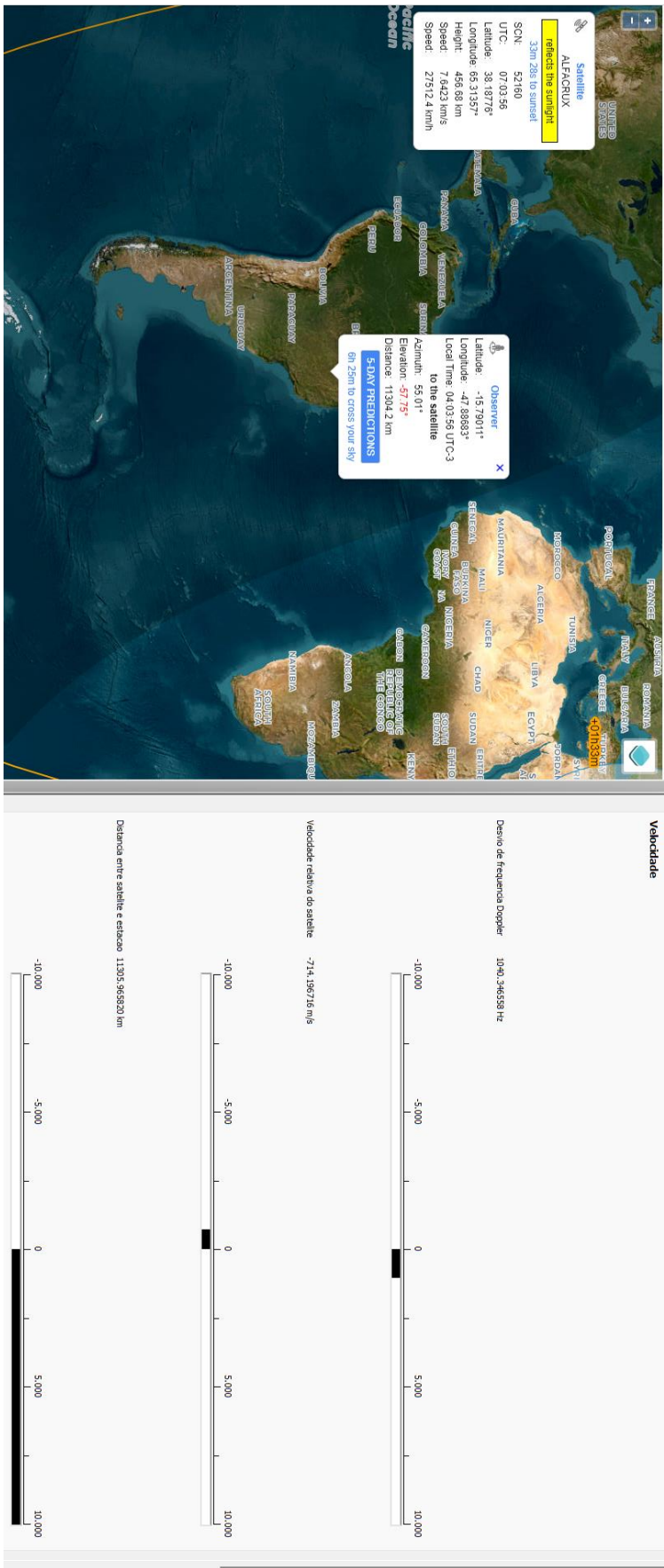
Fonte: montagem elaborada pelo autor (2023)

Na figura 44, do lado esquerdo, é possível ver que o *site* mostra, na seção do observador, que o ângulo de azimute entre o satélite e o observador é de $11,23^\circ$, e o ângulo de elevação mede $-57,26^\circ$ (o satélite não é visível).

Já nos resultados aba *Att* da simulação, no lado direito da imagem, vê-se que a simulação calculou um ângulo de azimute de $11,226519^\circ$ e um ângulo de elevação de $-57,266273^\circ$ entre o satélite AlfaCruz e o observador nas coordenadas de Brasília, bem próximas às coordenadas do observador simulado no *site*, como foi dito no começo desta subseção.

Realizou-se mais uma comparação entre os dados calculados pelos dois programas, dessa vez comparando-se a distância entre o satélite e o observador nos dois resultados. Para isso, analisou-se a aba *Vel*, conforme ilustrado abaixo:

Figura 45 Comparação entre os resultados da simulação e os gerados pelo site OrbTrack, com foco na aba Vel



Fonte: montagem elaborada pelo autor (2023)

Na figura acima, verifica-se, segundo os dados do *site OrbTrack*, que, no instante simulado, a distância entre o satélite e o observador é de 11304,2 km. Já na simulação do *GNU Radio*, a distância calculada foi de 11305,965820 km. Portanto, os dois valores estão próximos.

Também é possível ver a velocidade do satélite nos dados do *site*, que é igual a 7,6423 km/s, mas essa velocidade não é em relação a um observador, e sim a velocidade orbital do satélite, por isso não é possível compará-la com a velocidade calculada na simulação do *GNU Radio*.

3.2.4 Efeito da variação de parâmetros do enlace nos resultados

Com as comparações realizadas nas subseções anteriores, fica nítido que a simulação deste trabalho gera resultados físicos (posição do satélite, distância entre satélite e observador e ângulos) próximos aos de simulações criadas por outros autores e disponibilizadas na Internet. Porém, isso não confirma que ambos os resultados estão corretos.

O intuito desta subseção é realizar várias simulações do enlace de subida entre uma estação terrena fixa nas coordenadas padrão da simulação (latitude de $-15,8^\circ$, longitude de $-47,9^\circ$ e altitude de 1000 m) e variar alguns parâmetros do enlace, verificando os efeitos dessas variações nos cálculos de atenuações e, por fim, no cálculo da relação sinal-ruído do enlace. Para isso, diminuiu-se a frequência do *Function Probe* do sistema de sinal de relógio para 0,0001 Hz, efetivamente diminuindo a frequência desse sinal de relógio, fazendo com que os resultados demorassem 10000 segundos (quase 3 horas) para serem alterados.

Para avaliar esses efeitos, a simulação foi executada às 04:30 do dia 26/07/23. Alterou-se o tempo de simulação para 360 minutos depois, ou seja, 10:30, o que gerou um ângulo de elevação de $20,583511^\circ$, permitindo a quantificação das degradações. Os parâmetros que não aparecem na tabela foram deixados no valor padrão. A partir dos dados calculados, a tabela abaixo foi elaborada:

| Tabela 7 Comparação de resultados ao se variarem alguns parâmetros (continua) | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------|-------------|-------------|
| Nº do caso | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
| Frequência do enlace (f, GHz) | 0,437 | 4,000 | 20,000 | 0,437 | 20,000 | 20,000 | 20,000 | 20,000 | 0,100 |
| Indisponibilidade (p, %) | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,100 |
| Figura de mérito do satélite (Gr/T, dB/K) | - 25,000 | - 25,000 | - 25,000 | - 25,000 | - 25,000 | 6,000 | -3,000 | - 25,000 | - 25,000 |
| Diâmetro da antena transmissora (D, m) | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,700 | 1,700 | 1,000 |
| Potência da antena transmissora (Pt, W) | 10,000 | 10,000 | 10,000 | 10,000 | 10,000 | 10,000 | 10,000 | 50,000 | 10,000 |
| Atenuação troposférica total (At, dB) | 0,002 | 0,621 | 25,229 | 0,016 | 56,545 | 56,545 | 56,542 | 56,542 | 0,006 |
| Rotação de Faraday (θf, rad) | 1,265 | 0,015 | 0,001 | 1,265 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 24,158 |

| Tabela 7 Comparação de resultados ao se variarem alguns parâmetros (conclusão) | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Perda no espaço livre (Lfs, dB) | 146,01 4 | 165,24 5 | 179,22 5 | 146,01 4 | 179,22 5 | 179,22 5 | 179,22 5 | 179,22 5 | 133,20 4 |
| Relação sinal-ruído do enlace(C/N, dB) | 36,023 | 35,404 | 10,796 | 36,009 | - 20,520 | 10,480 | 6,093 | -8,918 | 36,025 |

Na tabela 7, logo acima, é possível verificar os efeitos das alterações dos parâmetros de frequência do enlace, indisponibilidade, figura de mérito do satélite, diâmetro da antena transmissora e potência dessa antena na atenuação troposférica total, na rotação de Faraday, na perda no espaço livre e na relação sinal-ruído.

No caso I, têm-se os resultados do enlace com os parâmetros padrão do AlfaCruz. No caso II, subiu-se a frequência do enlace em relação ao caso I, gerando um grande aumento relativo nas atenuações troposféricas e na perda no espaço livre, porém diminuindo a rotação de Faraday. Mas, em compensação, o ganho da antena transmissora aumentou, de acordo com a equação 16. Por isso, a relação sinal-ruído não decaiu tanto.

Já no caso III, aumentou-se a frequência em relação ao caso II, tornando-se ainda maior do que a do caso I. Com isso, as atenuações troposféricas aumentaram de forma exagerada, a rotação de Faraday decaiu bastante, e a perda por espaço livre também aumentou. A relação sinal-ruído decaiu bastante nesse caso em relação aos anteriores.

No caso IV, voltaram-se aos parâmetros do caso I, com exceção da indisponibilidade, que diminuiu. Isso fez com que as atenuações troposféricas aumentassem bastante em relação às do caso I, mas, por a frequência do enlace ser muito baixa, essa diferença não foi grande no balanço de potência. Portanto, a relação sinal-ruído desse caso foi bem próxima à do caso I.

O caso V tem os mesmos parâmetros do caso IV, exceto pela frequência, que foi aumentada ao valor máximo permitido na simulação (20 GHz). Isso fez com que as degradações troposféricas aumentassem de maneira muito exagerada, além da perda por percurso também ter aumentado, levando a uma degradação imensa da relação sinal-ruído.

Já no caso VI, pegaram-se os mesmos parâmetros do caso V, mas, para compensar um pouco o aumento das perdas, alterou-se a figura de mérito do satélite para uma figura de mérito compatível com enlaces nessa frequência de operação. O valor escolhido foi de 6 dB/K, que é o valor da figura de mérito dos transponders em banda K_u do satélite Star One C3 (EMBRATEL, 2023), pois a banda K_u é em torno dessa faixa de frequência. Esse aumento na figura de mérito aumentou bastante a relação sinal-ruído, como esperado.

No caso VII, utilizaram-se os parâmetros do caso VI, porém a figura de mérito foi um pouco reduzida para um meio-termo (-3 dB/K), e o diâmetro da antena transmissora foi um pouco aumentado, aumentando o ganho dessa antena. Isso fez com que a relação sinal-ruído subisse em relação ao caso V, mas ela não chegou ao nível daquela calculada no caso VI.

O caso VIII utiliza ainda parâmetros similares aos do caso V, porém com um aumento tanto no diâmetro da antena transmissora quanto em sua potência, elevando consideravelmente a relação sinal-ruído em comparação à do caso V, porém ela ainda ficou menor do que nos casos VI e VII.

Por fim, no caso IX, utilizaram-se os mesmos parâmetros do caso I, exceto pela frequência, que foi diminuída até o mínimo valor permitido pela simulação (100 MHz). Com isso, as atenuações troposféricas e a perda por caminho no espaço livre decaíram bastante, então a relação sinal-ruído aumentou, mas a rotação de Faraday também aumentou bastante, chegando a 24,158 radianos. Isso seria um problema que precisaria ser tratado em um enlace real.

A partir dessas comparações, é possível perceber que as implementações dos principais parâmetros do enlace estão de acordo com as equações apresentadas nas seções anteriores deste trabalho.

3.2.5 Um resultado com parâmetros aplicados a um enlace com o satélite AlfaCruX

Neste último resultado, fez-se uma análise do balanço de potência de um enlace de subida entre uma estação terrena localizada em Brasília e o satélite AlfaCruX. Os resultados foram gerados às 23:56 do dia 27/07/23.

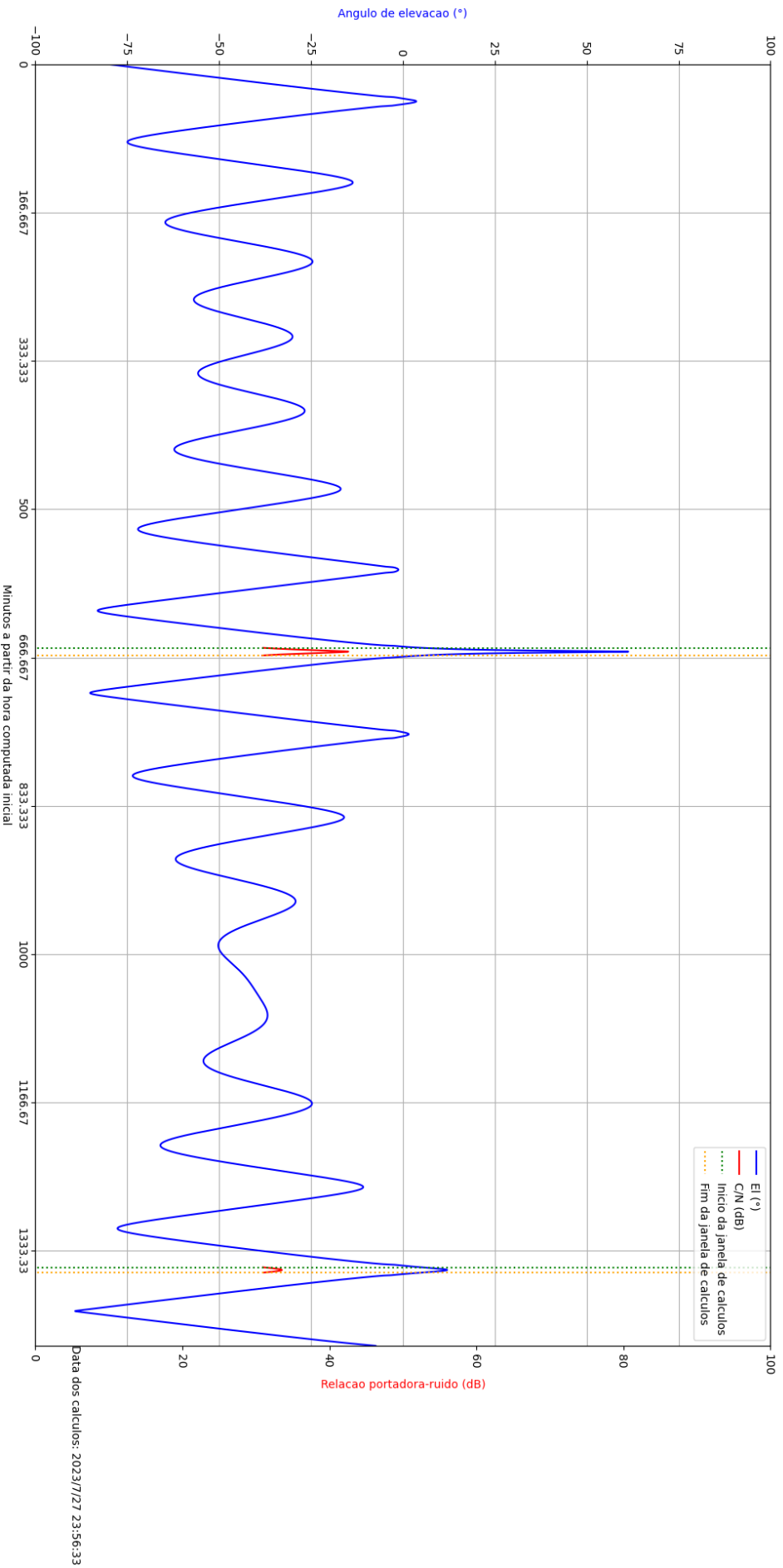
Baseou-se no relatório de desempenho do AlfaCruX gerado no dia 13/08/21¹⁶ e no relatório de descrição e resultados iniciais do AlfaCruX (BORGES et al., 2022). Portanto, a frequência do enlace utilizada foi de 437 MHz, a potência de transmissão foi de 10 W, o diâmetro da antena transmissora foi de 1 m, a eficiência de radiação dessa mesma antena foi de 50 %, a figura de mérito do satélite foi definida como -25 dB/K, a banda do sinal transmitido foi de 15 kHz e a taxa de excedência das atenuações troposféricas foi definida como 0,1 %. Além disso, a estação terrena teve sua latitude definida como -15,8 °, a longitude como -47,9 ° e a altitude como 1000 m.

Os valores de diâmetro da antena transmissora e eficiência de radiação dessa mesma antena foram definidos de tal modo que a EIRP de transmissão fosse de aproximadamente 20 dBW, a partir dos cálculos de ganho de uma antena (equação 16) e da definição de EIRP (equação 20), pois esse é o valor de EIRP dado no mesmo relatório de desempenho¹⁶.

As figuras 46, 47 e 48, ilustradas nas páginas subsequentes, mostram os gráficos resultantes da simulação previamente explicada.

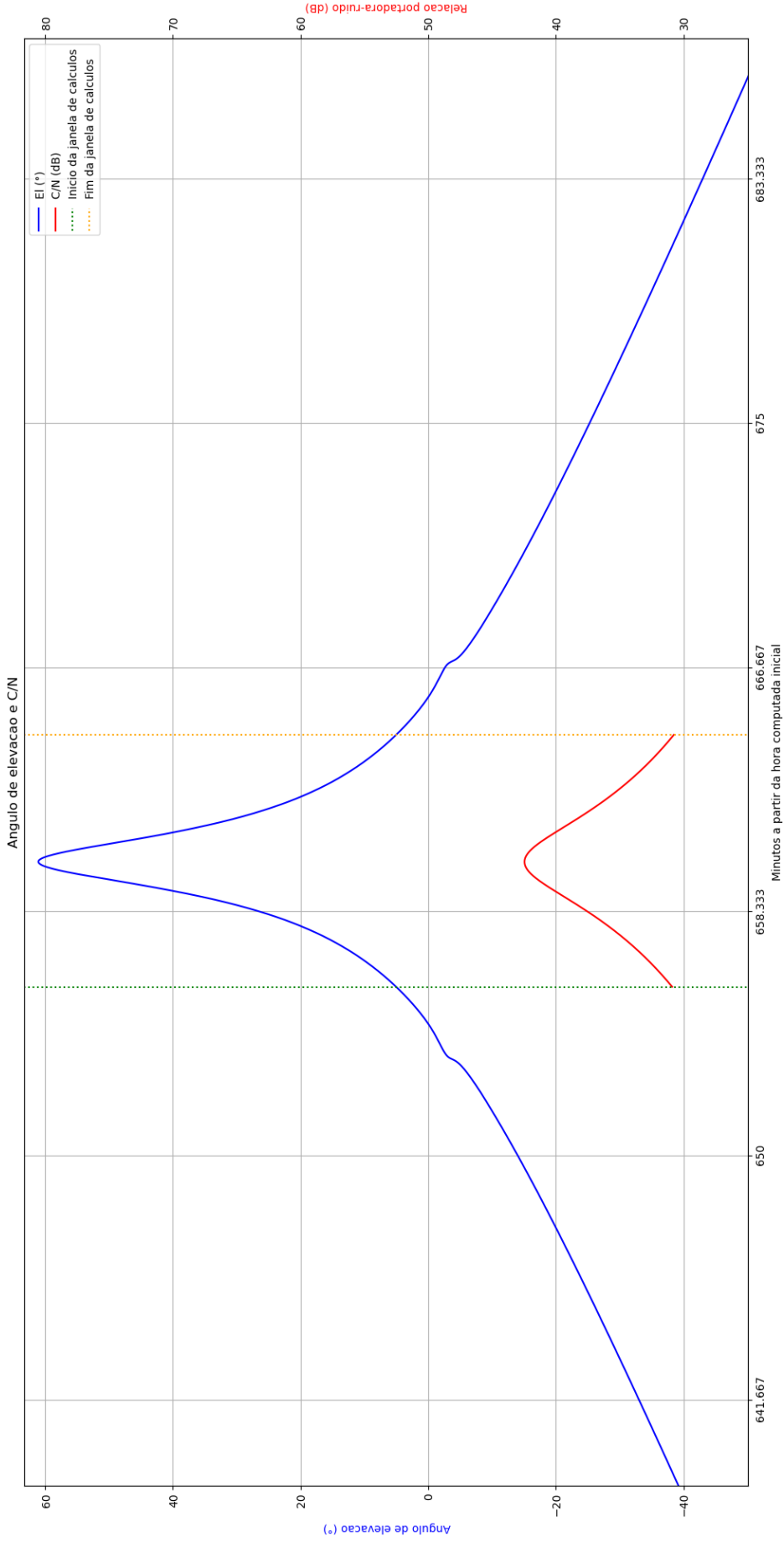
¹⁶ System Performance Summary: AlfaCruX. [S. l.]: [s. n.], 13 aug. 2021.

Figura 46 Resultados da simulação gerados para um enlace com parâmetros similares aos do AlfaCrux



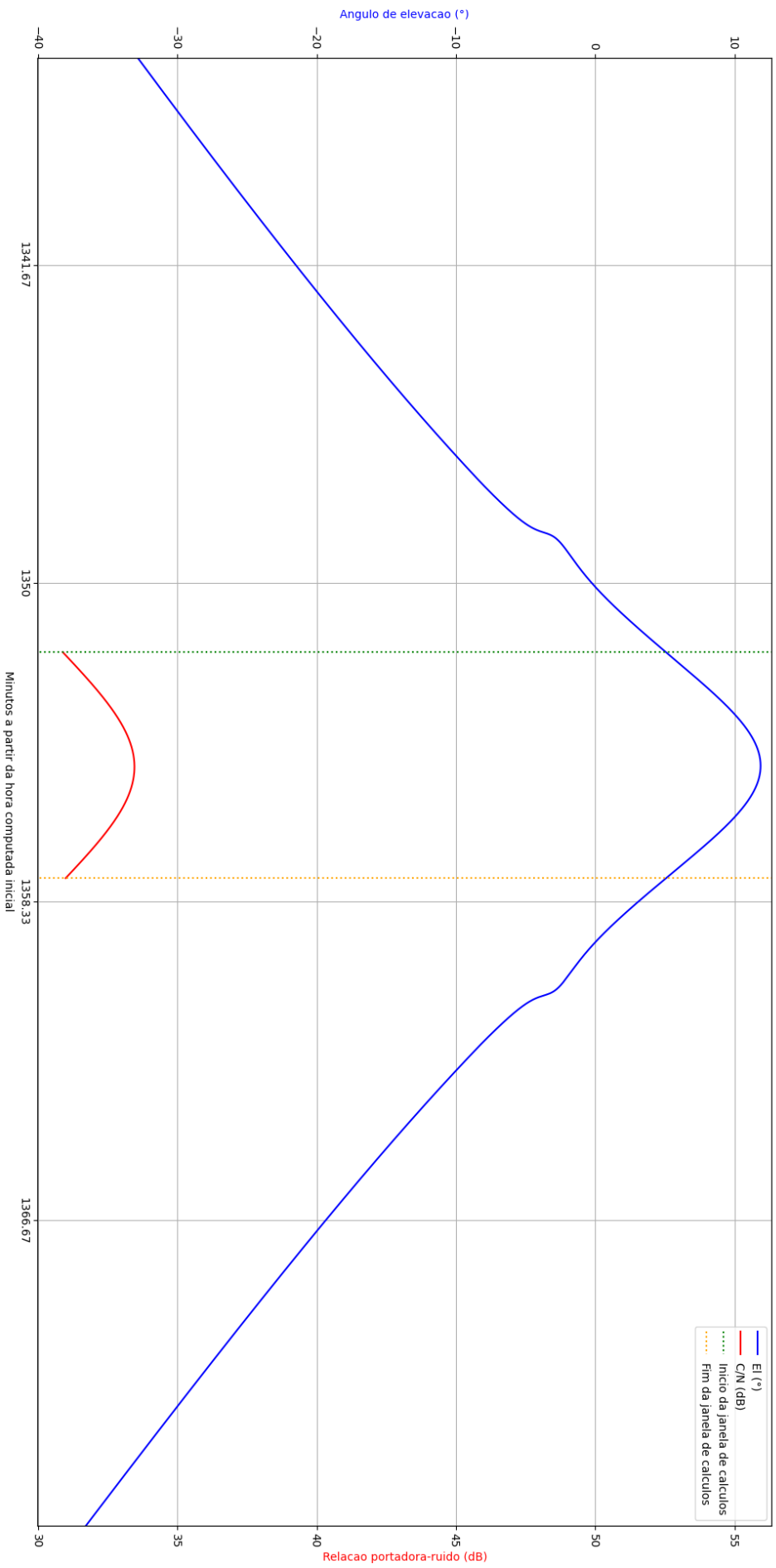
Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Figura 47 Resultados da simulação gerados para um enlace com parâmetros similares aos do AlfaCruz, com foco na primeira janela de cálculos



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Figura 48 Resultados da simulação gerados para um enlace com parâmetros similares aos do AlfaCrux, com foco na segunda janela de cálculos



Fonte: imagem elaborada pelo autor (2023)

Na figura 46, é possível ver que, durante as 24 horas analisadas após 23:56 do dia 27/07/23, há dois momentos em que a simulação realiza os cálculos de balanço de potência, que são as duas janelas de cálculos da simulação, que ocorrem quando o ângulo de elevação entre a estação e o satélite é igual ou superior a 5 °.

Na figura 47, ampliou-se a parte do gráfico que contém a primeira janela de cálculos. Nela, o pico de elevação foi de um pouco mais de 60 °, e a relação sinal-ruído C/N variou de cerca de 32 dB até aproximadamente 43 dB.

Já na figura 48, houve uma ampliação da seção do gráfico relacionada à segunda janela de cálculos. Nessa figura, é possível ver um pico de elevação de pouco mais de 10 °, e uma relação sinal ruído variando entre aproximadamente 31 dB e aproximadamente 33 dB.

De acordo com o relatório de desempenho do AlfaCrux¹⁶, a margem de relação sinal-ruído C/N necessária para uma comunicação bem-sucedida entre uma estação terrena e o AlfaCrux, no enlace de subida, é de 20,1 dB. Dessa forma, com todas as considerações da simulação deste trabalho e com os parâmetros selecionados, é possível concluir que, em ambas as janelas de cálculos da figura 46, é possível haver comunicação entre a estação terrena e o AlfaCrux.

4 Conclusões

Após a criação da simulação e a análise dos resultados apresentada na seção 3.2, verificou-se que os objetivos propostos foram cumpridos.

A simulação criada no ambiente *GNU Radio* permite a avaliação de efeitos de degradação sobre a onda transmitida e, conseqüentemente, sobre a qualidade do enlace, sejam esses efeitos de natureza atmosférica ou não. Tanto atenuações troposféricas, quanto degradações ionosféricas e efeitos físicos que não estão relacionados com a atmosfera, como o efeito Doppler e a perda por propagação no espaço livre, foram quantificadas a fim de avaliar o enlace de comunicações simulado.

Utilizaram-se parâmetros do satélite AlfaCruz, que foi desenvolvido por membros do laboratório LODESTAR da Universidade de Brasília, para verificar a ação desses efeitos sobre enlaces entre um satélite de órbita baixa e uma estação terrena. Esse tipo de enlace se torna cada vez mais comum, uma vez que há inúmeras aplicações que se beneficiam de enlaces assim e também porque cada vez mais se torna menos custoso o lançamento de satélites ao espaço, com o advento de novas tecnologias.

Uma das partes principais deste trabalho, além do desenvolvimento de uma simulação, foi o aprendizado sobre comunicações via satélite de modo geral. Essa etapa também foi cumprida com sucesso.

Nem tudo que era esperado conseguiu ser realizado, ficando como expectativas futuras. Dentre essas expectativas, é possível citar a elaboração de mais gráficos para os resultados, a possibilidade de se utilizarem os elementos TLE de outros satélites na simulação, a consideração de mais degradações atmosféricas na análise, o balanço de potência do enlace de descida e total, bem como o polimento da interface do *GNU Radio* para que o ambiente de simulação possa ficar mais amigável aos usuários, ou até mesmo o desenvolvimento de uma interface própria para essa simulação.

Referências

SERRANO, Manuel Martín. A comunicação na existência da humanidade e de suas sociedades: Communication in the existence of humanity and its societies.

MATRIZES, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 11-20, ago./dez. 2009. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/matrizes/article/view/38238/41019>. Acesso em: 03 jul. 2023.

Q&A with Stéphane Israël, chairman and CEO of Arianespace. In: SPACEFLIGHT NOW. [Cape Canaveral, FL], 16 dec. 2015. Disponível em: <https://spaceflightnow.com/2015/12/16/qa-with-stephane-israel-chairman-and-ceo-of-arianespace/>. Acesso em: 03 jul. 2023.

UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. **Large Constellations of Satellites**: Mitigating Environmental and Other Effects. [Estados Unidos], 2020. Disponível em: <https://www.gao.gov/assets/gao-22-105166.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2023.

BARBEDO, Jayme Garcia Arnal. **Estado da Arte da Classificação Automática de Áreas Agrícolas Usando Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1ª edição. Campinas – São Paulo, nov. 2018. Documento 157, Embrapa. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/187606/1/Documento157-Jayme.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2023.

IPPOLITO JR., Louis J. **Satellite Communications Systems Engineering**: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance. Second edition. Washington, D. C., Estados Unidos: Wiley, 2017.

Space briefing book: Satellites. In: SPACE FOUNDATION. [S. I.]: The Space Foundation, [20--?]. Disponível em: https://www.spacefoundation.org/space_brief/satellite-components/. Acesso em: 06 jul. 2023.

Regionally harmonized bands. In: ITU. [Genebra]: International Telecommunication Union, [20--?a]. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-R/information/Pages/emergency-bands.aspx>. Acesso em: 06 jul. 2023.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R V.431-8**: Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. Genebra: ITU, aug. 2015. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-I!!PDF-E.pdf. Acesso em: 06 jul. 2023.

Frequency Bands allocated to Terrestrial Broadcasting Services. In: ITU. [Genebra]: International Telecommunication Union, [20--?b]. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/broadcast/Pages/Bands.aspx>. Acesso em: 06 jul. 2023.

Elementos orbitais. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. [San Francisco, CA: Wikimedia Foundation], 2021. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Elementos_orbitais. Acesso em: 06 jul. 2023.

Types of orbits. In: ESA. [Paris]: The European Space Agency, 30 mar. 2020. Disponível em: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits. Acesso em: 06 jul. 2023.

VALLADO, David A.; CRAWFORD, Paul; HUJSAK, Richard; KELSO, T. S. **Revisiting Spacetrack Report #3: Rev 2**. [Estados Unidos]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. Disponível em: <http://celestrak.org/publications/AIAA/2006-6753/AIAA-2006-6753-Rev2.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Definition of Two-line Element Set Coordinate System**. In: Wayback Machine, Internet Archive. [Washington, D. C.]: NASA, 29 sept. 1999. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20000301052035/http://spaceflight.nasa.gov/realdata/sig>

<https://celestak.org/NORAD/documentation/tle-def.html>. Acesso em: 10 jul. 2023.

NORAD Two-Line Element Set Format. In: CelesTrak. [S. l.]: CelesTrak, 01 July 2022. Disponível em: <https://celestak.org/NORAD/documentation/tle-fmt.php>. Acesso em: 10 jul. 2023.

SZÜCS-CSILLIK, Iharka; POPUȚA, Dorina. THE ASTRO-BIBLIO-STUDENTS PROGRAM. **Didactica Mathematica**, Universitatea Babeș-Bolyai, Romênia, v. 33, p. 101-111, 2015. Disponível em: <http://www.math.ubbcluj.ro/~didactica/pdfs/2015/didmath2015-10.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

KUROSE, James F.; ROSS, Keith W. **Computer networking**: a top-down approach. Seventh edition. Hoboken, New Jersey: Pearson, 2017.

MARAL, Gérard; BOUSQUET, Michel. **SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEMS**: Systems, Techniques and Technology. Fifth edition. Toulouse, França: Wiley, 2009.

DIFFIE, Whitfield; HELLMAN, Martin E. New Directions in Cryptography. **IEEE Transactions on Information Theory**, [Estados Unidos], v. IT-22, n. 6, p. 644-654, 06 nov. 1976.

PRATT, Timothy; ALLNUTT, Jeremy. **Satellite Communications**. Third edition. Estados Unidos: Wiley, 2020.

Star One C3. In: EMBRATEL. [Rio de Janeiro, RJ: Claro S/A], 2023. Disponível em: <https://www.embratel.com.br/satelites/nossa-frota/star-one-c3>. Acesso em: 20 jul. 2023.

CAVALCANTE, Hugo Rafael Gonçalves. **Aquisição de frequência em sinais de satélites de baixa órbita por meio do critério da máxima correntropia**. 16 fev. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/25102>. Acesso em: 21 jul. 2023.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.618-13**: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Genebra: ITU, dec. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618-13-201712-I/en>. Acesso em: 21 jul. 2023.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.676-13**: Attenuation by atmospheric gases and related effects. Genebra: ITU, aug. 2022. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-13-202208-I/en>. Acesso em: 22 jul. 2023.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.840-8**: Attenuation due to clouds and fog. Genebra: ITU, aug. 2019a. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.840-8-201908-I/en>. Acesso em: 22 jul. 2023.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Recommendation ITU-R P.531-14**: Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite networks and systems. Genebra: ITU, aug. 2019b. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.531-14-201908-I/en>. Acesso em: 22 jul. 2023.

Requests: HTTP for Humans™. In: Read the Docs. [Estados Unidos]: Read the Docs, [20--]. Disponível em: <https://requests.readthedocs.io/en/latest/>. Acesso em: 24 jul. 2023.

PyEphem Quick Reference. In: Rhodesmill. [S. l.]: Brandon Rhoades, 2020. Disponível em: <https://rhodesmill.org/pyephem/quick.html>. Acesso em: 24 jul. 2023.

ITU-Rpy documentation. In: Read the Docs. [Estados Unidos]: Read the Docs, 2023. Disponível em: <https://itu-rpy.readthedocs.io/en/latest/>. Acesso em: 24 jul. 2023.

Documentation. In: GNU Radio. [Estados Unidos]: GNU Radio Project, 2023. Disponível em: <https://www.gnuradio.org/docs/>. Acesso em: 24 jul. 2023.

API Reference. In: Matplotlib. [S. l.]: Matplotlib development team, 2023. Disponível em: <https://matplotlib.org/stable/api/index>. Acesso em: 24 jul. 2023.

BORGES, Renato Alves et al. The AlfaCruz CubeSat Mission Description and Early Results. **Applied Sciences**, [S. l.], v. 12, n. 19, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/19/9764>. Acesso em: 25 jul. 2023.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 521-2002**: IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands. New York, NY, Estados Unidos: IEEE, 8 jan. 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 145-2013**: IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas. New York, NY, Estados Unidos: IEEE, 11 dec. 2013.