

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS  
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES  
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO



***INTERNET VIA SATÉLITE: UM ESTUDO SOBRE A STARLINK COM  
SIMULAÇÃO DE CONSTELAÇÕES DE SATÉLITES WALKER DELTA E  
WALKER STAR***

EDUARDO PIMENTA XAVIER RODRIGUES VAZ

Goiânia

2024

EDUARDO PIMENTA XAVIER RODRIGUES VAZ

***INTERNET* VIA SATÉLITE: UM ESTUDO SOBRE A STARLINK COM  
SIMULAÇÃO DE CONSTELAÇÕES DE SATÉLITES WALKER DELTA E  
WALKER STAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola Politécnica e de Artes, da Pontifícia  
Universidade Católica de Goiás, como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de Bacharel  
em Ciência da Computação.

Orientador(a): Prof(a). Ma. Angélica da Silva Nunes.

Goiânia

2024

EDUARDO PIMENTA XAVIER RODRIGUES VAZ

***INTERNET VIA SATÉLITE: UM ESTUDO SOBRE A STARLINK COM  
SIMULAÇÃO DE CONSTELAÇÕES DE SATÉLITES WALKER DELTA E  
WALKER STAR***

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em sua forma final pela Escola Politécnica e de Artes, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação, em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

---

Orientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Ma. Angélica da Silva Nunes

---

Prof. Dr. Leonardo Guerra de Rezende Guedes

---

Prof. Me Wilmar Oliveira de Queiroz

GOIÂNIA

2024

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Deus e à minha família, por terem possibilitado que eu alcançasse este momento em minha vida.

Agradeço a Deus por Suas bênçãos e orientação, que me permitiram superar os desafios do período acadêmico, sempre rodeado por pessoas boas que me apoiaram nesta etapa.

Agradeço à minha família pelo constante apoio em minhas escolhas e pela ajuda incondicional ao longo de minha trajetória. Dedico especialmente ao meu pai, Neio, à minha mãe, Raquel, e à minha irmã, Anna, que estiveram ao meu lado em todas as dificuldades enfrentadas durante a vida acadêmica.

Expresso ainda minha gratidão especial à minha avó, Selma, por sempre me lembrar da importância dos estudos e por seu incentivo constante ao meu desenvolvimento.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, Raquel, ao meu pai, Neio, e à minha irmã, Anna, que sempre cuidaram de mim e me auxiliaram em todas as questões ao longo da minha jornada acadêmica.

À professora Ma. Angélica da Silva Nunes, expresse minha profunda gratidão pela orientação, apoio, contribuições e paciência durante a elaboração deste trabalho. Sem sua valiosa ajuda, a escrita e a concretização deste projeto não teriam sido possíveis.

Aos meus amigos Lucca Lupo e Augusto Lepsqueur que, mesmo à distância, mantiveram o contato e me ajudaram a preservar o equilíbrio emocional durante essa jornada.

Aos colegas de curso Nael Barreto, Vinícius Ferreira de Souza, Marco Aurélio e Leonardo Giovanni, que tornaram a jornada e as atividades acadêmicas mais leves e produtivas com seu companheirismo e dedicação.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, participaram e colaboraram para o sucesso desta trajetória.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar e compreender as tecnologias empregadas no acesso à *Internet* via satélite de baixa órbita, com foco na constelação *Walker Delta* utilizada pela Starlink. A pesquisa explora aspectos técnicos da transmissão de dados por satélites, incluindo topologias de rede, antenas auto direcionáveis, modulações de sinal e algoritmos de roteamento. Foram realizadas simulações computacionais utilizando o *software* Matlab e a *toolbox* Aerospace, que permitiram a análise de cenários de comunicação via satélite e a comparação de constelações com diferentes parâmetros, incluindo o roteamento dos pacotes entre os satélites. Os resultados destacam a eficiência da constelação Walker Delta em oferecer cobertura global, colocando a Starlink como uma alternativa viável às redes terrestres de fibra óptica, especialmente em áreas remotas. O estudo também inclui uma avaliação crítica dos resultados obtidos, comparando-os com outros trabalhos na área, além de discutir as limitações das simulações realizadas e propor melhorias que podem ser implementadas em pesquisas futuras.

**Palavras-Chave:** Starlink. Constelação Walker Delta. LEO. Roteamento ISL. Comunicação via satélite

## **ABSTRACT**

This work aims to study and understand the technologies employed in low satellite-based Internet access, focusing on the Walker Delta constellation used by Starlink. The research explores technical aspects of data transmission using satellites, including network topologies, self-steering antennas, signal modulations, and routing algorithms. Computational simulations were performed using Matlab software and the Aerospace toolbox, enabling the analysis of satellite communication scenarios and the comparison of constellations with different parameters, including packet routing between satellites. The results highlight the efficiency of the Walker Delta constellation in providing global coverage, positioning Starlink as a viable alternative to terrestrial fiber-optic networks, especially in remote areas. The study also includes a critical evaluation of the results obtained, comparing them with other works in the field, as well as discussing the limitations of the simulations conducted and proposing improvements for future research.

**Keywords:** Starlink. Walker Delta constellation. LEO. ISL Routing. Satellite Communication

## LISTA DE FIGURAS E ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Contagem de <i>roundtrips</i> entre um satélite Starlink e um satélite GEO.....                            | 15 |
| Figura 2: Tipos de Orbita .....  | 20 |
| Figura 3: Retransmissão do sinal de satélite no espaço (ISL) e no solo.....  | 23 |
| Figura 4: Satélite de transmissão GEO.....   | 24 |
| Figura 5: Satélites MEO do sistema GPS.....  | 25 |
| Figura 6: Antena Starlink se comunicando com satélite em órbita.....   | 26 |
| Figura 7: Constelação de satélites Starlink.....   | 28 |
| Figura 8: Laser espacial óptico usado para comunicação ISL na Starlink.....  | 29 |
| Figura 9: Antena Starlink do padrão autodirecionável.....  | 30 |
| Figura 10: Antena da Starlink rastreando o deslocamento do satélite em sua linha de visada                           | 30 |
| Figura 11: <i>Microchips</i> maiores.....  | 31 |
| Figura 12: <i>Microchips</i> menores.....  | 31 |
| Figura 13: CPU e modulo de GPS.....  | 32 |
| Figura 14: Estrutura de uma antena da Starlink .....   | 32 |
| Figura 15: Formação do <i>Beam front</i> com 6 antenas.....  | 33 |
| Figura 16: O QPSK e sua implementação.....   | 35 |
| Figura 17: Gráfico de barras mostrando a escalabilidade dos algoritmos com o aumento do tamanho da constelação ..... | 37 |
| Figura 18: Arquitetura do SNS3.....  | 39 |
| Figura 19: Erro de instalação do SNS3 na versão do NS3 3.37 .....  | 40 |
| Figura 20: Erro de instalação do SNS3 no NS3 3.42 .....  | 40 |
| Figura 21: Postagem do problema.....   | 41 |
| Figura 22: Reposta de um dos autores.....  | 41 |
| Figura 23: Reposta de um dos autores continuação .....   | 42 |
| Figura 24: Interface do <i>software</i> Savi.....  | 43 |
| Figura 25: Exemplo <i>Walker Star</i> e <i>Walker Delta</i> .....  | 45 |
| Figura 26: Teste A1 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 2 constelações .....                                      | 57 |
| Figura 27: Teste A2 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 2 constelações .....                                      | 57 |
| Figura 28: Teste A3 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 5 constelações .....                                      | 58 |
| Figura 29: Teste A4 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 5 constelações .....                                      | 58 |
| Figura 30: Teste A5 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 10 constelações .....                                     | 59 |
| Figura 31: Teste A6 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 20 constelações .....                                     | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 32: Teste A7 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 20 constelações .....          | 60 |
| Figura 33: Teste A8 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 50 constelações .....          | 60 |
| Figura 34: Teste A9 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 50 constelações .....          | 61 |
| Figura 35: Teste A10 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 75 constelações .....         | 61 |
| Figura 36: Teste A11 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 100 constelações .....        | 62 |
| Figura 37: Teste A12 - Constelações <i>Walker Delta</i> com 10 constelações .....         | 62 |
| Figura 38: Teste A13– Constelações <i>Walker Delta</i> com 25 constelações .....          | 63 |
| Figura 39: Teste A14– Constelações <i>Walker Delta</i> com 50 constelações .....          | 63 |
| Figura 40: Teste A15 – Constelações <i>Walker Delta</i> com 75 constelações .....         | 64 |
| Figura 41: Teste A16– Constelações <i>Walker Delta</i> com 100 constelações .....         | 64 |
| Figura 42: Teste A17– Constelações <i>Walker Delta</i> com 200 constelações .....         | 65 |
| Figura 43: Constelações <i>Walker Delta</i> .....   | 66 |
| Figura 44: <i>Walker Star</i> com inclinação de 90° .....                                 | 66 |
| Figura 45: <i>Walker Star</i> com Inclinação de 53.2° .....                               | 67 |
| Figura 46: Simulação Quadro 4.....  | 69 |
| Figura 47: Rota ISL leste-oeste no hemisfério Norte .....                                 | 71 |
| Figura 48: Rota ISL leste-oeste no hemisfério Sul.....                                    | 72 |
| Figura 49: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B1 ..... | 73 |
| Figura 50: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B2 ..... | 74 |
| Figura 51: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B3 ..... | 74 |
| Figura 52: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B4 ..... | 75 |
| Figura 53: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B5 ..... | 75 |
| Figura 54: Rota ISL entre nós na linha do Equador – Constelação B1 .....                  | 77 |
| Figura 55: Rota ISL entre nós na linha do Equador – Constelação B2 .....                  | 77 |
| Figura 56: Rota ISL entre nós na linha do Equador – Constelação B3 .....                  | 78 |
| Figura 57: Rota ISL norte-sul-leste-oeste – constelação B1 .....                          | 79 |
| Figura 58: Rota ISL norte-sul-leste-oeste – constelação B2 .....                          | 80 |
| Figura 59: Rota ISL norte-sul-leste-oeste – constelação B3 .....                          | 80 |
| Figura 60: Roteamento entre satélites com DiscoRoute.....                                 | 82 |
| Figura 61: Código Do Teste Dos Parâmetros .....   | 89 |
| Figura 62: Código da Simulação Starlink.....  | 90 |
| Figura 63: Código dos Teste De Roteamento Parte 1 .....                                   | 91 |
| Figura 64: Código dos Teste De Roteamento Parte 2 .....                                   | 91 |
| Figura 65: Código dos Teste de Roteamento Parte 3 .....                                   | 92 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 66: Código Dos Teste De Roteamento Parte 4..... | 92 |
| Figura 67: Código Dos Teste De Roteamento Parte 5..... | 93 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1: Principais bandas de satélite .....                                  | 20 |
| Quadro 2: Comparação orbital para aplicações de comunicações por satélite..... | 22 |
| Quadro 3: Parâmetros dos testes realizados .....                               | 56 |
| Quadro 4: Parâmetros de simulação das constelações do Starlink .....           | 69 |
| Quadro 5: Resultados dos testes de roteamento ISL no sentido leste-oeste.....  | 72 |
| Quadro 6: Resultados dos testes de roteamento ISL norte-sul .....              | 76 |
| Quadro 7: Resultados dos testes de roteamento ISL na linha do Equador .....    | 79 |
| Quadro 8: Comparação dos resultados roteamento de norte-sul leste-oeste .....  | 81 |
| Quadro 9: Constelações de satélites com menor rota .....                       | 81 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |  |
|-------|--|
| A2A   | <i>Ascending to Ascending</i> , Ascendentes com Ascendente   |
| A2D   | <i>Ascending to Descending</i> , Ascendente com Descendente  |
| ACM   | <i>Adaptive Coding and Modulation</i> , Codificação e Modulação Adaptativa   |
| ARQ   | <i>Automatic Repeat reQuest</i> , mecanismo de reenvio automático  |
| ASK   | <i>Amplitude Shift-Keying</i> , Modulação por Deslocamento de Amplitude  |
| CNES  | French Space Agency, Agência Espacial Francesa   |
| CPU   | <i>Central Processing Units</i> , Unidade Central de Processamento   |
| CRDSA | <i>Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA</i> , ALOHA com Diversidade e Resolução de Contenção por Intervalos |
| D2A   | <i>Descending to Ascending</i> , Descendente com Ascendente  |
| D2D   | <i>Descending to Descending</i> , Descendente com Descendentes   |
| DAG   | <i>Directed Acyclic Graph</i> , Grafos Acíclicos Direcionados  |
| DAMA  | <i>Demand Assignment Multiple Access</i> , Atribuição de Acesso Múltiplo sob Demanda                                 |
| DSL   | <i>Digital Subscriber Line</i> , Linha Digital de Assinante  |
| GEO   | <i>Geostationary Orbit</i> , Órbita Geoestacionária  |
| GHz   | <i>Gigahertz</i>   |
| GPS   | <i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamento Global  |
| ISLs  | <i>InterSatellite Links</i> , Links Intersatélites   |
| Ka    | <i>K above</i> , k acima   |
| Km    | <i>Kilometers</i> , Quilômetros  |
| Ku    | <i>K under</i> , k abaixo  |
| LEO   | <i>Low-Earth Orbit</i> , Órbita Terrestre Baixa  |
| Mbps  | <i>Megabits per second</i> , Megabits por segundo  |
| MEO   | <i>Medium-Earth Orbit</i> , Órbita Terrestre Média   |
| MHz   | <i>Megahertz</i>   |
| ms    | <i>Milliseconds</i> , Milissegundos  |
| MSS   | <i>Mobile Satellite Service</i> , Serviço de Satélite Móvel  |
| NS3   | <i>Network Simulator 3</i> , Simulador de Rede 3   |

|      |   |
|------|---|
| PSK  | <i>Phase Shift Keying</i> , Modulação de Deslocamento por Fase                |
| QAM  | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulação de Amplitude em Quadratura |
| RTT  | <i>Round Trip Time</i> , Tempo de Ida e de Volta                              |
| SNS3 | <i>Satellite Network Simulator 3</i> , Simulador de Rede de Satélites 3       |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO.....  | 15 |
| 1.1 Justificativa.....   | 16 |
| 1.2 Objetivos.....   | 17 |
| 1.2.1 Objetivo geral .....   | 17 |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....   | 17 |
| 1.3 Procedimentos metodológicos .....  | 17 |
| 1.4 Estrutura da monografia .....  | 18 |
| 2 SATÉLITES DE COMUNICAÇÃO.....  | 19 |
| 2.1 História .....   | 19 |
| 2.2 Conceito de satélite.....  | 19 |
| 2.3 Tipos de Satélites.....  | 21 |
| 2.4 Tipos <i>links</i> de comunicação em satélites .....                                       | 22 |
| 2.5 Usos dos satélites.....  | 23 |
| 3 STARLINK .....   | 27 |
| 3.1 Motivação .....  | 27 |
| 3.2 Introdução ao Starlink .....   | 27 |
| 3.3 Antenas e transmissão .....  | 30 |
| 3.4 Roteamento.....  | 35 |
| 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....  | 38 |
| 4.1 Ambiente de testes.....  | 38 |
| 4.1.1 Hardware .....   | 38 |
| 4.1.2 Software.....  | 38 |
| 4.2 Algumas alternativas de <i>softwares</i> para simulação de constelações de satélites ..... | 38 |
| 4.2.1 Satellite Network Simulator 3 (SNS3) .....   | 39 |
| 4.2.2 MiniSavi .....   | 42 |
| 4.2.3 Matlab.....  | 43 |
| 4.3 Aerospace <i>Toolbox</i> .....   | 44 |
| 4.3.1 Constelações Walker .....  | 44 |
| 4.3.2 Funções da toolbox AeroSpace usadas nas simulações.....                                  | 45 |
| 5 TESTES E RESULTADOS .....  | 55 |
| 5.1 Teste A: Entendimento dos tipos de constelação .....                                       | 55 |
| 5.1.1 Descrição do código .....  | 55 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.1.2 | Variação dos parâmetros .....   | 55 |
| 5.1.3 | Relações com a cobertura global .....                                   | 65 |
| 5.2   | Teste B: Simulação da constelação de satélites da Starlink .....        | 68 |
| 5.2.1 | Descrição do código .....   | 68 |
| 5.2.2 | Simulação com os parâmetros da Starlink.....                            | 68 |
| 5.3   | Teste C: Roteamento ISL com satélites estáticos .....                   | 70 |
| 5.3.1 | Descrição do código .....   | 70 |
| 5.3.2 | Comunicação no sentido leste-oeste.....                                 | 71 |
| 5.3.3 | Comunicação no sentido norte-sul .....                                  | 73 |
| 5.3.4 | Comunicação entre nós na linha do Equador .....                         | 76 |
| 5.3.5 | Comunicação no sentido norte-sul leste-oeste .....                      | 79 |
| 5.4   | Comentário sobre as simulações e limitações .....                       | 81 |
| 5.4.1 | Constelação mais adequada vs. localização das estações terrestres ..... | 81 |
| 5.4.2 | Comparação de resultados com trabalhos semelhantes.....                 | 82 |
| 5.4.3 | Comentário sobre roteamento dinâmico.....                               | 83 |
| 6     | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 84 |
| 6.1   | Limitações .....  | 85 |
| 6.2   | Conclusão .....   | 85 |
| 6.3   | Sugestão de trabalhos futuros .....                                     | 85 |
|       | REFERÊNCIAS .....   | 86 |
|       | APÊNDICE A – CÓDIGO DO TESTE DOS PARÂMETROS .....                       | 89 |
|       | APÊNDICE B – CÓDIGO DA SIMULAÇÃO STARLINK.....                          | 90 |
|       | APÊNDICE C – CÓDIGO DOS TESTE DE ROTEAMENTO .....                       | 91 |

## 1 INTRODUÇÃO

A transmissão de informações por meio de satélites é um feito comparável em importância à fibra óptica na evolução da transmissão de dados. Com a criação do transistor, se tornou possível realizar comunicações entre os satélites e as estações terrestres, pois ele recebe um sinal *uplink* e o retransmite à Terra por meio de um sinal *downlink* (Beard; Stallings, 2016).

Com a tecnologia do transistor foi lançado o satélite Telstar em julho de 1962. O lançamento desse satélite foi o ponto de partida para que os satélites de comunicações se tornassem um negócio de vários bilhões de dólares (Tanenbaum, 2021).

A *Internet* foi o avanço tecnológico que foi adotado mais rapidamente na história e se tornou fundamental nas rotinas das pessoas. Levando isso em conta, um dos principais focos da Starlink é fornecer acesso à *Internet* a pessoas em lugares remotos e áreas rurais. Para atender esse objetivo, a Starlink utiliza a transmissão de dados via satélite (Shaengchart; Kraiwanit, 2023).

A transmissão de dados via satélite da Starlink é feita através do uso de constelações de Satélites *Low-Earth Orbit*, Órbita Terrestre Baixa (LEO). Com essa abordagem, a empresa fornece *Internet* de alta velocidade e baixa latência, o que possibilita o *streaming*, chamadas de vídeos, jogos *on-line*, dentre outros serviços (Starlink, 2024).

Os serviços de transmissão de dados via satélite, em sua maioria, fazem uso de *Geostationary Earth Orbit*, Satélite de Órbita Geoestacionárias (GEO). A grande distância entre esses satélites e o planeta faz com que ocorra um elevado atraso entre o envio e o recebimento de informações, o que os torna inviáveis para serviços que requeiram alta taxa de transferência.

Figura 1: Contagem de *roundtrips* entre um satélite Starlink e um satélite GEO



Fonte: Starlink, 2024.

Os satélites da Starlink estão posicionados em constelações contendo milhares de satélites mais próximos do planeta, quando comparados com os satélites GEO. A Figura 1 compara o *Round Trip Time*, Tempo de Ida e Volta (RTT) do sinal em um satélite da Starlink com um satélite GEO, no qual se observa que, no intervalo de 240,2 ms, há 1 RTT em satélites GEO e 70 RTTs em satélites Starlink (Starlink, 2024).

Para garantir o acesso à *Internet* em todas as regiões do planeta, a Starlink utiliza uma estrutura mista de constelações *Walker*, composta por *Walker Delta* e *Walker Star*. As constelações *Walker Delta* possuem inclinações entre 30° e 60° em relação à linha do Equador, e as *Walker Star* apresentam inclinações de 90°. Essa configuração estratégica, aliada a uma variação de altitude entre 540 km e 570 km, permite otimizar a cobertura global e atender às necessidades de diferentes regiões do planeta (Liang; Chaudhry; Yanikomeroglu, 2021).

Além de garantir a cobertura global, é essencial contar com algoritmos de roteamento eficazes para assegurar a entrega confiável das informações. De acordo com Xiaogang et al. (2016), o roteamento é uma das principais dificuldades na comunicação via satélite. Por essa razão, pesquisas em tecnologias de redes de satélites têm se concentrado no desenvolvimento de protocolos e algoritmos que ofereçam rotas eficientes e confiáveis, atendendo às demandas dos usuários.

## 1.1 Justificativa

Com o desenvolvimento e a expansão das redes de comunicação via satélite, especialmente com a ascensão de empresas como Starlink, há uma necessidade de compreender o funcionamento de aspectos técnicos e operacionais dessas redes. A constelação LEO da Starlink, representa um marco no campo das comunicações por satélite, oferecendo o acesso à *Internet* em áreas remotas e rurais, além de competir diretamente com as infraestruturas de comunicação terrestres, como a *Internet* de fibra óptica. Portanto, esta pesquisa se propõe estudar e compreender o funcionamento das tecnologias empregadas e desafios enfrentados pela Starlink.

Considerando esse cenário, este projeto tem como questão de pesquisa: como a Starlink provê o acesso à *Internet* global com o uso de constelações de satélites Walker Delta e Walker Star?

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é estudar e compreender as tecnologias no acesso à *Internet* por meio das constelações de satélites da Starlink com uso de simulação computacional.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Compreender o funcionamento da topologia de rede da Starlink;
- Analisar o funcionamento das antenas da Starlink;
- Analisar como é feita a transmissão entre a antena e os satélites da Starlink;
- Estudar e compreender possíveis algoritmos de roteamento que podem ser utilizados pelos satélites da Starlink;
- Compreender a comunicação entre os satélites em constelações Walker Delta e Walker Star por meio da simulação computacional.

## 1.3 Procedimentos metodológicos

Esta pesquisa segundo a natureza é um resumo de assunto, o resumo de assunto padronizar áreas do conhecimento, indicando sua evolução histórica, como o resultado da investigação, levando ao entendimento das causas ou explicações do fenômeno observado (Wazlawick, 2014).

Segundo seus objetivos é uma pesquisa exploratória, e muitas das vezes vista como a primeira parte de um processo de pesquisa mais longo. Nela o autor não tem a necessidade de uma hipótese ou objetivo definido. Neste tipo de pesquisa o autor vai examinar um conjunto de fenômenos, com o foco de descobrir um conhecimento que possa ser a base de uma pesquisa mais elaborada (Wazlawick, 2014).

E segundo seus procedimentos técnicos, esta pesquisa é bibliográfica e experimental. Uma pesquisa bibliográfica implica o estudo de artigos, teses livros e outras publicações. A pesquisa bibliográfica é fundamental e previa para qualquer tipo de trabalho científico. A pesquisa experimental é definida pela presença de experimentos que podem ser manipulados pelo pesquisador (Wazlawick, 2014).

## **1.4 Estrutura da monografia**

Este trabalho foi dividido em 6 capítulos.

O capítulo 1 é apresentado a introdução do tema do trabalho, com secções de objetivos gerais e específicos, procedimentos metodológicos.

O capítulo 2 apresenta a história da comunicação via satélite com elementos da criação e as tecnologias e métodos utilizados.

No capítulo 3 descreve os principais métodos utilizados pela Starlink para as transmissões via satélite.

O capítulo 4 apresenta as metodologias e ferramentas utilizadas para a realização das simulações

O capítulo 5 descreve os testes de simulações de constelações de satélites e roteamento realizados neste trabalho.

O capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho, com a importância deste trabalho para o entendimento dos métodos aplicados pela Starlink para possibilitar a comunicação via satélite.

## 2 SATÉLITES DE COMUNICAÇÃO

Este capítulo descreve a história dos satélites de comunicação, assim como o funcionamento da transmissão de informações vis satélites de comunicação e os tipos de satélites que são utilizados para essas transmissões.

### 2.1 História

Antes da invenção dos satélites, na década de 1950 e 1960 estava-se à procura de um novo método para comunicação. Até então, eram feitos testes utilizando balões meteorológicos metalizados para a transmissão do sinal. Na época, a marinha dos Estados Unidos em um de seus testes montou um sistema de comunicação usando a Lua (Tanenbaum, 2021).

O primeiro satélite enviado ao espaço foi lançado pela União Soviética no ano de 1957, o satélite foi nomeado de Sputnik. Após o lançamento do Sputnik os Estados Unidos lançaram ao espaço o Echo o seu primeiro satélite de comunicação no ano de 1960 (Solymar, 1999).

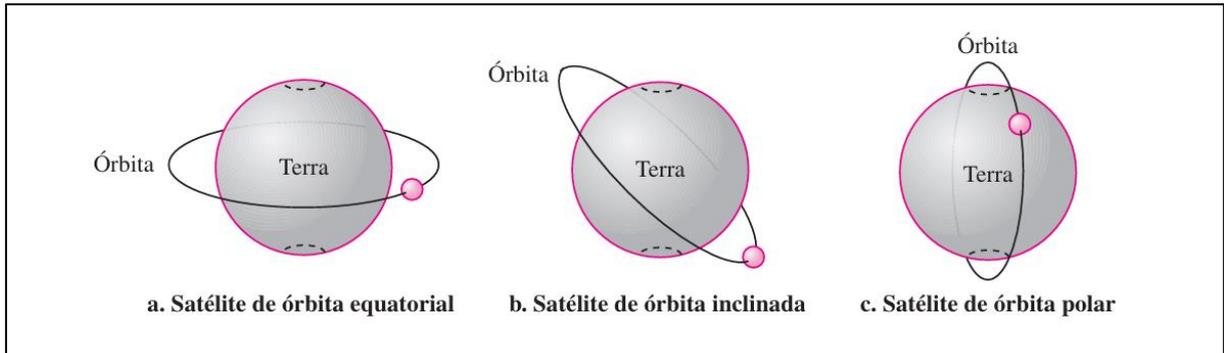
Em julho de 1962 foi lançado o primeiro satélite artificial de comunicação fazendo uso de transistores, esse satélite foi nomeado de Telstar. Esse foi o ponto de partida para a criação de um modelo de negócio espacial lucrativo por meio da comunicação via satélite (Tanenbaum, 2021).

Por mais que a Lua possa ser usada como satélite natural, é preferível a utilização de satélites artificiais. O motivo disso decorre ao fato de que satélites artificiais fazem a transmitem um sinal mais forte, pois os satélites artificiais possuem tecnologias para regenerar o sinal perdido durante a trajetória, além de que a Lua está mais longe da Terra e, com isso, cria maior atraso na comunicação (Forouzan, 2010).

### 2.2 Conceito de satélite

Há 3 tipos de órbitas terrestres usadas pelos satélites. A primeira é a órbita equatorial, que fica logo acima da linha do Equador. A segunda órbita é a órbita polar, que passa por cima de ambos os polos, sul e norte. O terceiro e último tipo de órbita utilizada pelos satélites é a órbita inclinada, que recebe esse nome devido à sua inclinação em relação à linha do Equador, na Figura 2 e mostrado uma ilustração dos 3 tipos de órbitas terrestres (Beard; Stallings, 2016).

Figura 2: Tipos de Órbita



Fonte: Forouzan, 2010.

Os satélites na órbita terrestre se comunicam com o solo através de frequências reservadas para comunicação de micro-ondas, que estão em Gigahertz (GHZ). Os satélites recebem o sinal da Terra em uma frequência diferente daquela que transmitem. O processo de transmissão do sinal da Terra para o satélite é conhecido como *uplink* e a transmissão do sinal do satélite para a Terra é conhecida como *downlink* (Forouzan, 2010).

No Quadro 1 são mostradas as principais frequências utilizadas por satélites e suas respectivas características.

Quadro 1: Principais bandas de satélite

| <b>Banda</b> | <b>Downlink</b> | <b>Uplink</b> | <b>Largura de Banda</b> | <b>Problemas</b>               |
|--------------|-----------------|---------------|-------------------------|--------------------------------|
| L            | 1,5 GHz         | 1,6 GHz       | 15 Megahertz (MHz)      | Baixa largura de banda; lotada |
| S            | 1,9 GHz         | 2,2 GHz       | 70 MHz                  | Baixa largura de banda; lotada |
| C            | 4,0 GHz         | 6,0 GHz       | 500 MHz                 | Interferência terrestre        |
| Ku           | 11 GHz          | 14 GHz        | 500 MHz                 | Chuva                          |
| Ka           | 20 GHz          | 30 GHz        | 3.500 MHz               | Chuva; custo do equipamento    |

Fonte: Tanenbaum, 2021.

A banda de frequência C foi a primeira a ser designada para tráfego de satélites comerciais. Esta banda é composta por duas faixas de frequência essenciais para a comunicação entre a Terra e os satélites: o *uplink* e o *downlink*. Porém essa banda de frequência já está sobrecarregada por ser utilizada para telecomunicação (Tanenbaum, 2021).

As bandas de frequências L e S são bem disputadas entre os diversos serviços que usam frequência de micro-ondas. Um dos serviços que utiliza essas bandas é o *Mobile Satellite*

*Service*, Serviço de Satélite Móvel (MSS). A grande vantagem das duas bandas de frequência mais baixa é que possuem maior refração, assim como maior penetração em objetos físicos que poderiam ser obstáculos para transmissão do sinal (Beard; Stallings, 2016).

A banda K *under* (Ku) é uma das bandas de frequência que ainda não está congestionada, e é disponibilizada para telecomunicação comerciais. Uma das vantagens da banda Ku é que ela apresenta velocidade de transmissão de sinal que pode atingir os 500 Megabits por segundo (Mbps) em suas frequências mais altas (Tanenbaum, 2021).

A banda de frequência K *above* (Ka), assim como a banda Ku, é uma banda de frequência destinada para satélites de comunicação comercial. O que pode não ser um atrativo muito grande para essa banda é o fato de que os equipamentos necessários para utilizar essa banda são caros (Tanenbaum, 2021).

### 2.3 Tipos de Satélites

Os satélites GEO, do ponto de vista da Terra, permanecem fixos em um ponto por estarem na mesma velocidade angular do planeta. Para isso, esses satélites estão a aproximadamente 35.410 Quilômetros (km) de altitude. A grande vantagem dos satélites GEO é que eles ofertam comunicação constante, uma vez que satélites que sejam mais rápidos ou mais lentos que o movimento da Terra apenas seriam úteis por curtos períodos. Contudo, os satélites GEO se mantem no mesmo local o que permite que estejam sempre visíveis, sem necessidade de rastreamento (Forouzan, 2010).

Os satélites de Medium-Earth Orbit, Órbita Terrestre Média (MEO) se encontram em alturas mais baixas do que as apresentadas no GEO e leva cerca de 6 horas para circular o planeta. Os satélites MEO por estarem em uma órbita mais baixa do que os GEO possuem uma área de cobertura menor, porém exige transmissores menos potentes para alcançá-los. Um de seus principais usos é o *Global Positioning System*, Sistema de Posicionamento Global (GPS) (Tanenbaum, 2021).

Os satélites de altitude mais baixa são chamados de *Low-Earth Orbit*, Órbita Terrestre Baixa (LEO). Por estarem mais próximos da Terra, entre 500 km a 1500 km, as estações de transmissão não precisam de muita potência e o atraso de ida e volta do sinal é muito menor, porém para estabelecer um sistema é necessário fazer uma cadeia com vários satélites de baixa órbita por causa de sua alta velocidade. O custo de lançamento de satélites LEO é menor se comparados com satélites MEO e GEO (Tanenbaum, 2021).

Para ser possível a utilização de satélites LEO, é necessário lançar constelações de satélites orbitando o planeta. Os satélites dentro dessas constelações atuam em conjunto como se fossem uma única rede. A comunicação entre satélites LEO próximos pode ser realizada através de *InterSatellite Links*, Links InterSatélites (ISLs) (Forouzan, 2010).

O Quadro 2 sintetiza as principais características dos satélites GEO, MEO e LEO.

Quadro 2: Comparação orbital para aplicações de comunicações por satélite

| <b>Órbitas</b>   | <b>Órbita Terrestre Baixa</b>  | <b>Órbita Terrestre Média</b>      | <b>Órbita Geostacionária</b>                    |
|--|--|------------------------------------|---|
| Período orbital  | 1,5 a 2 horas  | 5 a 10 horas                       | 24 horas  |
| Faixa de Altitude  | 500 a 1.500 km   | 8.000 a 18.000 km                  | 35.863 km                                       |
| Duração da Visibilidade                                      | 15 a 20 minutos por passagem   | 2 a 8 horas por passagem           | Permanente                                      |
| Elevação   | Variações rápidas; ângulos altos e baixos                              | Variações lentas; ângulos altos    | Sem variação; ângulos baixos em latitudes altas |
| Atraso na Propagação de Ida e Volta                          | poucos milissegundos   | Dezenas de milissegundos           | Aproximadamente 250 milissegundos               |
| Cobertura Terrestre Instantânea (diâmetro a 10° de elevação) | Aproximadamente 6.000 km   | Aproximadamente 12.000 a 15.000 km | 16.000 km                                       |
| Exemplos de Sistemas   | Iridium<br>Globalstar<br>Teledesic<br>Skybridge<br>Orbcomm<br>Starlink | Odyssey<br>Inmarsat<br>GPS         | Intelstat<br>Interspoutnik<br>Inmarsat          |

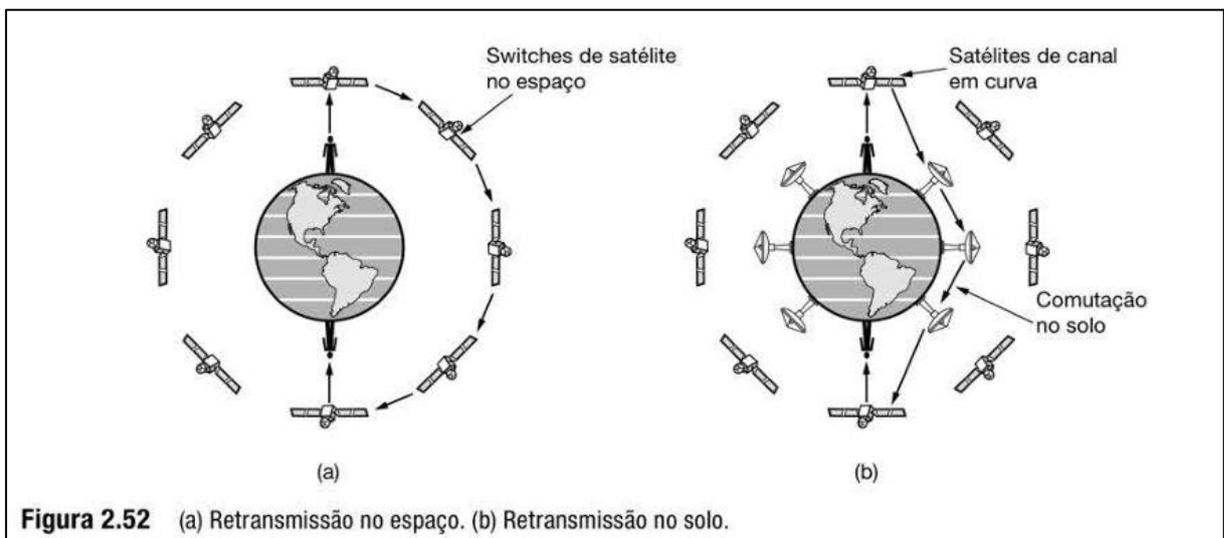
Fonte: Beard; Stallings, 2016.

## 2.4 Tipos *links* de comunicação em satélites

Inicialmente, as redes via satélite faziam uso de estações terrestres para transmitir ou receber o sinal de/para os satélites de comunicação. Desta forma, os satélites de comunicação funcionam como retransmissores dos sinais enviados pelas estações terrestres, como pode ser observado na Figura 3(b). Assim, com o uso de estações terrestres juntamente com os satélites é possível estabelecer conexões em diferentes pontos do planeta, o que permite a cobertura do sinal em todo o planeta, ainda que certas regiões não estejam na cobertura do satélite (Beard; Stallings, 2016).

O ISL é uma tecnologia mais recente que permite a comunicação direta entre os satélites sem a necessidade de retransmissão dos sinais para uma estação terrestre intermediária. Essa comunicação direta elimina os saltos duplos, reduzindo o atraso na propagação e aumentando a eficiência da rede. Os ISLs criam uma rede de comunicação independente do solo, melhorando a resiliência do sistema contra interferências e destruições. Além disso, facilitam a formação de constelações de satélites interconectados, o que aumenta a cobertura global e a capacidade do sistema através da interconexão de múltiplos satélites em uma mesma posição orbital. A Figura 3 mostra a diferença na retransmissão do sinal no espaço e a retransmissão do sinal utilizando estações terrestres, no qual é possível observar que na retransmissão utilizando bases terrestres a distância é maior (Zhang; Li, 2023).

Figura 3: Retransmissão do sinal de satélite no espaço (ISL) e no solo



Fonte: Tanenbaum, 2021.

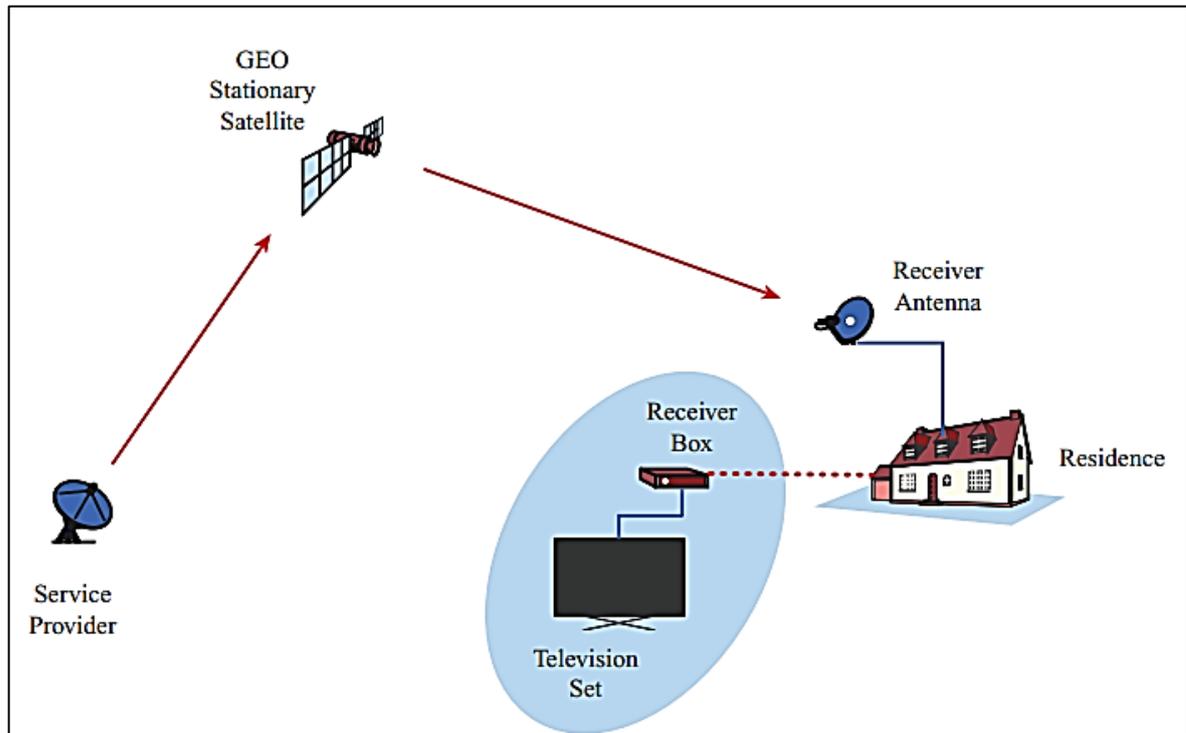
## 2.5 Usos dos satélites

O uso de satélites de transmissão compete com diversas outras tecnologias de transmissão de dados como a *Digital Subscriber Line*, Linha Digital de Assinante (DSL), acesso a cabo, via aérea e banda larga sem fio para fornecer serviços de televisão ou dados. Os formatos do sinal emitidos podem ser analógicos e digitais, por mais que o sinal digital tenha se mostrado mais predominante (Beard; Stallings, 2016).

Inicialmente, o sinal de televisão transmitido por satélites era feito na banda de frequência C (4 a 8 MHz), porém com os avanços da tecnologia as televisões passaram a utilizar o sinal digital e, com isso, a banda de frequência utilizada passa a ser a Ku (12 a 18 GHz). A

transmissão de sinais de televisão é um dos usos de satélites do tipo GEO, a Figura 4 mostra um exemplo de uma transmissão de televisão usando satélites GEO (Beard; Stallings, 2016).

Figura 4: Satélite de transmissão GEO



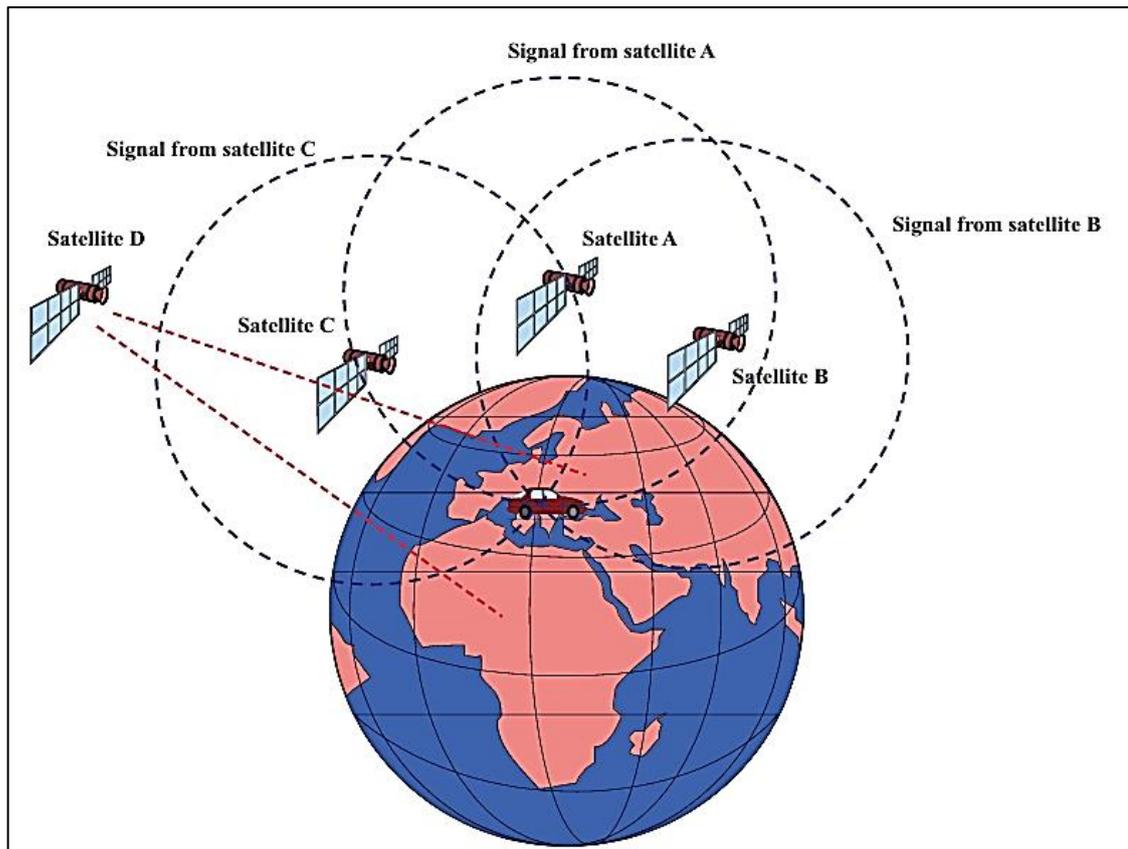
Fonte: Beard; Stallings, 2016.

O GPS é um exemplo de utilização de satélites MEO. Para ser utilizado, o GPS faz uso de uma constelação de satélites composta por cerca de 30 satélites situada a 20.200 km de altitude. A Figura 5 mostra o funcionamento dos satélites no GPS, onde é possível perceber que para manter sua cobertura e preciso de mais de um satélite (Tanenbaum, 2021).

Para exemplos de utilização de satélites LEO tem-se os sistemas da Globalstar e Iridium que usam satélites que operam em uma frequência de 1 e 3 GHz. Outro exemplo do uso de satélites LEO é a Teledesic que foi o primeiro a usar LEOs para fornecer uma banda larga similar à rede de fibra óptica (Forouzan, 2010).

O Iridium era utilizado para comunicação telefônica, em sua utilização ele conecta dois usuários por meio de satélites. Para isso, os satélites de suas constelações comunicam entre si, evitando a necessidade de se ter várias bases terrestres. Com isso, o sinal é retransmitido através do espaço do ponto de origem até o destino passando por vários satélites (Forouzan, 2010).

Figura 5: Satélites MEO do sistema GPS



Fonte: Beard; Stallings, 2016.

O sistema da Globalstar é semelhante ao fornecido pela Iridium. A principal diferença está na forma como o sinal é retransmitido. Enquanto no Iridium essa retransmissão ocorre no espaço sem a necessidade de estações terrestres a Globalstar requer tanto os satélites como as estações terrestres para seu funcionamento, uma vez que as estações terrestres podem gerar um sinal de maior intensidade (Forouzan, 2010).

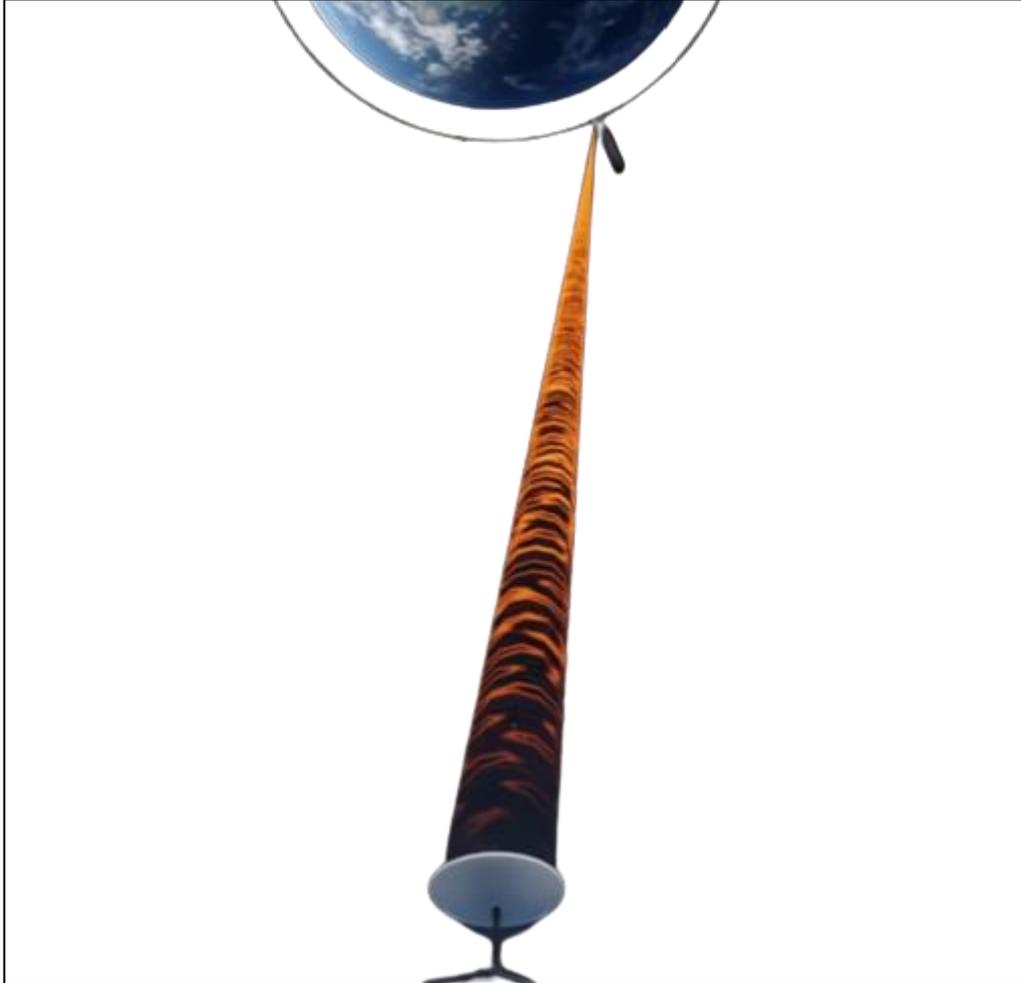
A Teledesic tem como objetivo a comunicação do tipo fibra óptica fornecendo assim uma *Internet* de acesso banda larga. A Teledesic também pode ser chamada como *Internet in the sky*, *Internet* nos céus (Forouzan, 2010).

O OneWeb era outra proposta de implementação de satélites LEO, ele pretendia levar *Internet* para lugares remotos ou de difícil acesso. Inicialmente, ele envolveu uma constelação com várias centenas de satélites, que tem acesso ao *backbone* da *Internet* e levar *Internet* para lugares remotos (Tanenbaum, 2021).

A Starlink é uma iniciativa mais recente, composta por uma constelação de satélites LEO com o objetivo de prover acesso à *Internet* rápida e de qualidade para qualquer lugar no

planeta. A Figura 6 mostra uma antena da Starlink conectada a um satélite em órbita LEO orbitando o planeta. (Starlink, 2024).

Figura 6: Antena Starlink se comunicando com satélite em órbita



Fonte: Branch Education, 2022.

### 3 STARLINK

Este capítulo descreve sobre as motivações e objetivos da Starlink, assim como o funcionamento de suas antenas e possíveis métodos de roteamento utilizados.

#### 3.1 Motivação

A Starlink é uma empresa possui uma extensa constelação de satélites LEO que possibilita ao usuário o acesso via *Internet* a *streamings*, jogos *online*, chamadas de vídeo e outras aplicações que requerem alta taxa de transmissão e baixa latência independente de sua localização geográfica (Starlink, 2024).

Shaengchart e Kraiwanit (2023) ressaltam que, um dos principais objetivos da Starlink é fornecer *Internet* de banda larga de boa qualidade que possua alta taxa de transmissão e baixa latência para todo o planeta, ainda que em locais de difícil acesso, como comunidades de baixa renda, áreas rurais e outros locais remotos o que representa uma mudança de paradigma na conectividade dos usuários.

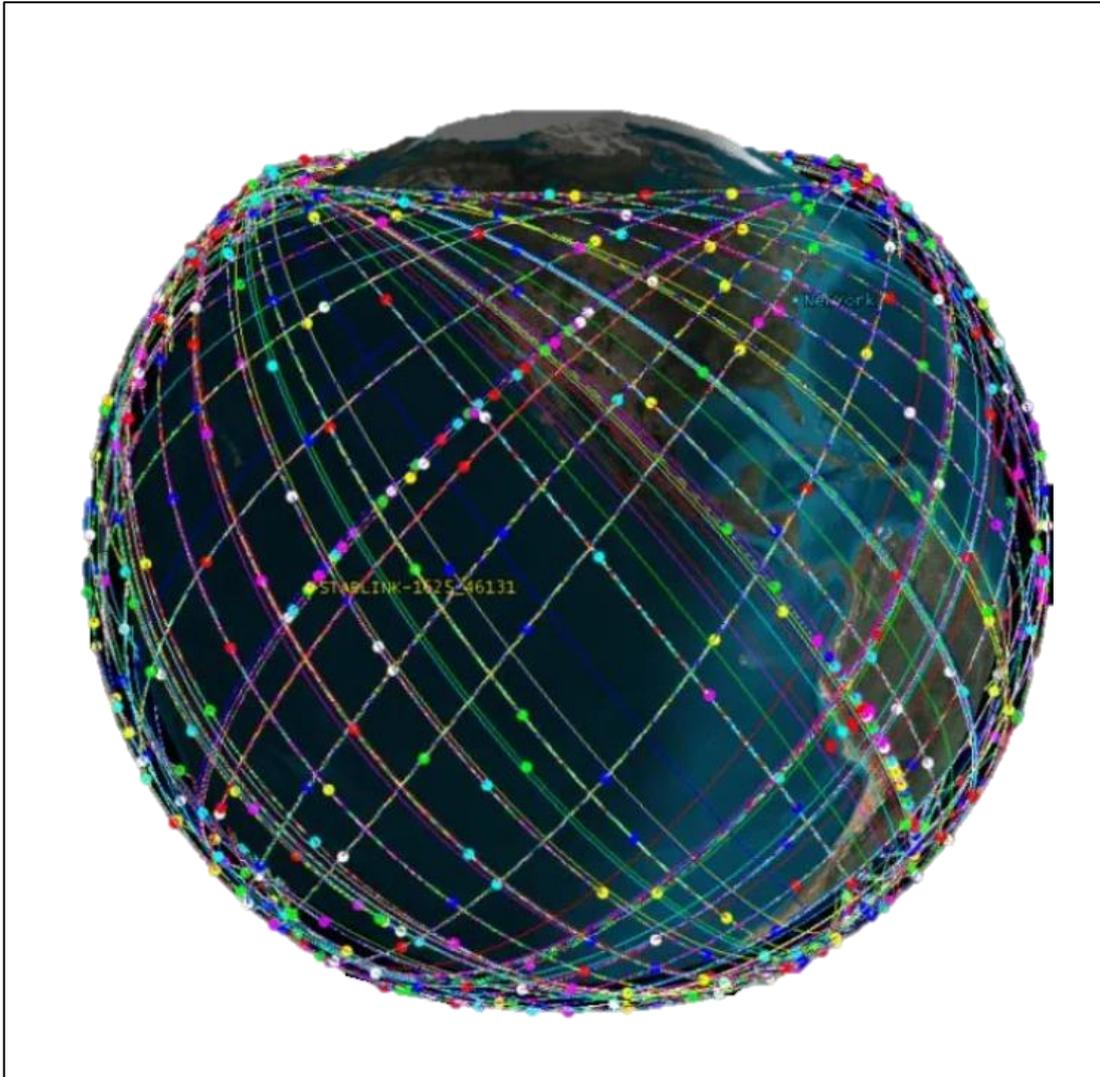
A combinação de satélites avançados, equipamento de usuário e a experiência em lançamentos espaciais da SpaceX, faz com que a Starlink seja a única operadora de satélites capaz de lançar seus próprios satélites. Com lançamentos sendo realizados com frequência, os satélites da Starlink são atualizados com as tecnologias mais recentes (Starlink, 2024).

#### 3.2 Introdução ao Starlink

A Starlink faz uso de uma topologia de rede em malha composta por milhares de satélites LEO que possuem a capacidade de se comunicarem entre si e com as estações presentes no solo. Os satélites das constelações da Starlink são colocados em diferentes planos em que cada plano contém cerca de 60 satélites. A Figura 7 mostra a topologia em malha da Starlink com suas diversas constelações de satélites (Kumar, 2023).

A malha da Starlink é composta por milhares de satélites LEO que orbita a Terra a uma altitude de aproximadamente 550 km e cobre todo o planeta. Como são satélites LEO, estes possuem baixa latência, da ordem de 25 milissegundos (ms). Além disso, conta com taxa de transferência de dados maior que os satélites GEO existentes até então (Starlink, 2024; Kumar, 2023).

Figura 7: Constelação de satélites Starlink



Fonte: Kumar, 2023.

A Starlink transmite os dados através dos satélites, que procuram otimizar a rota e evitar possíveis pontos de falhas. Isso é possível por ser uma topologia de rede em malha em que cada satélite presente em uma constelação está interconectado com os demais, possibilitando uma rede dinâmica e auto reparadora (Kumar, 2023).

Para realizar a comunicação entre os satélites, a Starlink usa de *lasers* ópticos, o que permite que uma nave espacial possa emitir dados sem o uso de uma base terrestre. A Figura 8 mostra o laser óptico utilizado nas comunicações espacial entre os satélites na rede da Starlink (Starlink, 2024).

Figura 8: Laser espacial óptico usado para comunicação ISL na Starlink



Fonte: Starlink, 2024.

As estações terrestres são essenciais para o funcionamento da Starlink, uma vez que, elas são as responsáveis pela conexão entre os satélites com a infraestrutura global de *Internet*. Assim, por meio delas é possível a transferência de dados entre a *Internet* e os satélites (Kumar, 2023).

Os dados enviados para os satélites da Starlink viajam através do espaço e conseguem alcançar distâncias longas muito mais rápido que os cabos de fibra ótica, além de conseguir alcançar mais lugares e pessoas em um tempo mais curto (Shaengchart; Kraiwanit, 2023).

Para realizar o envio de dados, a Starlink faz uso de duas de bandas de frequência, a Ku e a Ka. São utilizadas duas bandas de frequência diferentes para que se possa ter algumas vantagens na propagação do sinal, na taxa de dados e para evitar possíveis interferências (Kumar, 2023).

Os dados dos usuários são enviados e recebidos pelos satélites da Starlink por meio de antenas da Starlink. A Figura 9 mostra um exemplo de antena de usuário utilizada nos serviços da empresa. O sinal emitido pelo usuário é recebido pelo satélite que retransmite esse sinal na rede de malha (Kumar, 2023).

Figura 9: Antena Starlink do padrão autodirecionável

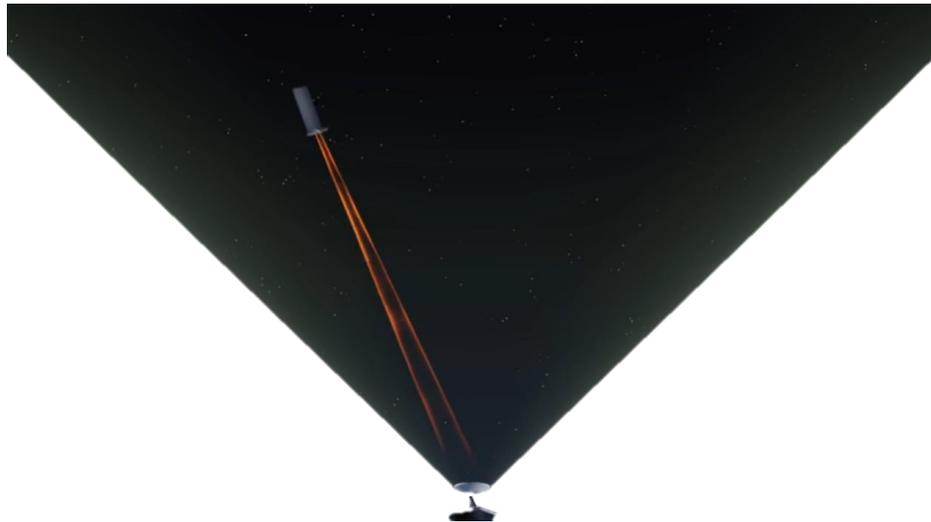


Fonte: Starlink, 2024

### 3.3 Antenas e transmissão

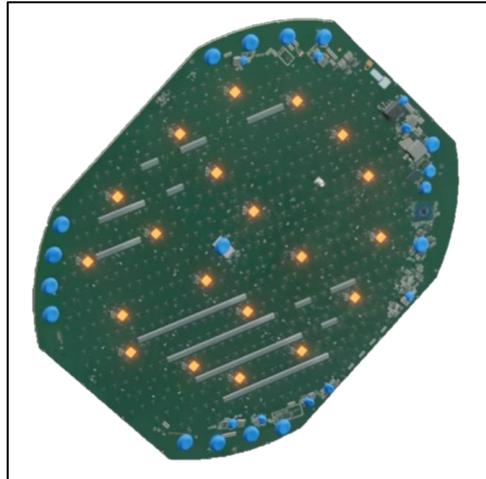
As antenas da Starlink não são iguais as antenas parabólicas normais, uma vez que as antenas convencionais apenas recebem o sinal, geralmente enviado por um satélite GEO. As antenas da Starlink precisam receber e enviar dados aos satélites. Por usarem satélites LEO é preciso que as antenas rastreiem a movimentação do satélite para receber o sinal sem interrupções como pode ser visto na Figura 10 (Branch Education, 2022).

Figura 10: Antena da Starlink rastreando o deslocamento do satélite em sua linha de visada



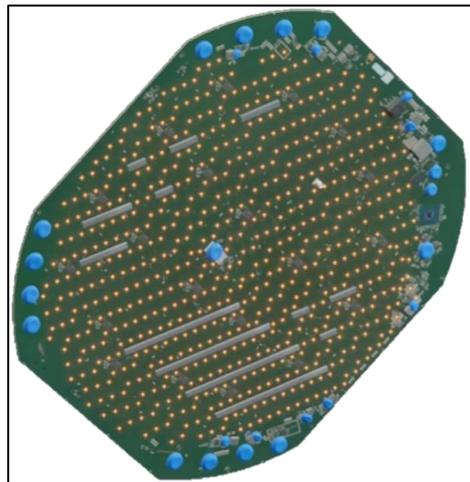
Fonte: Branch Education, 2022.

No interior das antenas há uma placa de circuito composta por 640 *microchips* pequenos e 20 *microchips* maiores, mostrado na Figura 11 (Branch Education, 2022).

Figura 11: *Microchips* maiores

Fonte: Branch Education, 2022.

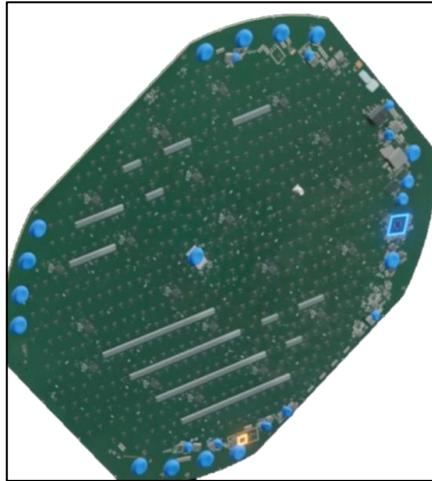
Cada *microchip* grande é responsável por 32 dos *microchips* menores como é possível visualizar na Figura 12. Os *microchips* são espalhados na placa com um padrão (Branch Education, 2022).

Figura 12: *Microchips* menores

Fonte: Branch Education, 2022.

Além dos *microchips* também se tem outros *chips* como a *Central Processing Units*, Unidades Central de Processamento (CPU) e o módulo de GPS, assim como é mostrado na Figura 13 onde a CPU está em azul e o GPS em laranja (Branch Education, 2022).

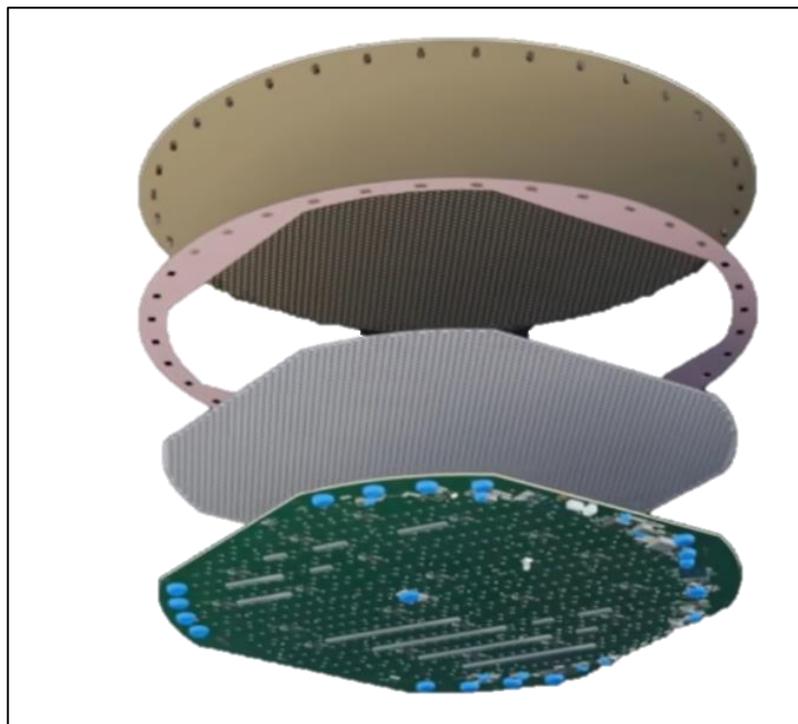
Figura 13: CPU e módulo de GPS



Fonte: Branch Education, 2022.

Do outro lado da placa de circuito é possível encontrar 1400 circuitos de cobre dispostos em uma grade quadrada. Essa placa superior é revestida por outras camadas que possuem um padrão de favos de mel como é possível ver na Figura 14. Com isso, se tem um total de 1280 antenas organizadas em um padrão hexagonal, na qual cada antena é controlada por um *microchip* na placa de circuito, esse processo é chamado de matriz de fase (Branch Education, 2022).

Figura 14: Estrutura de uma antena da Starlink



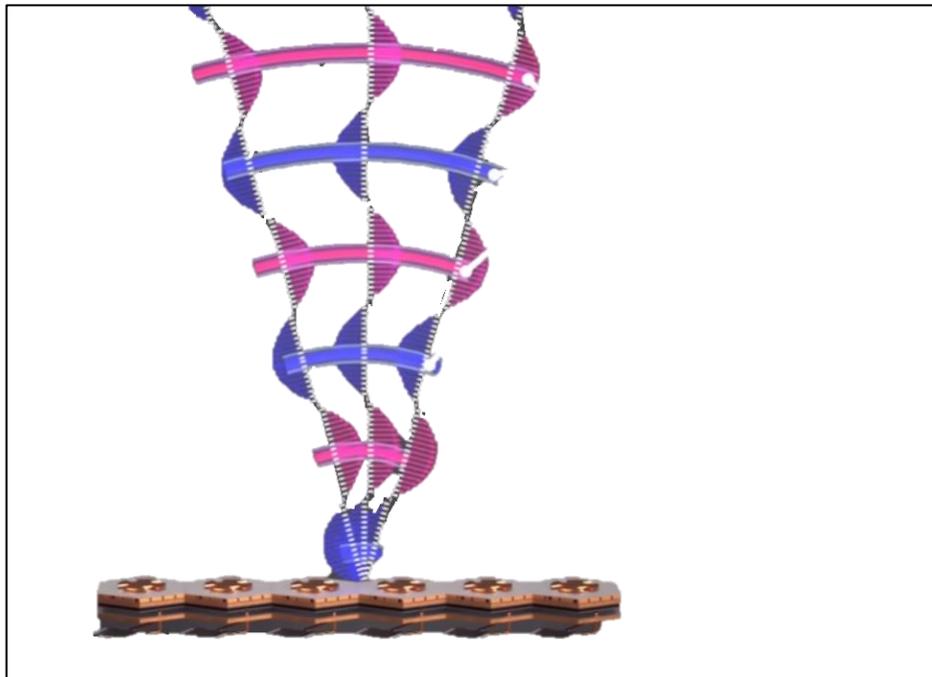
Fonte: Branch Education, 2022.

As antenas da Starlink são feitas com medidas específicas para evitar que outros tipos de sinais possam ser recebidos. As frequências que estiverem fora do alcance são apenas ignoradas pelas antenas (Branch Education, 2022).

Uma antena sozinha não é suficiente para poder enviar o sinal até a órbita. Para se obter tal feito é preciso de uma conjunção com várias antenas. No caso da Starlink, isso é feito por 1280 antenas (Branch Education, 2022).

As ondas eletromagnéticas das diferentes antenas se chocam causando dois efeitos. Quando estão no mesmo sentido cria-se um sinal mais focado. Esse fenômeno é chamado de interferência construtiva. Quando as ondas estão em sentidos diferentes, estas geram interferência destrutiva fazendo com que suas ondas se cancelem ou percam a força do sinal. Esses dois efeitos são utilizados pela Starlink para levar o sinal das antenas terrestres até os satélites e é chamado de *Beam front*, que intensifica o sinal nas interferências construtivas e reduz ou cancela sinais interferentes provenientes de outras fontes de dados. Na Figura 15 é mostrado um exemplo da formação de um *Beam front* utilizando de 6 antenas (Branch Education, 2022).

Figura 15: Formação do *Beam front* com 6 antenas



Fonte: Branch Education, 2022.

Um dos maiores problemas de sistemas de satélites que usam LEO é a reorientação da antena, pois ela deve ser capaz de acompanhar o sinal transmitido pelos satélites. Para isso,

muitas vezes é impraticável reorientar fisicamente a antena em relação ao alvo ou fonte do sinal. Em adição, a localização do alvo pode não ser conhecida. Para superar algumas dessas deficiências pode se utilizar uma antena *phased array*, na qual a reorientação é formada a partir de um conjunto de elementos de antena para simular uma grande antena direcional, sem a necessidade de uma realocação física (Mazlouman; Schulze, 2018).

As antenas *phased array* necessitam de numerosos componentes de mudança de fase para controlar individualmente o sinal recebido ou emitido por cada elemento da antena, com o objetivo de ajustar o ângulo de formação do feixe. Esse processo possibilita a redução do custo, do tamanho, da complexidade e dos requisitos de energia do sistema de antena *phased array* (Mazlouman; Schulze, 2018).

A mudança de fase é medida em um intervalo de  $0^\circ$  a  $359^\circ$ . Apesar de não ser perceptível a olho nu, as antenas da Starlink demonstram uma alta eficiência na realização desse processo. A alteração de fase possibilita a mudança na direção da interferência construtiva e destrutiva, permitindo assim, o redirecionamento do sinal (Branch Education, 2022).

Para poder localizar os satélites é utilizado o *chip* de GPS presente nas placas de circuito das antenas. O *software* calcula a posição dos satélites e as distribui a mudança de fase necessário ao longo dos 20 *microchips* maiores. Cada *microchip* maior é responsável por coordenar 32 *microchips* menores. Os *microchips* maiores enviam os sinais para os menores que são chamados de módulos de entrada. Cada *microchip* menor é responsável por 2 antenas. Com isso, os feixes podem ser emitidos para qualquer direção em até  $100^\circ$  no campo de visão da antena (Branch Education, 2022).

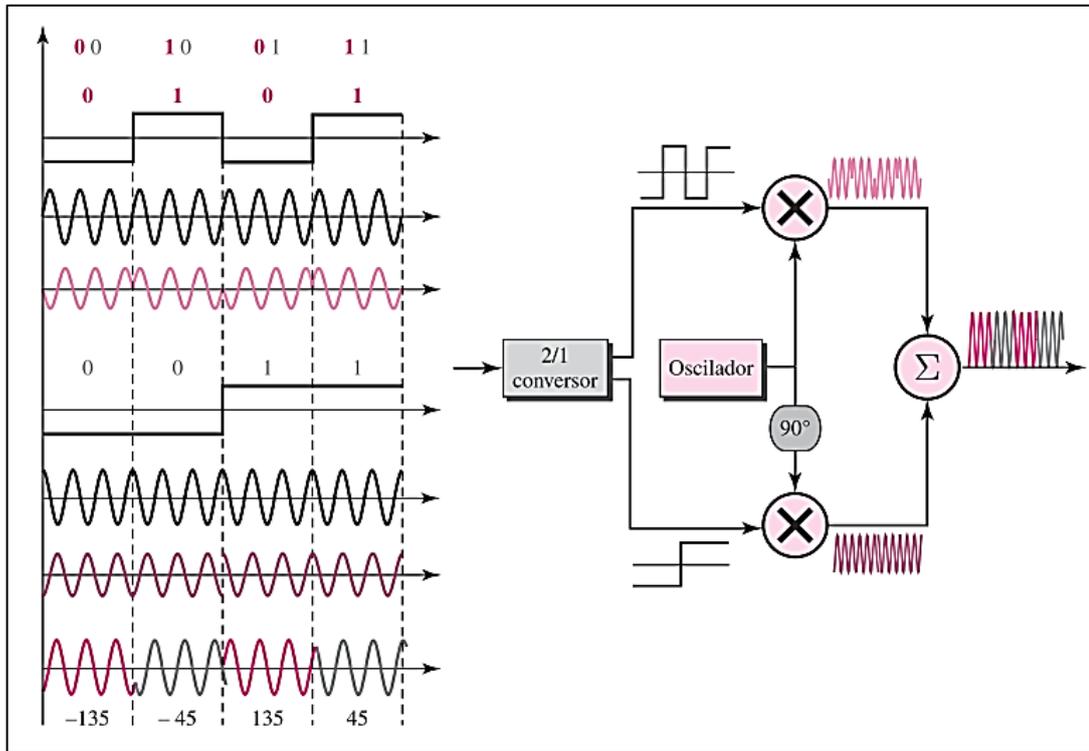
Os dados são transmitidos através das ondas eletromagnéticas, cada onda tem sua amplitude e fases que são representados em valores binários de 6 *bits*, 64 valores diferentes que devem ser expressos pelas ondas. A técnica de enviar valores em grupos de 6 *bits* usando diferentes variações de amplitudes e fases é chamada de 64 *Quadrature Amplitude Modulation*, Modulação de Amplitude em Quadratura (64-QAM). Essa é a técnica utilizada pela Starlink para fazer o envio dos dados para os satélites (Branch Education, 2022).

Beard e Stallings (2016) explicam que QAM é uma técnica transmissão de sinal que é utilizada em alguns padrões de comunicação sem fio. A técnica combina os princípios de outras duas técnicas o *Amplitude Shift-Keying*, Modulação por Deslocamento de Amplitude (ASK) e o *Phase Shift Keying*, Modulação de Deslocamento por Fase (PSK).

A técnica do QAM possibilita o envio de dois sinais diferentes na mesma frequência portadora. Para isso ela faz uso de duas cópias da frequência do portador deslocadas em fase uma da outra. A Figura 16 mostra um exemplo implementação do QPSK, que é semelhante ao

QAM, que usa 4 ângulos de fase e portadoras deslocadas em fase de  $90^\circ$ . No destino os dois sinais são demodulados para formarem a mensagem original em binário (Beard; Stallings, 2016).

Figura 16: O QPSK e sua implementação



Fonte: Forouzan, 2010

### 3.4 Roteamento

A constelação de satélites LEO da Starlink depende de ISLs. Com isso, os pacotes de dados precisam percorrer diversos satélites para poder chegar ao destino, realizando vários saltos. Quanto mais saltos, maior é a complexidade do roteamento (Stock; Fraire; Hermanns, 2022).

Para sanar o problema da complexidade é necessário um algoritmo de roteamento especializado e eficiente, principalmente para redes como a da Starlink que pretende competir com as redes terrestres. A maioria dos algoritmos para roteamento foi desenvolvido para cumprir com um propósito específico que são as redes de comunicações terrestres, o que significa que eles podem não ser os mais adequados para as mega constelações de satélites (Stock; Fraire; Hermanns, 2022).

O roteamento feito pela Starlink é dinâmico e leva em consideração alguns fatores importantes antes de decidir a melhor rota, como a força do sinal, o congestionamento e a disponibilidade do melhor caminho. Essa característica possibilita otimizar o desempenho e confiabilidade do roteamento dinâmico da Starlink (Kumar, 2023).

O roteamento feito pela a Starlink possui redundância. A importância deste aspecto para o sistema é que, caso um satélite ou uma rota esteja indisponível, ainda assim é possível enviar uma mensagem através de um caminho alternativo (Kumar, 2023).

Um dos algoritmos que é utilizados para resolver problemas de roteamento é o algoritmo de Dijkstra. Ele é conhecido por ser um padrão para resolver o caminho mais curto (Stock; Fraire; Hermanns, 2022).

Segundo Tanenbaum (2021), o algoritmo de Dijkstra requer que as distâncias precisem ser não negativas. O algoritmo inicialmente não conhece o caminho e, conforme avança o algoritmo rotula os nós como provisório ou permanente. Quando encontra o menor caminho, os nós que levaram àquele caminho são rotulados como permanentes.

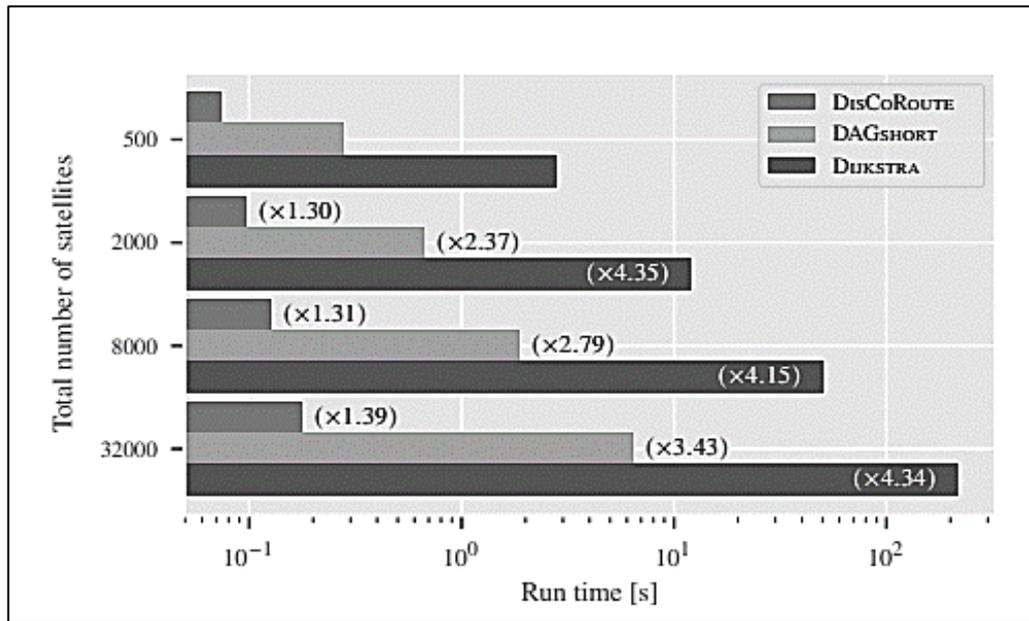
Outro algoritmo que pode ser usado em esquemas de rede para calcular o caminho mais curto é o algoritmo para *Directed Acyclic Graph*, Grafos Acíclicos Direcionados (DAGs) ou DAGshort que é baseado em ordenação topológica. Uma ordenação topológica é uma maneira de organizar os nós de um grafo de modo que, para cada aresta direcionada presente no grafo, o nó de origem apareça antes do nó de destino na sequência ordenada (Stock; Fraire; Hermanns, 2022).

O algoritmo do CoinFLipRoute é um algoritmo probabilístico que, dado um ponto de origem e destino, conta o número mínimo de saltos e em seguida “lança uma moeda” para decidir para qual rota deve seguir. A única dificuldade presente nesse algoritmo é que é difícil ter o controle dos saltos verticais e horizontais realizados por ele (Stock; Fraire; Hermanns, 2022).

O algoritmo do DisCoRoute é um algoritmo feito e distribuído para mega constelações de satélites. O algoritmo tem uma vantagem em relação ao algoritmo de Dijkstra, que seria o fato dele ser muito mais rápido de calcular, além de produzir resultados quase ótimos que superam a abordagem probabilística do CoinsFLipRoute (Stock; Fraire; Hermanns, 2022).

A Figura 17 mostra uma comparação entre os diferentes algoritmos de roteamento sendo utilizados em uma constelação de satélites, semelhante ao que se tem na Starlink. Como é possível verificar o algoritmo do DisCouRoute oferece um melhor desempenho, se comparado com os demais algoritmos como o Dijkstra (Stock; Fraire; Hermanns, 2022).

Figura 17: Gráfico de barras mostrando a escalabilidade dos algoritmos com o aumento do tamanho da constelação



Fonte: Stock; Fraire; Hermanns, 2022.

Para Stock, Fraire e Hermanns (2022) dentre os algoritmos de roteamento descritos em seu artigo, o DisCoRoute é o que melhor atende às necessidades da constelação de satélites da Starlink.

## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados na simulação computacional desse trabalho, abrangido *hardware*, *software* e ferramentas utilizadas nas simulações.

### 4.1 Ambiente de testes

Este tópico apresenta a configuração do computador utilizada para a simulação, bem como o *software* empregado.

#### 4.1.1 Hardware

O *hardware* do computador utilizado para as simulações conta com:

- Processador: AMD Ryzen 7-5800H;
- Memória RAM: 16 GB DDR4;
- Placa de Vídeo (GPU): Nvidia GeForce RTX 3050 com 4 GB de VRAM;
- Armazenamento: 512 GB SSD.

#### 4.1.2 Software

O *software* utilizado foi o Matlab na versão do estudante para 30 dias testes, foi instalado em um computador com Sistema Operacional Windows 11. O Matlab contém um *toolbox* com ferramentas que permitem a simulação de constelações de satélites do tipo LEO, definir o número e tipo constelações, a quantidade de satélites por constelação, a inclinação das orbitas, dentre outras características.

### 4.2 Algumas alternativas de *softwares* para simulação de constelações de satélites

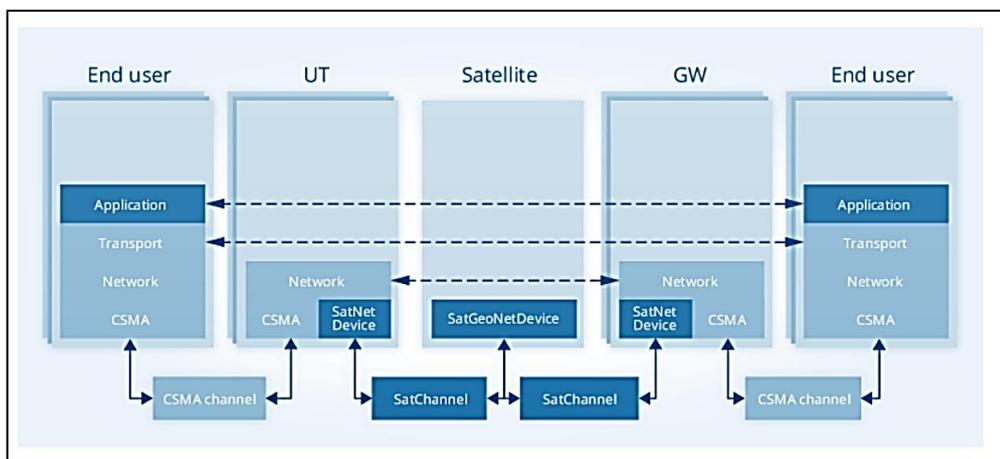
Este tópico, foi abordado algumas opções de *softwares* consideradas para realizar as simulações propostas nesse trabalho.

#### 4.2.1 Satellite Network Simulator 3 (SNS3)

A primeira opção de simulação considerada foi o SNS3, que é uma extensão para o *software* de simulação *Network Simulator 3 (NS3)*, um *software* de simulação de redes. A extensão SNS3, tem como foco adicionar a funcionalidade de fazer simulações espaciais de redes de satélites. O *software* é utilizado pela *French Space Agency*, Agência Espacial Francesa (CNES), possui código aberto e permite que usuários simulem comunicações de redes no espaço utilizando de satélites (Sns3.org, 2024).

O SNS3 é uma plataforma que possui uma variedade de mecanismos avançados, permitindo simulações detalhadas em redes via satélite. Dentre suas principais características, destacam-se a utilização de *Adaptive Coding and Modulation*, Codificação e Modulação Adaptativa (ACM) e a implementação de métodos de agendamento para os *links* de retorno e de encaminhamento. Também oferece uma variedade de *Demand Assignment Multiple Access*, Métodos de Atribuição Acesso Múltiplo sob Demanda (DAMA), incluindo a alocação constante de taxa de transmissão, capacidade dinâmica baseada em taxa e volume de tráfego, bem como a distribuição de capacidade livre. No que diz respeito ao acesso aleatório, ele engloba o protocolo ALOHA, que resolve disputas através do Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA, ALOHA com Diversidade e Resolução de Contenção por Intervalos (CRDSA). Outros recursos englobam encapsulamentos genéricos de pacotes, *Automatic Repeat Request*, Mecanismo de Reenvio Automático (ARQ) na camada de convergência bidirecional, cálculos de ganho de antenas multifeixe, além do monitoramento de interferências co-canal e intra-feixe. A Figura 18 mostra o modelo de arquitetura utilizada no SNS3, para possibilitar as simulações.

Figura 18: Arquitetura do SNS3



Fonte: Sns3.org, 2024

Pelas suas características, o SNS3 mostrou-se uma alternativa promissora. Foi feito o seu download e executados os procedimentos para sua instalação. Contudo, durante o processo ocorreu um *bug* não previsto na documentação do *software*, conforme mostra as Figuras 19 e 20. Esse erro foi reportado no repositório do GitHub dos autores do SNS3, porém não houve resposta (Sns3, 2024).

Figura 19: Erro de instalação do SNS3 na versão do NS3 3.37

```
/pimenta/TCC2/ns-allinone-3.37/ns-3.37/contrib/magister-stats/helper/stats-helper.cc:141:64: error: no matching function
all to 'MakeEnumAccessor<ns3::StatsHelper::IdentifierType_t>(void (ns3::StatsHelper::*)(ns3::StatsHelper::IdentifierType_
s3::StatsHelper::IdentifierType_t (ns3::StatsHelper::*)() const)'
MakeEnumAccessor<StatsHelper::IdentifierType_t>(&StatsHelper::SetIdentifierType,
                                                &StatsHelper::GetIdentifierType),
/pimenta/TCC2/ns-allinone-3.37/ns-3.37/contrib/magister-stats/helper/stats-helper.cc:150:70: error: no matching function
all to 'MakeEnumAccessor<ns3::StatsHelper::OutputType_t>(void (ns3::StatsHelper::*)(ns3::StatsHelper::OutputType_t), ns3:
sHelper::OutputType_t (ns3::StatsHelper::*)() const)'
MakeEnumAccessor<StatsHelper::OutputType_t>(&StatsHelper::SetOutputType,
                                                &StatsHelper::GetOutputType),
```

Fonte: Autoria Própria

Figura 20: Erro de instalação do SNS3 no NS3 3.42

```
/home/pimenta/TCC2/ns-allinone-3.42/ns-3.42/contrib/satellite/model/lora-adr-component.cc: In static member function 'static ns3
::TypeId ns3::LoraAdrComponent::GetTypeId()':
/home/pimenta/TCC2/ns-allinone-3.42/ns-3.42/contrib/satellite/model/lora-adr-component.cc:47:37: error: 'DEFAULT_METHOD' was not
declared in this scope
47 |         EnumValue(DEFAULT_METHOD),
   |         ^
/home/pimenta/TCC2/ns-allinone-3.42/ns-3.42/contrib/satellite/model/lora-adr-component.cc:49:65: error: no matching function for
call to 'MakeEnumChecker<ns3::LoraAdrComponent::CombiningMethod>()'
49 |         MakeEnumChecker<LoraAdrComponent::CombiningMethod>()
   |         ^
```

Fonte: Autoria Própria

O erro em questão ocorreu quando se tentou instalar a extensão SNS3 na versão 3.37 do NS3 e na versão 3.42. Foram consultados artigos que utilizaram o SNS3, *e-mails* foram enviados aos autores e realizou-se uma publicação no repositório do GitHub do SNS3 relatando o erro. Além disso, buscou-se em comunidades do Facebook orientações sobre como solucionar o problema, no entanto, não foi possível encontrar publicações nessas comunidades relacionadas ao uso do SNS3 ou comentários sobre erros no *software*.

Durante a elaboração deste trabalho, houve um retorno dos desenvolvedores sobre o *bug* reportado. Um dos desenvolvedores adicionou algumas possíveis soluções no repositório oficial em 07 novembro de 2024, mais de dois meses após a publicação do problema existente. Contudo, ainda persistem alguns erros que necessitam de correção e que foram relatados por outro usuário na plataforma. As Figuras 21, Figura 22 e Figura 23 mostram as respostas de um dos autores do SNS3.

Figura 21: Postagem do problema

### Installation problem #54

Open PimentaX opened this issue on Aug 29 · 11 comments

---



PimentaX commented on Aug 29

When I tried to download sns3, I encountered problems:  
 I installed ns3.37 as the master version recommends, but it returned the error shown in image.

Fonte: Sns3, 2024.

Figura 22: Reposta de um dos autores



**bastientauran** commented 2 weeks ago

Data: 05 de Novembro de 2024

Contributor ...

Hello,

You need to make sure that the 3 modules (satellite, traffic and magister-stats) are coherent with the ns3 version.

For ns-3.37, you need:

- satellite on commit `04dc901`
- traffic on commit `c68daaf1`
- magister-stats on commit `c613ba7c`

For ns-3.42, you need:

- satellite on commit `19779c2`
- traffic on commit `d9aa8ce4`
- magister-stats on commit `95ae2a8f`

From ns-3.41, you can use tags for all 3 modules to help getting the correct version



Hi,

Data: 06 de Novembro de 2024

For ns-3.42 this results in errors.

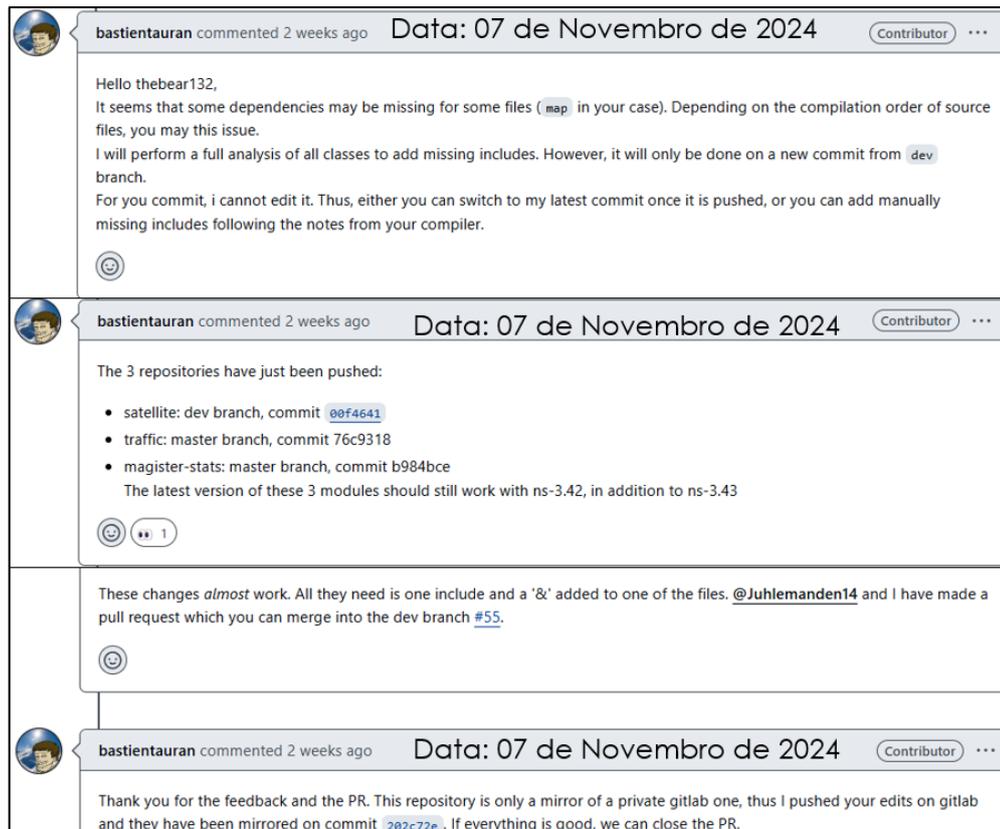
For the satellite repo i did `$ git checkout 19779c2aae6534`, while the two others are up to date when doing `$git log` in their respective folders:

```
bear@debian:~/Desktop/ns-allinone-3.42/ns-3.42/contrib$ ls --> magister-stats satellite traffic
```

I have followed the CMake installation, where the errors happen when doing `./ns3 build`

Fonte: Sns3, 2024.

Figura 23: Reposta de um dos autores continuação

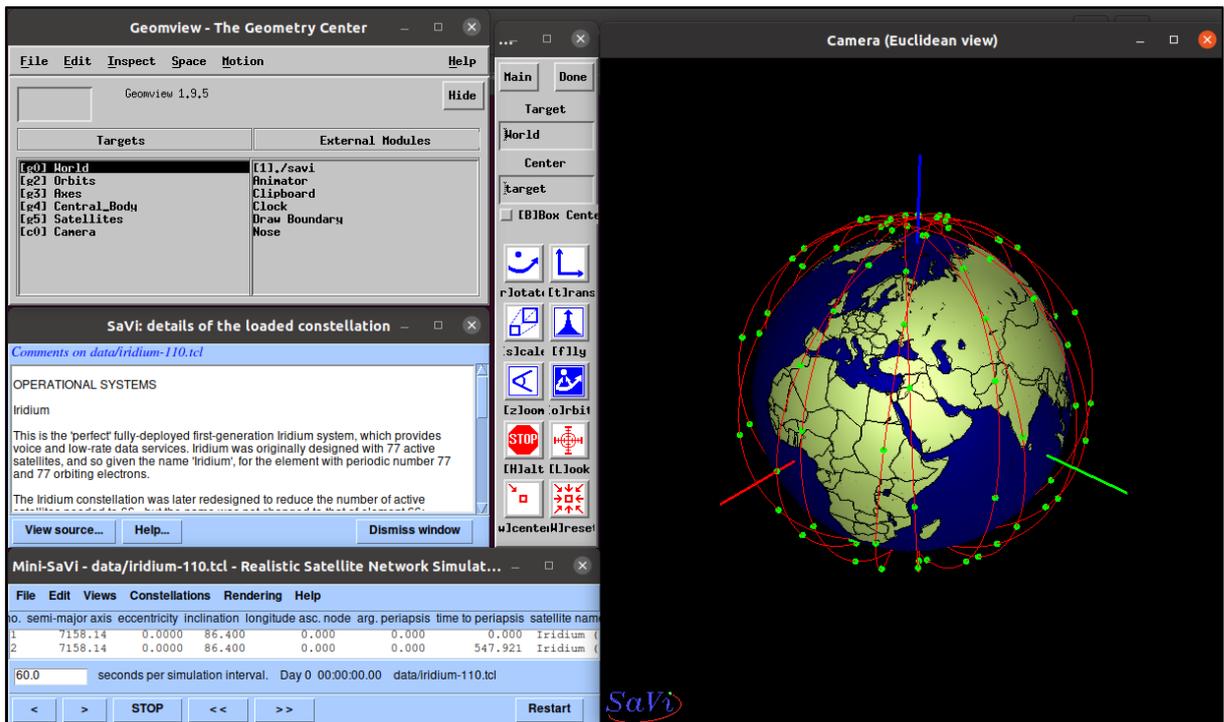


Fonte: Sns3, 2024.

Por esse motivo, o uso do SNS3 nesse trabalho foi descartado e foram buscadas novas alternativas. Contudo, caso o *bug* seja solucionado, é um *software* que representa uma alternativa para se trabalhar na simulação de constelações de satélites.

#### 4.2.2 MiniSavi

A segunda alternativa para simulação de uma constelação de satélites nesse trabalho foi o MiniSavi que é apresentado pelos autores do artigo intitulado “*Mini-Savi: Realistic Satellite Network Simulation Platform Based on Open-Source Tools*”, no qual o *software* é integrado ao outros dois: o Mininet e o Savi. O Savi é um *software* de simulação que possui dados sobre satélites em tempo real de constelações de satélites diversificadas, como o Iridium, Teledesic, GPS e satélites MEO. Esses dados são enviados ao Mininet, que calcula as coordenadas dos satélites ao longo da sua movimentação na simulação. Essas coordenadas são enviadas a um terceiro *software*, o Ryu que exibe a topologia em 2D, além de montar uma tabela de fluxo de roteamento. Na Figura 24 é possível visualizar o funcionamento do *software* Savi na simulação da constelação Iridium (Zhu et al., 2023).

Figura 24: Interface do *software* Savi

Fonte: Savi.Sourceforge, 2023

A partir do estudo realizado com o MiniSavi, foi identificado o *software* Savi como uma ferramenta eficaz para a visualização e análise de constelações de satélites. A utilização desse *software* proporcionou uma compreensão aprofundada sobre os diferentes tipos de constelações e suas características.

O MiniSavi não oferece configurações de constelações de satélites similares às utilizadas pela Starlink, mas permite personalização, tornando-se uma alternativa viável para simulação. Contudo, a utilização do MiniSavi revelou-se inviável para este trabalho, pois, mesmo após a configuração de uma sub-rede para comunicação entre o MiniSavi e o controlador Ryu, não foi possível estabelecer uma conexão para o envio de dados. Dessa forma, devido à escassez de documentação que detalhassem o processo de comunicação entre o MiniSavi e o Ryu, optou-se por descartar o uso do MiniSavi neste projeto.

#### 4.2.3 Matlab

A terceira alternativa considerada para a simulação de constelações de satélites semelhantes ao que se tem no Starlink, foi o Matlab que é uma plataforma de programação e computação que permite aos usuários fazerem análise de dados, simulações, criarem modelos e desenvolver algoritmos. Uma de suas características que facilitam o uso do Matlab são as

*toolbox* elas contêm modelos e funções que agilizam o desenvolvimento de algoritmos, análise de dados e modelos. Para o caso da simulação desse trabalho a *toolbox* utilizada foi a Aerospace que conta com ferramentas para simulações de constelações de satélites (The Mathworks, Inc., 1994).

A escolha do *software* Matlab para este projeto deve-se à sua habilidade de simular constelações de satélites através da *toolbox* Aerospace. Essa ferramenta disponibiliza um conjunto amplo de recursos que permite a modelagem de diferentes configurações de constelações, além de facilitar ajustes na simulação. Ademais, o Matlab oferece funcionalidades que auxiliam a execução de simulações de roteamento, ampliando a capacidade de avaliação dos cenários estudados.

### **4.3 Aerospace Toolbox**

O Aerospace *toolbox* fornece ferramentas para realizar simulações e analisar cenários envolvendo satélites, permite traçar trajetórias de satélites a partir de dados orbitais, mensagens de elementos orbitais médios ou matrizes de elementos de duas linhas. Também é possível fazer as importações de dados, para propiciar a criação de constelações de satélites e posterior visualização em 3D do cenário criado (The Mathworks, Inc., 1994).

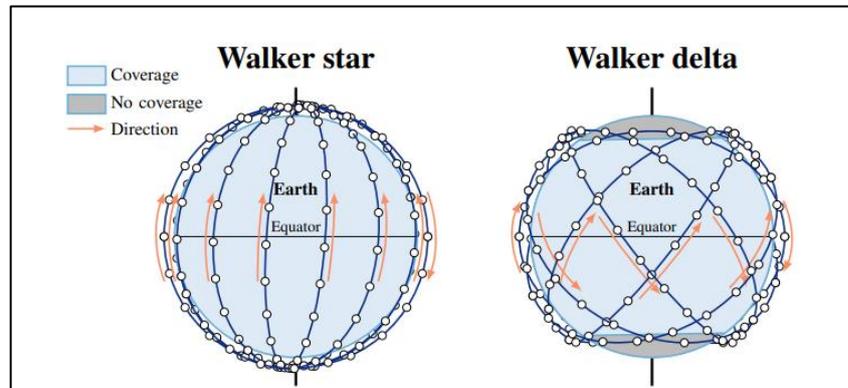
#### **4.3.1 Constelações Walker**

As constelações *Walker*, analisadas desde o final dos anos 1960, constituem um modelo estruturado para a cobertura global do planeta Terra com satélites em órbita. A configuração *Walker* destaca-se pela sua simetria, sendo representada pelo formato T|S|P, onde T representa o número total de satélites e S representa a quantidade de satélites distribuídos igualmente em cada um dos P planos orbitais. Além desses componentes, a variável F representa a distância relativa entre os satélites em planos adjacentes, oscilando entre 0 e  $P - 1$ , garantindo uma uniformidade na disposição dos satélites (Silva; Santos; Gonçalves, 2020)

O Matlab simula dois tipos de constelações *Walker*, a *Walker Delta* e a *Walker Star*. A *Walker Delta* é uma constelação com ângulo de inclinação em relação ao Equador menor que  $90^\circ$ , na maioria das vezes em uma inclinação entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$ , não tem cobertura das regiões polares, porém proporciona maior cobertura em regiões com maior densidade populacional. A constelação *Walker Star* possui ângulo de inclinação de  $90^\circ$  em relação ao Equador, e assim,

cobre os polos do Planeta. O modelo das constelações *Walker Star* e *Walker Delta* pode ser visualizado na Figura 25 (Liang; Chaudhry; Yanikomeroğlu, 2021).

Figura 25: Exemplo *Walker Star* e *Walker Delta*



Fonte: Leyva-Mayorga et al., 2022

Nas simulações deste trabalho, foram realizados testes principalmente com constelações *Walker Delta*, uma vez que, segundo Leyva-Mayorga et al. (2022), a constelação Starlink utiliza um *design* misto, com camadas orbitais que combinam características de *Walker Delta* e *Walker Star*, adaptando inclinações para otimizar a cobertura em diferentes latitudes, com maior quantidade de satélites *Walker Delta*.

#### 4.3.2 Funções da toolbox Aerospace usadas nas simulações

Este tópico apresenta as funções da *toolbox* Aerospace, que foram utilizadas nas simulações de cenários que envolvem satélites e estações terrestres. São abordadas as funções *datetime*, *satelliteScenario*, *walkerDelta*, *walkerStar*, *groundStation*, *aer*, *satelliteScenarioViewer*, *access*, *accessIntervals*, *asind* e *min* detalhando seus parâmetros e aplicações.

##### 4.3.2.1 Função Datetime

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *datetime* faz a definição do tempo para serem utilizadas dentro dos testes do Matlab. The Mathworks, Inc. (1994) descreve a função *datetime* com a sintaxe descrita a seguir:

```
datetime (a,b,c,d,e,f);
```

Onde:

- a: Define o ano da simulação. Valor esperado é um número inteiro representando o ano. Exemplo 2021 indica o ano 2021;
- b: Define o mês do ano. Valor esperado é um número inteiro de 1 a 12. Exemplo 12 representa dezembro;
- c: Define o dia do mês. Valor esperado é um número inteiro de 1 a 31, dependendo do mês. Exemplo 10 indica o décimo dia do mês;
- d: Define a hora do dia, no formato de 24 horas. Valor esperado é um número inteiro de 0 a 23. Exemplo 18 representa 18 horas;
- e: Define os minutos. Valor esperado é um número inteiro de 0 a 59. Exemplo 27 representa 27 minutos;
- f: Define os segundos. Valor esperado é um número inteiro de 0 a 59. Exemplo 57 representa 57 segundos.

Exemplo:

```
startTime = datetime (2024,12,10,15,30,45);
```

No exemplo, foi criada a data de 10 de dezembro das 2024 às 15 horas 30 minutos e 45 segundos, esse resultado gerado pela função é armazenada na variável *startTime*.

#### **4.3.2.2 Função satelliteScenario**

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *satelliteScenario* permite a criação de cenários tridimensionais para simulação de estações terrestres e modelagem de constelações de satélites. Essa funcionalidade foi essencial para a realização das simulações desenvolvidas neste trabalho, proporcionando uma visualização detalhada e realista dos cenários analisados. A função *satelliteScenario*, segundo The Mathworks, Inc. (1994) possui a sintaxe descrita a seguir:

```
satelliteScenario(a, b, c, d, e);
```

Onde:

- a: Define o horário de início da simulação de satélites em formato de tempo UTC. Valor esperado é uma data e hora específicos no formato *datetime*. Exemplo *datetime(2021,12,10,18,27,57)* representa o início da simulação em 10 de dezembro de 2021, às 18:27:57 UTC;
- b: Define o horário de término da simulação, também no formato UTC. Valor esperado é uma data e hora no formato *datetime* que ocorre após o *startTime*. Isso pode ser definido diretamente ou como uma operação que soma um intervalo ao

*startTime*. Exemplo *startTime* + hours (3) configura o fim da simulação para três horas após o início;

- c: Define o intervalo de amostragem da simulação, ou seja, o tempo entre cada etapa da simulação. Valor esperado é um número em segundos, que determina a frequência de atualização dos dados de posição e de movimento dos satélites. Exemplo 60 significa que a simulação será atualizada a cada 60 segundos;
- d: Indica se a simulação é executada automaticamente (se *true*) ou manualmente (se *false*);
- e: se refere ao *AutoSimulate*, mas em um contexto específico, esse parâmetro define se a função realiza ou não a "auto simulação", ou seja, se avança automaticamente o tempo simulado. Valor esperado é *true* ou *false*. Exemplo se *false* significa que o usuário deve avançar manualmente cada etapa da simulação, enquanto *true* permite a execução contínua sem intervenção.

Exemplo:

```
startTime = datetime(2021,12,10,18,27,57);
stopTime = startTime + hours(3);
sampleTime = 60;
satelliteScenario(startTime, stopTime, sampleTime, "AutoSimulate", true);
```

No exemplo tem-se a definição de um cenário de satélite, nele foram passados como parâmetros as variáveis de tempo de início e término da simulação definidas por *startTime* e *stopTime*, uma variável para o intervalo da simulação sendo ela *sampleTime*, seguida da definição do *AutoSimulate* que para o exemplo está definido como *true*.

#### 4.3.2.3 Função walkerDelta

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *walkerDelta* é utilizada para criar constelações de satélites e faz parte da lista de objetos de cenários da *toolbox*. O *walkerDelta* é caracterizado por criar cadeias de satélites com inclinação entre 30° e 60°. Segundo The Mathworks, Inc. (1994) a função possui a seguinte sintaxe:

```
walkerDelta(a, b, c, d, e, f, g, h, i, j);
```

Onde:

- a: Definição do cenário de satélite. Valor esperado é uma variável de cenário de satélite criada com a função *satelliteScenario* explicada no tópico 4.3.2.2 deste trabalho;

- b: Altitude dos satélites, em metros (m), somada ao raio médio da Terra. Valor esperado é um número que representa a distância do satélite ao centro da Terra em metros. Exemplo  $550e3 + 6378.14e3$  é a altitude de 550 km somada ao raio da Terra (6378,14 km), dando uma órbita a aproximadamente 6928,14 km do centro da Terra;
- c: Inclinação dos satélites em relação ao Equador. Valor esperado é um ângulo em graus. Exemplo 53 representa uma inclinação de  $53^\circ$  em relação à linha do Equador;
- d: Número total de satélites na constelação. Valor esperado é um número inteiro que especifica quantos satélites compõem a constelação. Exemplo 1584 indica que há 1584 satélites no total;
- e: Número de planos orbitais ou constelações. Valor esperado é um número inteiro indicando quantos planos orbitais existem. Exemplo: 72 indica que há 72 planos orbitais;
- f: Fase entre os satélites nos diferentes planos orbitais. Valor esperado é um número inteiro que especifica o deslocamento entre os satélites em cada plano. Exemplo 1 configura uma fase inicial entre os satélites;
- g: Parâmetro *ArgumentOfLatitude* para definir a posição inicial dos satélites. A *string* '*ArgumentOfLatitude*', que indica que o próximo valor será o argumento de latitude inicial;
- h: Valor do argumento de latitude. Valor esperado é um número que representa o valor do argumento de latitude em graus. Exemplo 180 define o argumento de latitude inicial como  $180^\circ$ ;
- i: Parâmetro *Name* para definir um identificador para os satélites. A *string* '*Name*', que indica que o próximo valor será o nome dos satélites;
- j: Nome dos satélites na constelação. Valor esperado é uma *string* que serve como prefixo para nomear os satélites. Exemplo "" cria satélites sem prefixo de nome, mas poderia ser "Starlink" para nomeá-los.

Exemplo:

```
walkerDelta(sc, 550e3 + 6378.14e3, 53, 1584, 72, 1,
'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "Starlink");
```

No exemplo, a variável *sc* representa a utilização da função *satelliteScenario*. Os valores  $550e3 + 6378.14e3$  indicam, respectivamente, a distância do satélite ao centro da Terra e o raio terrestre. O ângulo de inclinação foi definido com o valor 53, correspondendo a  $53^\circ$ . O número total de satélites é 1584, distribuídos em 72 constelações, e a fase entre os satélites nos planos

orbitais é 1. O parâmetro *ArgumentOfLatitude* foi configurado com o valor 180 e o parâmetro *Name* foi utilizado para identificar a constelação, sendo definido com o nome "Starlink".

#### 4.3.2.4 Função walkerStar

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *walkerStar* é utilizada para montar constelações de satélites e faz parte da lista de objetos de cenários da *toolbox*. O *walkerStar* é caracterizado por criar cadeias de satélites com inclinação de 90°. Segundo The Mathworks, Inc. (1994) a função possui a seguinte sintaxe:

```
walkerStar(a, b, c, d, e, f, g, h, i, j);
```

Onde:

- a: Definição do cenário de satélite. Valor esperado é uma variável de cenário de satélite criada com a função *satelliteScenario* explicada no tópico 4.3.2.2 deste trabalho;
- b: Altitude dos satélites, em metros (m), somada ao raio médio da Terra. Valor esperado é um número que representa a distância do satélite ao centro da Terra em metros. Exemplo  $550e3 + 6378.14e3$  é a altitude de 550 km somada ao raio da Terra (6378,14 km), dando uma órbita a aproximadamente 6928,14 km do centro da Terra;
- c: Inclinação dos satélites em relação ao Equador. Valor esperado é um ângulo em graus. Exemplo 53 representa uma inclinação de 90° em relação à linha do Equador;
- d: Número total de satélites na constelação. Valor esperado é um número inteiro que especifica quantos satélites compõem a constelação. Exemplo 1584 indica que há 1584 satélites no total;
- e: Número de planos orbitais ou constelações. Valor esperado é um número inteiro indicando quantos planos orbitais existem. Exemplo: 72 indica que há 72 planos orbitais;
- f: Fase entre os satélites nos diferentes planos orbitais. Valor esperado é um número inteiro que especifica o deslocamento entre os satélites em cada plano. Exemplo 1 configura uma fase inicial entre os satélites;
- g: Parâmetro *ArgumentOfLatitude* para definir a posição inicial dos satélites. A string '*ArgumentOfLatitude*', que indica que o próximo valor será o argumento de latitude inicial;

- h: Valor do argumento de latitude. Valor esperado é um número que representa o valor do argumento de latitude em graus. Exemplo 180 define o argumento de latitude inicial como 180°;
- i: Parâmetro *Name* para definir um identificador para os satélites. A *string 'Name'*, que indica que o próximo valor será o nome dos satélites;
- j: Nome dos satélites na constelação. Valor esperado é uma *string* que serve como prefixo para nomear os satélites. Exemplo "" cria satélites sem prefixo de nome, mas poderia ser "Starlink" para nomeá-los.

Exemplo de uso da função:

```
walkerStar(sc, 550e3 + 6378.14e3, 53, 1584, 72, 1,
'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "Iridium");
```

No exemplo, a variável *sc* representa a utilização da função *satelliteScenario*. Os valores  $550e3 + 6378.14e3$  indicam, respectivamente, a distância do satélite ao centro da Terra e o raio terrestre. O ângulo de inclinação foi definido com o valor 53, correspondendo a 53°. O número total de satélites é 1584, distribuídos em 72 constelações, e a fase entre os satélites nos planos orbitais é 1. O parâmetro *ArgumentOfLatitude* foi configurado com o valor 180, enquanto o parâmetro *Name* foi utilizado para identificar a constelação, sendo definido com o nome "Iridium".

#### 4.3.2.5 Função *groundStation*

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *groundStation* tem como função criar bases terrestres com base nos parâmetros de latitude e longitude utilizados para a criação da base, assim como o parâmetro de cenário de satélite. A função *groundStation*, segundo The Mathworks, Inc. (1994), tem a sintaxe descrita a seguir:

```
groundStation(a, b, c, d, e);
```

Onde:

- a: Definição do cenário de satélite. Valor esperado é uma variável de cenário de satélite criada com a função *satelliteScenario* explicada no tópico 4.3.2.2 deste trabalho;
- b: Latitude da estação terrestre, em relação à linha do Equador. Valor esperado é um número em graus, onde valores positivos indicam latitudes no Hemisfério Norte e valores negativos no Hemisfério Sul. Exemplo 42,3001 representa uma latitude de 42,3001° Norte;

- c: Longitude da estação terrestre, em relação ao meridiano de Greenwich. Valor esperado: um número em graus, onde valores positivos indicam longitudes a leste de Greenwich e valores negativos a oeste. Exemplo 71,3504 representa uma longitude de 71,3504° Leste;
- d: Parâmetro Name para definir um identificador ou nome para a estação terrestre. A *string* literal "Name", que indica que o próximo valor será o nome da estação terrestre;
- e: Nome da estação terrestre. Valor esperado é uma *string* que serve como identificador da estação terrestre. Exemplo “Estação terrestre de origem” nomeia a estação como “Estação terrestre de origem”.

Exemplo:

```
groundStation(sc,42.3001,71.3504, "Name","Base terrestre de origem");
```

No exemplo, a variável *sc* representa a utilização da função *satelliteScenario*. Os valores 42,3001 e 71,3504 representam, respectivamente, a latitude e a longitude onde a base terrestre foi inserida na simulação. O parâmetro *Name* foi utilizado para identificar a base terrestre, sendo definido com o nome “Base terrestre de origem”.

#### 4.3.2.6 Função aer

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *aer* permite a obtenção do ângulo de elevação e distância entre o satélite ou estação terrestre de origem e o satélite ou estação terrestre de destino. A função *aer*, segundo The Mathworks, Inc. (1994), tem a sintaxe a seguir:

```
aer (a, b);
```

Onde:

- a: Estação terrestre ou satélite de origem. Valor esperado é uma variável contendo informações sobre o satélite de origem ou estação terrestre de origem, informações sendo as coordenadas geográficas (latitude, longitude, altitude). Exemplo *gsSource* é uma variável criada a partir da função *groundStation* explicado no tópico 4.3.2.5;
- b: Estação terrestre ou satélite de destino. Valor esperado é uma variável contendo informações sobre o satélite de destino ou estação terrestre de destino, informações sendo as coordenadas geográficas (latitude, longitude, altitude). Exemplo *gsTarget* é uma variável criada a partir da função *groundStation* explicado no tópico 4.3.2.5;

Exemplo:

```
aer (gsSource, sat);
```

No exemplo o *gsSource* representa uma *groundStation* criada na simulação, ela representa o ponto de origem da função. A variável *sat* representa uma constelação de satélites criada a partir de um dos comandos *walkerStar* ou *walkerDelta*, ela é o destino da função *aer*.

#### **4.3.2.7 Função satelliteScenarioViewer**

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *satelliteScenarioViewer* permite a visualização do cenário montado com o *satelliteScenario*. Com essa função, é possível focar em áreas específicas da simulação, como um satélite ou uma estação terrestre, fazendo com que a câmera da simulação gire em torno do alvo selecionado. A função *satelliteScenarioViewer*, segundo The Mathworks, Inc. (1994), tem a sintaxe descrita a seguir:

```
satelliteScenarioViewer(a, b, c);
```

Onde:

- a: Cenário de satélites a ser visualizado. Valor esperado é uma variável de cenário de satélite criada com a função *satelliteScenario* explicada no tópico 4.3.2.2 deste trabalho;
- b: definição para utilizar o parâmetro *ShowDetails*. A *string* “*ShowDetails*”, que indica que o próximo valor será *true* ou *false* para definir a visualização dos detalhes;
- c: Valor do *ShowDetails*. Valor esperado é *true* ou *false*, exibindo os detalhes se *true* e não exibindo se *false*.

Exemplo:

```
satelliteScenarioViewer(sc, "ShowDetails", false);
```

No exemplo, a função *satelliteScenarioViewer* recebe como parâmetro a variável *sc* que representa a utilização da função *satelliteScenario*, o outro parâmetro utilizado e a definição e utilização dos *ShowDetails* que é definido como *false*.

#### **4.3.2.8 Função access**

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *access* possibilita o acesso a informações sobre um objeto específico no cenário. Para realizar o acesso, é necessário que o objeto seja fornecido como parâmetro para a função. A função *access*, segundo The Mathworks, Inc. (1994), tem a sintaxe a seguir:

```
access(a);
```

Onde:

- a: Objeto ou variável presente no cenário de simulação. Valor esperado é uma variável que representa um nó no cenário de simulação, como um satélite ou uma estação terrestre. Por exemplo, uma variável que contém a lista de nós do cenário pode ser passada como argumento.

Exemplo:

```
access(nodes{:});
```

No exemplo. A função *access* é utilizada para acessar um nó da simulação.

#### 4.3.2.9 Função *accessIntervals*

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *accessIntervals* gera uma tabela com os períodos em que o status de acesso de cada objeto no vetor de entrada é alterado e possui a seguinte sintaxe:

```
accessIntervals (a);
```

Onde:

- a: Resultado da função de *access*, o valor esperado é uma variável contendo o resultado da função *access* apresentado no tópico 4.3.2.8.

Exemplo:

```
accessIntervals (ac)
```

No exemplo a variável *ac* representa o resultado da função *access*.

#### 4.3.2.10 Função *asind*

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *asind* calcula o inverso do seno do parâmetro passado para ele em graus. A Função *asind*, segundo The Mathworks, Inc. (1994), tem como sintaxe:

```
asind(a);
```

Onde:

- a: O valor do seno do ângulo para o qual se deseja calcular o inverso. O valor esperado é um número real no intervalo de -1 a 1.

Exemplo:

```
asind(1);
```

O exemplo mostra a função *asind* usada para calcular o inverso do ângulo de 1, no caso o resultado para essa aplicação da função seria 90°.

#### 4.3.2.11 Função *min*

Segundo The Mathworks, Inc. (1994), a função *min* serve para obter o menor valor dentro de um vetor. A função *min*, segundo The Mathworks, Inc. (1994), tem como sintaxe:

```
min(a);
```

Onde:

- a: Vetor de números. O valor esperado é um vetor de números reais ou complexos.  
A função retorna o menor valor dentro do vetor fornecido;

Exemplo:

```
A = [23 42 37 15 52];
```

```
M = min(A)
```

No exemplo a função *min* é utilizada para descobrir o menor valor no vetor A, o resultado para essa operação é o retorno do valor 15.

## 5 TESTES E RESULTADOS

Este capítulo descreve os experimentos realizados para obtenção de um melhor entendimento sobre o funcionamento da Starlink, por meio de teste realizados em simulações utilizando o *software* Matlab.

### 5.1 Teste A: Entendimento dos tipos de constelação

O objetivo desse tópico foi aprofundar no entendimento sobre os parâmetros utilizados nas simulações de constelações *wakerStar* e *walkerDelta*, possibilitando a visualização dos efeitos dos parâmetros na cobertura global.

#### 5.1.1 Descrição do código

O código utilizado para a realização dos testes com fins de entendimento é um código que faz uso de funções presentes no Matlab. Primeiramente, foi realizado a definição do cenário de satélite, atribuído à variável *sc*. Em seguida, se criou uma constelação de satélites utilizando a função *walkerDelta*, configurada com parâmetros como altitude, inclinação, número de satélites, número de constelações, fase entre satélites, latitude e nome. Esses valores são armazenados no vetor *sat*. Para melhorar a visualização das constelações, o comando *sat.ShowLabel* foi definido como *false*. Por fim, se utilizou o comando *satelliteScenarioViewer* para possibilitar a visualização da simulação, a variável *sc* foi passada como parâmetro, assim como o parâmetro *ShowDetails*, que foi configurado como verdadeiro para garantir a exibição das constelações. O código dessa simulação pode ser visualizado no Apêndice A.

#### 5.1.2 Variação dos parâmetros

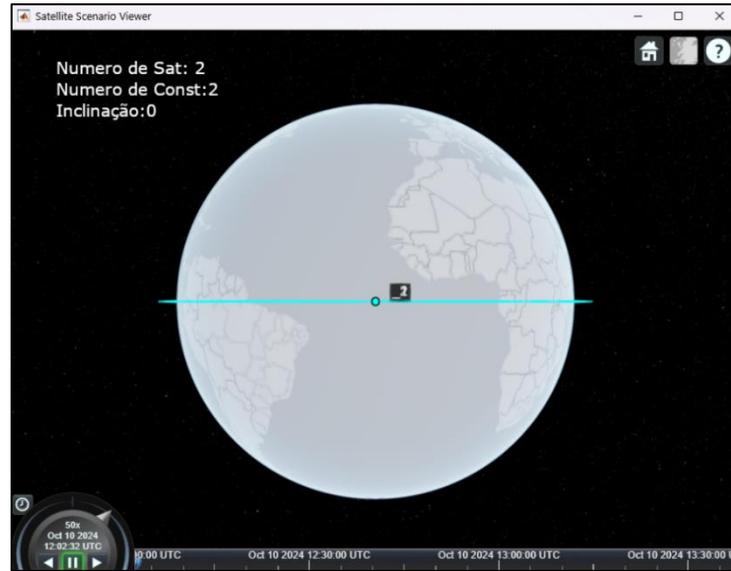
Realizaram-se diversos testes para aprimorar o entendimento dos parâmetros de inclinação, número de satélites e número de constelações. O primeiro teste teve como objetivo identificar os limites mínimos dos parâmetros das constelações *Walker Delta* no Matlab. Por meio desse teste, foi possível observar que a inclinação é medida em relação à linha do Equador, que o número mínimo de constelações e satélites é igual a dois e que a divisão entre o número total de satélites e o número de constelações deve resultar em um valor inteiro, caso contrário, o código retorna um erro. O Quadro 3 apresenta os parâmetros utilizados em cada teste.

Quadro 3: Parâmetros dos testes realizados

| <b>Teste</b> | <b>Inclinação</b> | <b>Nº total de satélites</b> | <b>Nº de constelações</b> |
|--------------|-------------------|------------------------------|---------------------------|
| A1           | 0                 | 2                            | 2                         |
| A2           | 5                 | 2                            | 2                         |
| A3           | 5                 | 5                            | 5                         |
| A4           | 10                | 5                            | 5                         |
| A5           | 10                | 10                           | 10                        |
| A6           | 10                | 20                           | 20                        |
| A7           | 25                | 20                           | 20                        |
| A8           | 25                | 50                           | 50                        |
| A9           | 50                | 50                           | 50                        |
| A10          | 50                | 75                           | 75                        |
| A11          | 50                | 100                          | 100                       |
| A12          | 75                | 10                           | 10                        |
| A13          | 75                | 25                           | 25                        |
| A14          | 75                | 50                           | 50                        |
| A15          | 75                | 75                           | 75                        |
| A16          | 75                | 100                          | 100                       |
| A17          | 75                | 200                          | 200                       |
| A18          | 53,2              | 100                          | 100                       |
| A19          | 90                | 100                          | 100                       |
| A20          | 53,2              | 100                          | 100                       |

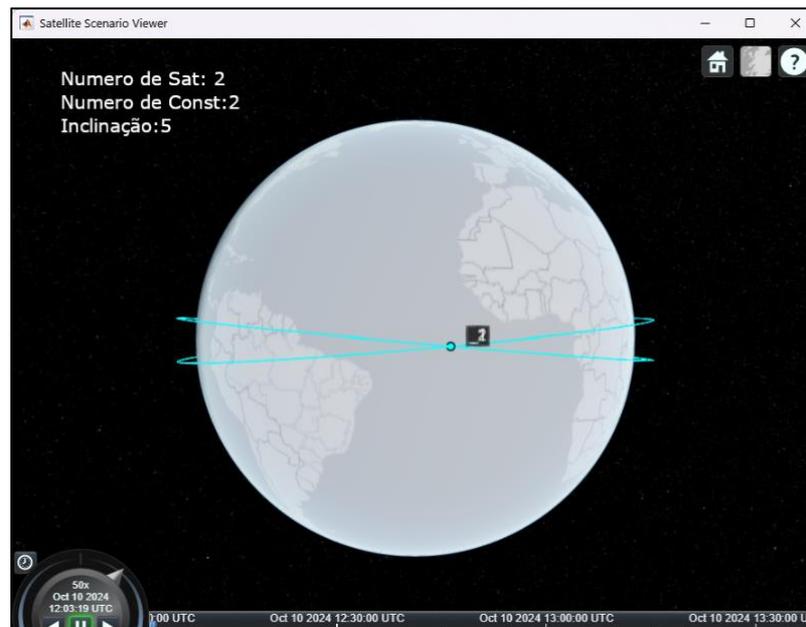
Fonte: Autoria própria

A Figura 26 ilustra o resultado teste A1, no qual o parâmetro de inclinação em relação a linha do Equador foi definido como 0°, o número de satélites como 2 e o número de constelações como 2. Observa-se que, com a inclinação em 0°, as constelações permanecem sobre a linha do Equador.

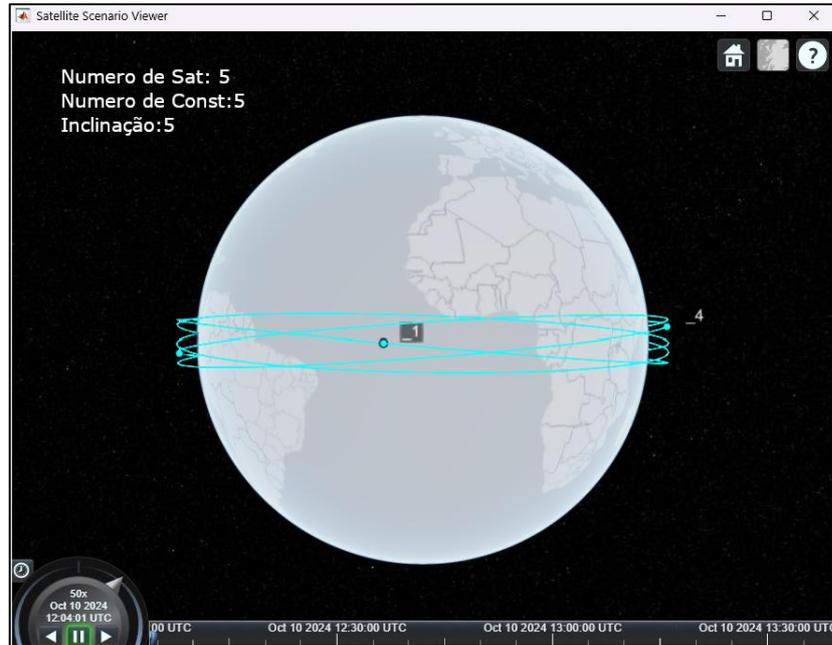
Figura 26: Teste A1 – Constelações *Walker Delta* com 2 constelações

Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

No segundo e no terceiro teste, aumentaram-se os valores da inclinação em relação a linha do Equador para  $5^\circ$  e manteve-se o número de satélites e constelações utilizado no primeiro. No terceiro, esses valores do número de total de satélites e número de constelações foram aumentados para 5, o que mostrou o início de uma melhor cobertura. As Figura 27 e a Figura 28 mostram, respectivamente, os resultados dos testes A2 e A3.

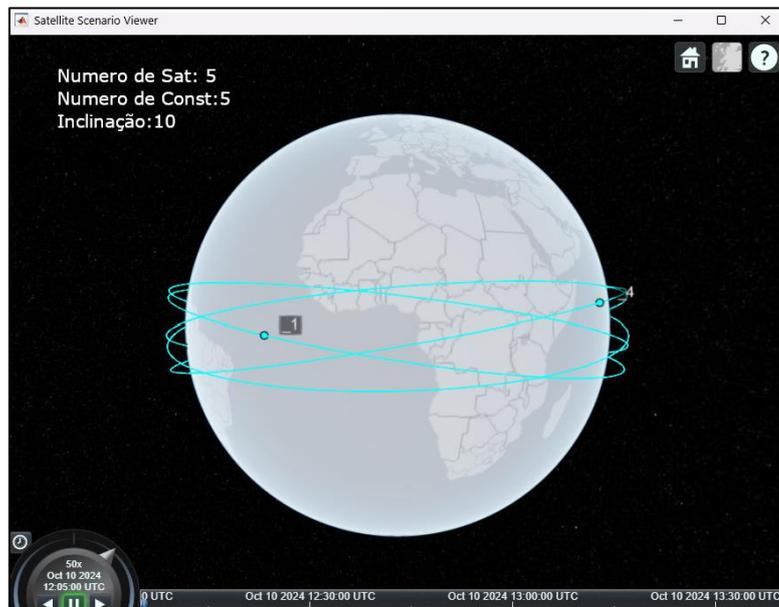
Figura 27: Teste A2 – Constelações *Walker Delta* com 2 constelações

Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Figura 28: Teste A3 – Constelações *Walker Delta* com 5 constelações

Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

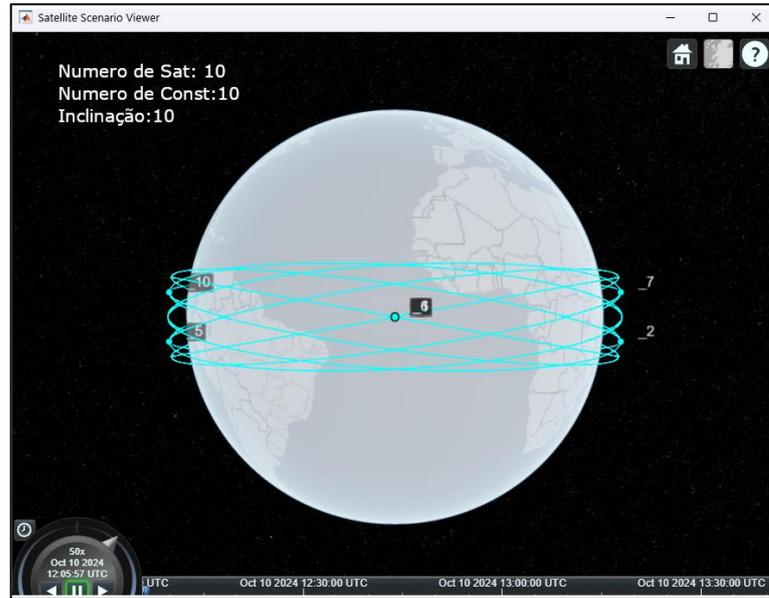
A Figura 29, representa o resultado do teste A4 no qual se foi aumentado o valor da inclinação das constelações de satélites em relação a linha do Equador.

Figura 29: Teste A4 – Constelações *Walker Delta* com 5 constelações

Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

A Figura 30, foi o resultado do teste A5 no qual se foi aumentado o número de constelações e o número de total de satélites para 10.

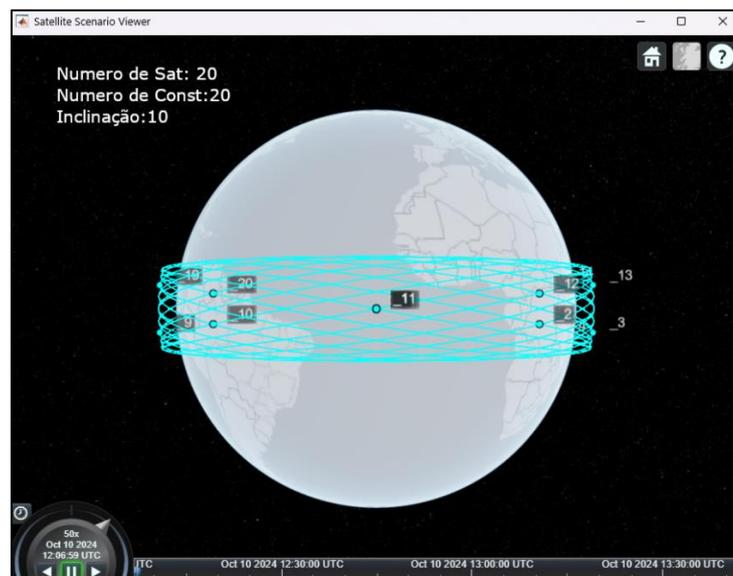
Figura 30: Teste A5 – Constelações *Walker Delta* com 10 constelações



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

No teste A6, o número de satélites e constelações foi aumentado para 20, como pode ser visualizado na Figura 31. Esse resultado demonstrou que o parâmetro que define o tamanho da cobertura global é a inclinação, enquanto a densidade da malha de rede é determinada pelo número de constelações.

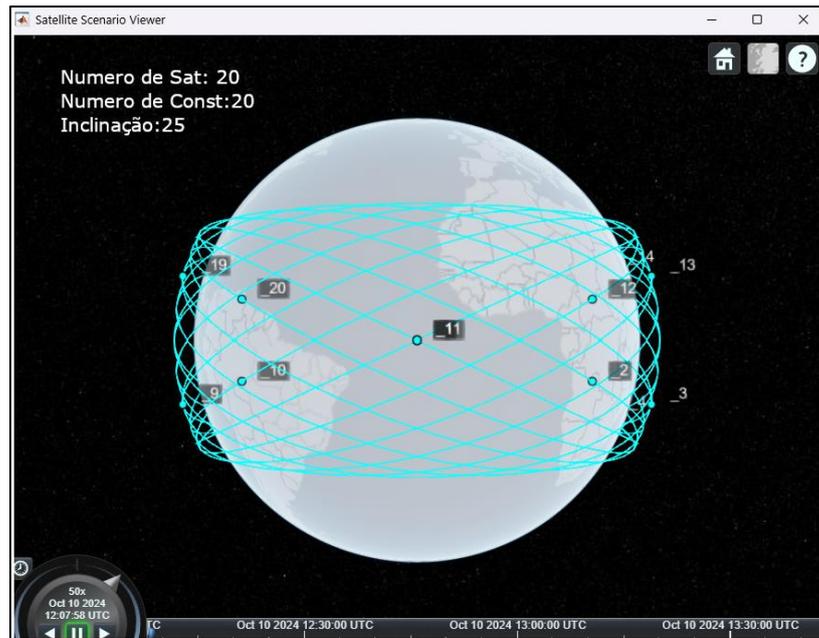
Figura 31: Teste A6 – Constelações *Walker Delta* com 20 constelações



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

No teste A7, aumentou-se o valor da inclinação em relação a linha do Equador, como visualizado na Figura 32. Observou-se que, ao aumentar a inclinação, a área de cobertura também aumentou, contudo, a densidade da malha de rede permaneceu inalterada, uma vez que o número de constelações não foi modificado.

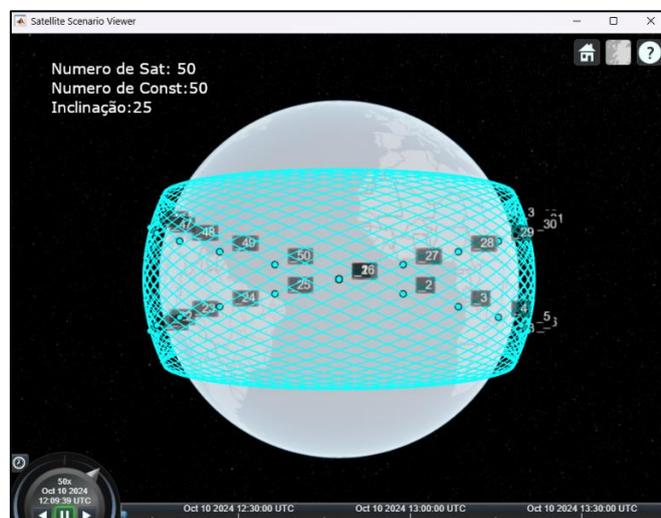
Figura 32: Teste A7 – Constelações *Walker Delta* com 20 constelações



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

No teste A8, aumentou-se a densidade da malha, como mostrado na Figura 33, ao elevar o número total de satélites e o número de constelações para 50.

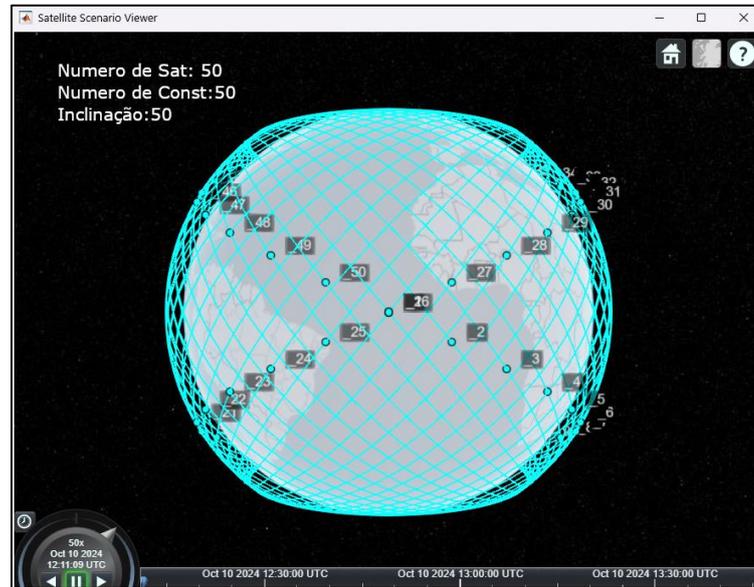
Figura 33: Teste A8 – Constelações *Walker Delta* com 50 constelações



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

No teste A9, aumentou-se a inclinação em relação a linha do Equador para  $50^\circ$ , conforme ilustrado na Figura 34. Na imagem, é possível observar que, com essa inclinação, apenas as regiões próximas aos polos permanecem sem cobertura de satélites.

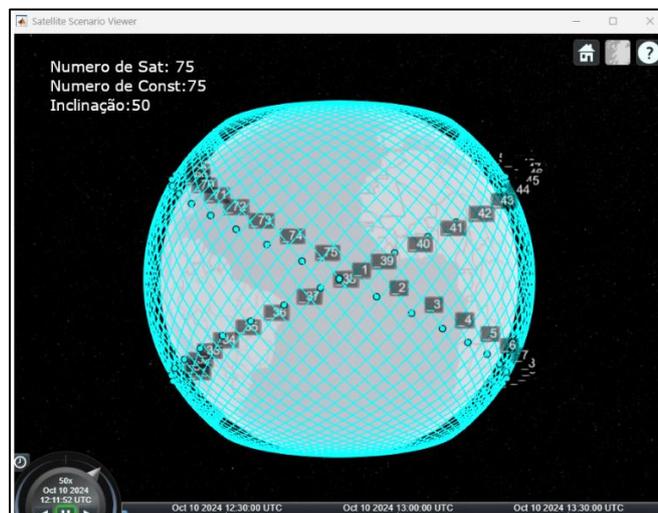
Figura 34: Teste A9 – Constelações *Walker Delta* com 50 constelações



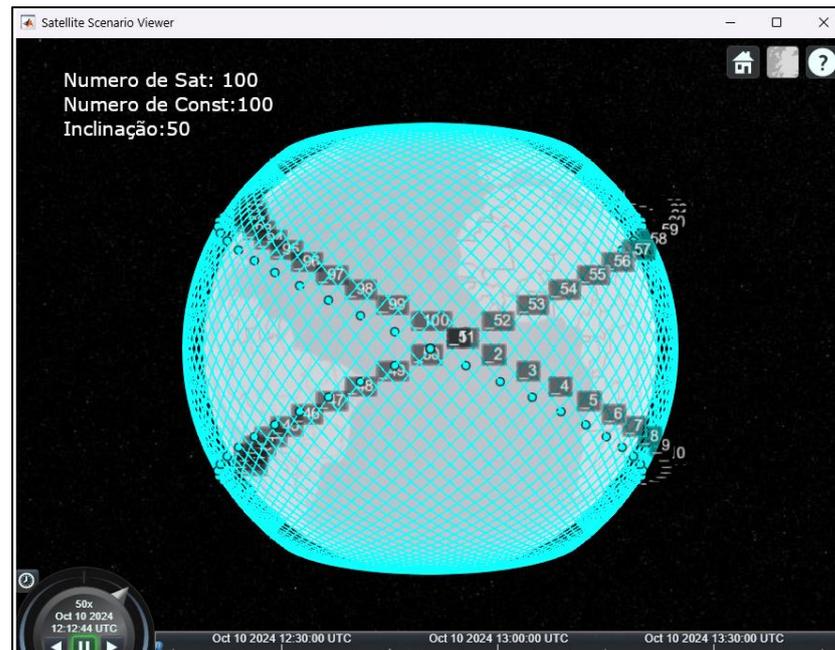
Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Nos testes A10 e A11, foram feitos para aumentar a malha de rede e aperfeiçoar a cobertura global, como pode ser visto na Figura 35 e Figura 36. Na Figura 35 ilustra como número total de satélites e o número de constelações um valor de 75, na Figura 36 o valor do número total de satélites e o número de constelações foi aumentado para 100.

Figura 35: Teste A10 – Constelações *Walker Delta* com 75 constelações

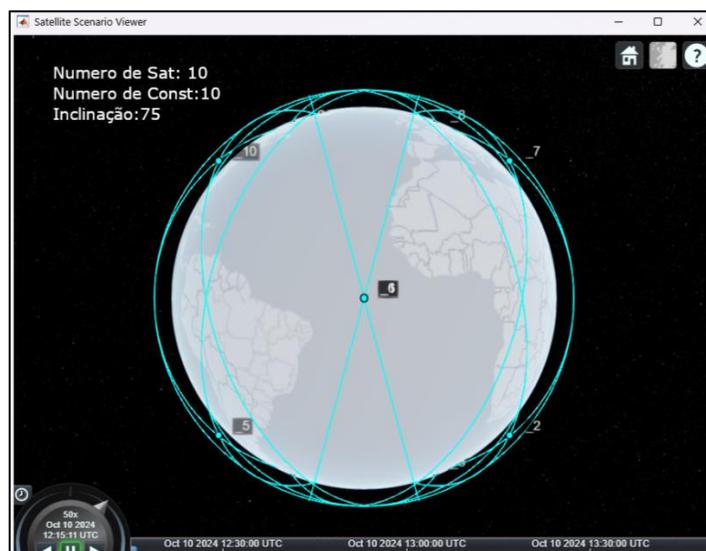


Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Figura 36: Teste A11 – Constelações *Walker Delta* com 100 constelações

Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

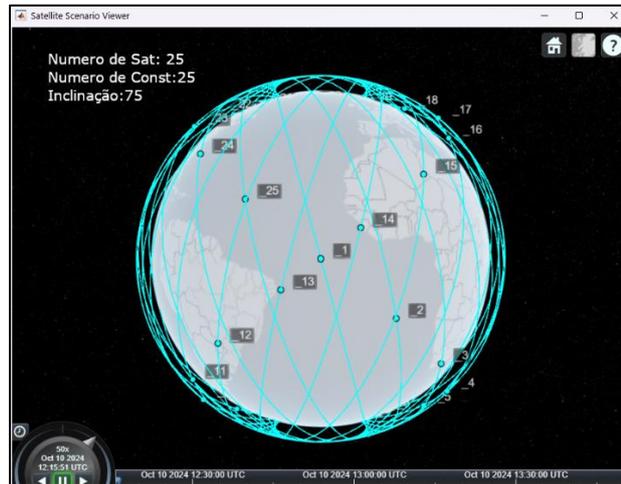
Nos testes subsequentes, utilizou-se uma inclinação de  $75^\circ$  em relação à linha do Equador, variando apenas o número de satélites e constelações para demonstrar a formação da malha de satélites. A Figura 37 ilustra o resultado do teste A12, mostrando que, com uma inclinação de  $75^\circ$  em relação à linha do Equador, a área de cobertura é alta. No entanto, com o número de satélites e constelações definido como 10, a malha apresenta lacunas entre as constelações.

Figura 37: Teste A12 - Constelações *Walker Delta* com 10 constelações

Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Em seguida, no teste A13 foram realizados testes com o aumento gradativo dos valores de satélites e constelações para uma segunda análise. Como pode ser observado na Figura 38, os números de satélites e constelações foram aumentados para 25.

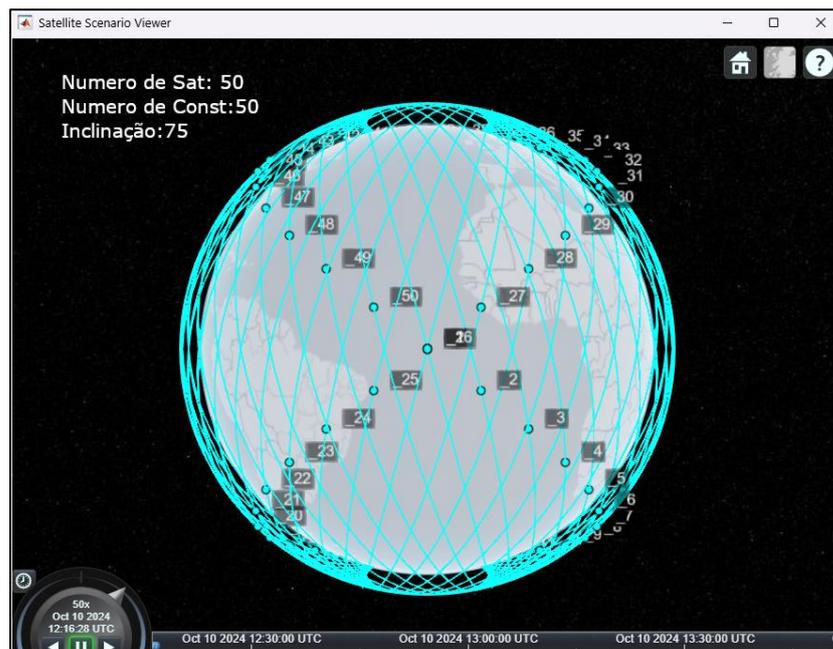
Figura 38: Teste A13– Constelações *Walker Delta* com 25 constelações



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Prosseguindo com os testes, a Figura 39 permite visualizar o resultado do teste A14 com o número de satélites e constelações definido como 50, onde foi formada uma malha de rede mais densa.

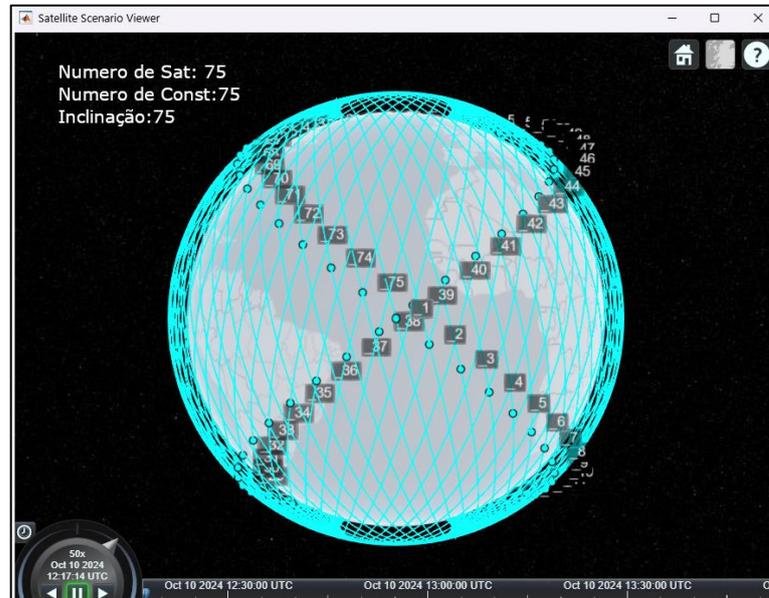
Figura 39: Teste A14– Constelações *Walker Delta* com 50 constelações



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Após o teste A14 com 50 constelações, foi realizado o teste A15 apresentado na Figura 40, no qual foram utilizadas 75 constelações. Este teste demonstrou uma malha de rede com pequenas lacunas quando comparado com o teste anterior.

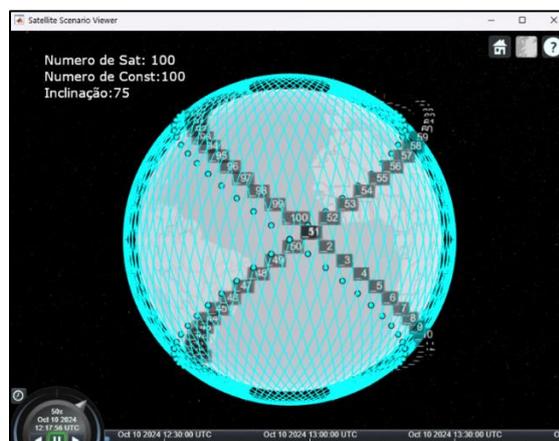
Figura 40: Teste A15 – Constelações *Walker Delta* com 75 constelações



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

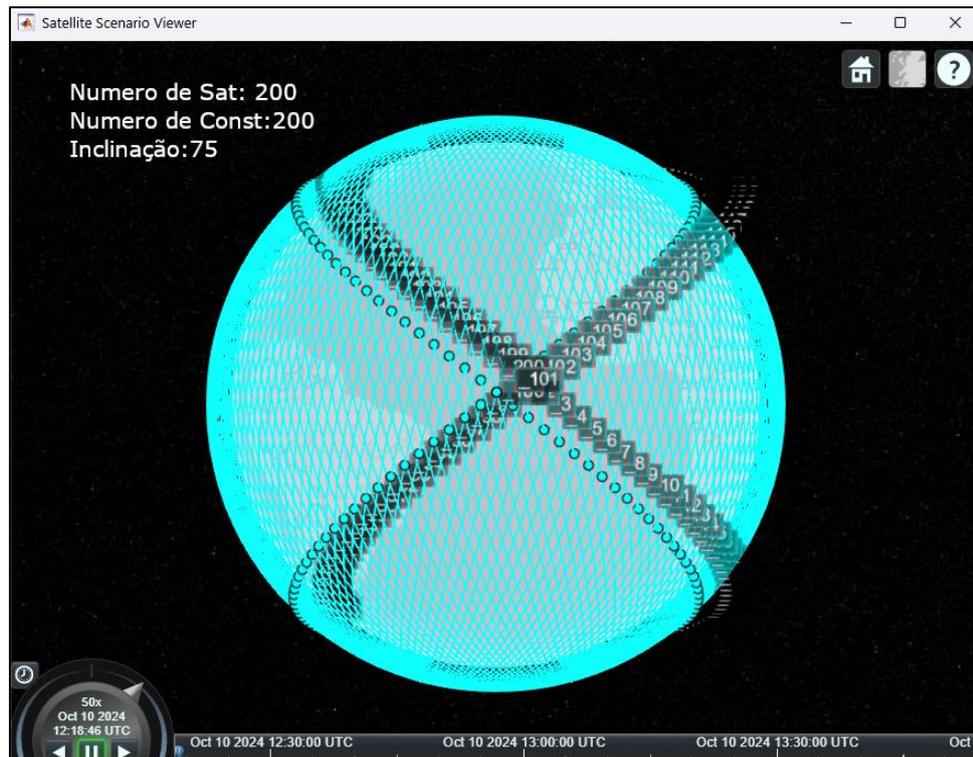
Como últimos testes para a variação dos parâmetros, foram realizado o experimento A16 com o número de satélites e constelações definidos em 100, conforme mostrado na Figura 41, e o experimento A17 com número total de satélites e constelações em 200, conforme apresentado na Figura 42. Nesses testes, é possível observar uma malha de rede ainda mais densa do que a do teste com 75 constelações.

Figura 41: Teste A16– Constelações *Walker Delta* com 100 constelações



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Figura 42: Teste A17– Constelações *Walker Delta* com 200 constelações



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

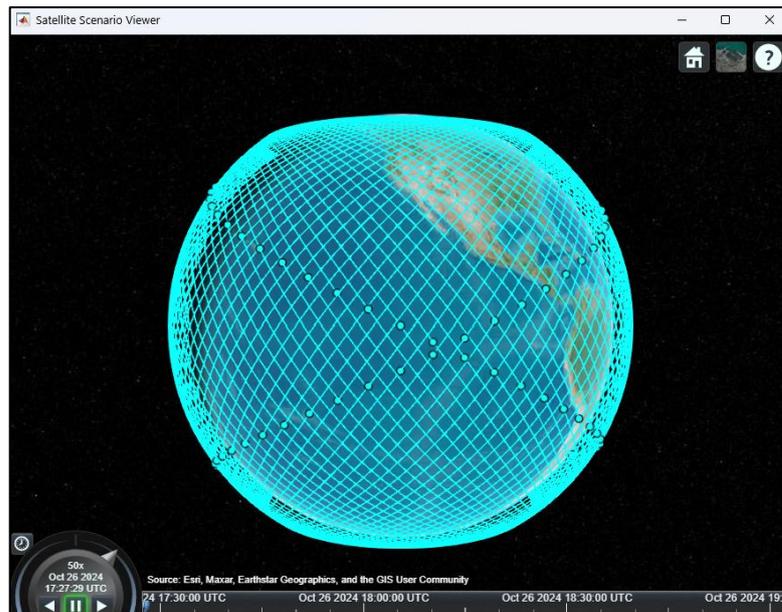
Os testes realizados com os parâmetros permitiram observar que a cobertura da rede de satélites está diretamente relacionada à inclinação das órbitas. Por outro lado, a densidade da malha formada pelas constelações é determinada pelo número de satélites em cada constelação. Assim, ao se definir os valores de inclinação como  $50^\circ$  ou  $75^\circ$  e se aumentar o número de constelações, é possível obter uma cobertura mais abrangente da Terra.

### 5.1.3 Relações com a cobertura global

Existem dois tipos de constelações *Walker*: a *Walker Delta*, que é a principal utilizada nos testes deste trabalho, e a *Walker Star*. Ambas possuem comandos disponíveis para uso no Matlab. No entanto, elas não oferecem o mesmo tipo de cobertura.

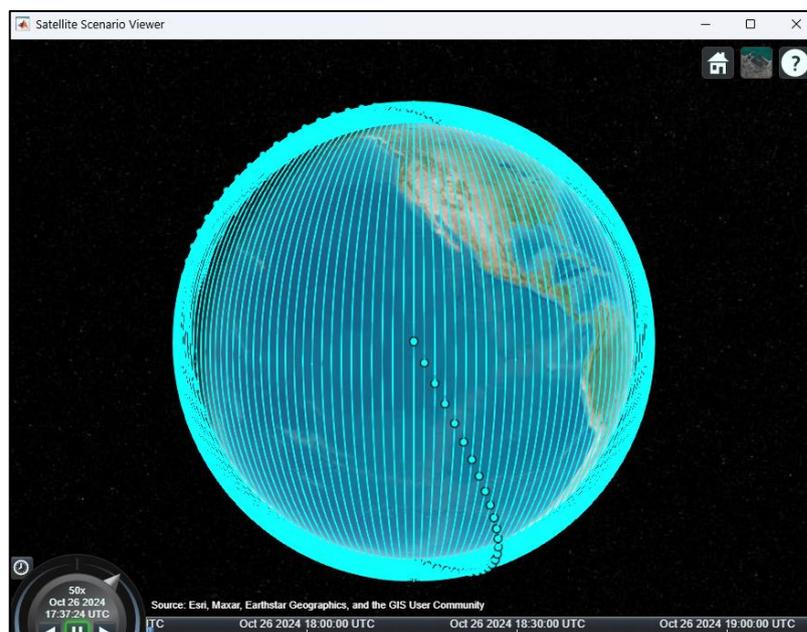
Como mencionado na secção 4.3.1 deste trabalho a Starlink utiliza das constelações *Walker Delta* e *Walker Star* para fornecer seus serviços. No entanto, as constelações *Walker Delta* não oferecem cobertura para as regiões polares, como pode ser observado na Figura 43. Nela, é possível visualizar a constelação *Walker Delta* resultante do Teste A18 do Quadro 3 da secção 5.1.2.

Figura 43: Constelações Walker Delta



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

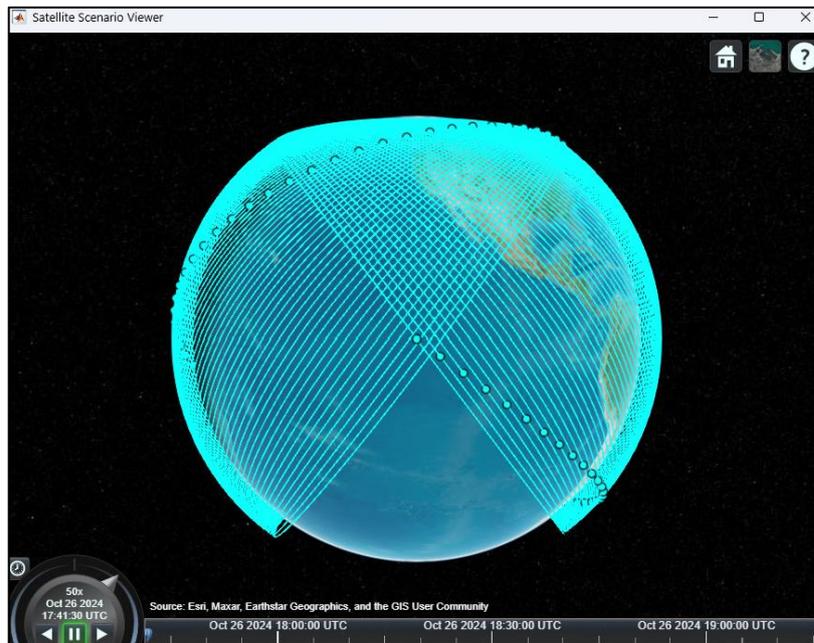
As constelações *Walker Star* têm a capacidade de passar pelos polos, geralmente apresentando inclinação de  $90^\circ$ . Um exemplo do uso desse tipo de constelação é o sistema Iridium. Para efeito de comparação, foi feita uma simulação no Matlab de uma de constelação *Walker Star*, utilizando os parâmetros do teste A19 do Quadro 3 da secção 5.1.2, que comparado com o teste A18 teve como uma única alteração no ângulo, que foi ajustado para  $90^\circ$ . O resultado é apresentado na Figura 44.

Figura 44: Walker Star com inclinação de  $90^\circ$ 

Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Foi realizado um teste adicional da constelação *Walker Star* utilizando os parâmetros do teste A20 do Quadro 3 da secção 5.1.2 o resultado pode ser visualizado na Figura 45. Os parâmetros utilizados são os mesmos do teste A18, porém utilizando a constelação *Walker Star*.

Figura 45: Walker Star com Inclinação de 53.2°



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Como pode ser observado na Figura 43, a constelação *Walker Delta* forma uma malha de cobertura global, na qual apenas os polos ficam sem cobertura. Por outro lado, a constelação *Walker Star*, com ângulo de inclinação de 90°, posiciona as constelações em órbitas polares, enquanto a *Walker Star* com o ângulo de inclinação de 53,2° não oferece cobertura para os polos assim como proporciona áreas sem cobertura de satélites, dessa forma não viabilizando uma cobertura global.

Segundo Leyva-Mayorga et al. (2022), a Starlink utiliza constelações mistas, aproveitando as vantagens de cada tipo com base em suas características. A constelação *Walker Delta*, embora não cubra os polos, é eficaz para manter os satélites nas áreas de maior densidade populacional, onde o tráfego de dados é mais intenso. A constelação *Walker Star* cobre as regiões polares, garantindo assim uma cobertura global. As simulações realizadas mostraram que, para alcançar essa cobertura completa, incluindo as áreas polares, é essencial combinar constelações *Walker Star*, com uma inclinação de 90° para cobertura polar, e constelações *Walker Delta*, que asseguram a conectividade nas áreas mais densamente povoadas. Essa

estratégia permitiu à Starlink otimizar o uso dos satélites e atender a uma maior diversidade de regiões ao redor do globo.

## **5.2 Teste B: Simulação da constelação de satélites da Starlink**

O objetivo desta seção foi realizar a simulação das constelações de satélites da Starlink utilizando parâmetros que representem, de forma aproximada, as características reais dessas constelações.

### ***5.2.1 Descrição do código***

O código utilizado para a simulação das constelações da Starlink apresenta grande similaridade com o descrito na seção 5.1.1, especialmente na implementação das funções *satelliteScenario* e *satelliteScenarioViewer*. No entanto, para representar as constelações da Starlink, foram empregadas cinco funções *walkerDelta*, cada uma armazenada em variáveis nomeadas como *sat*, *sat2*, *sat3*, *sat4* e *sat5*. Essas variáveis utilizam o comando *ShowLabel* configurado como *false*, ocultando os identificadores dos satélites durante a simulação. O código completo dessa simulação encontra-se detalhado no Apêndice B.

### ***5.2.2 Simulação com os parâmetros da Starlink***

Para realizar o teste com as constelações da Starlink, foi necessário obter informações relevantes, como o número de satélites, a inclinação orbital, o número de constelações e a altitude. Segundo Leyva-Mayorga et al. (2022), os parâmetros das constelações da Starlink são de acordo com o que está apresentado no Quadro 4. Para realizar a simulação de acordo com os parâmetros do artigo foram utilizados cinco comandos *walkerDelta*, cada um configurado para um conjunto específico de parâmetros, conforme descrito no Quadro 4. Não foram aplicados os comandos *walkerStar* para inclinações próximas a 90°, uma vez que, visando alcançar uma cobertura global, optou-se pelo uso de funções *walkerDelta* com ângulos das constelações B4 e B5. Ao se testar a função *walkerStar*, observou-se os mesmos problemas destacados na Figura 42 da seção 5.1.3, em que a cobertura global não foi alcançada.

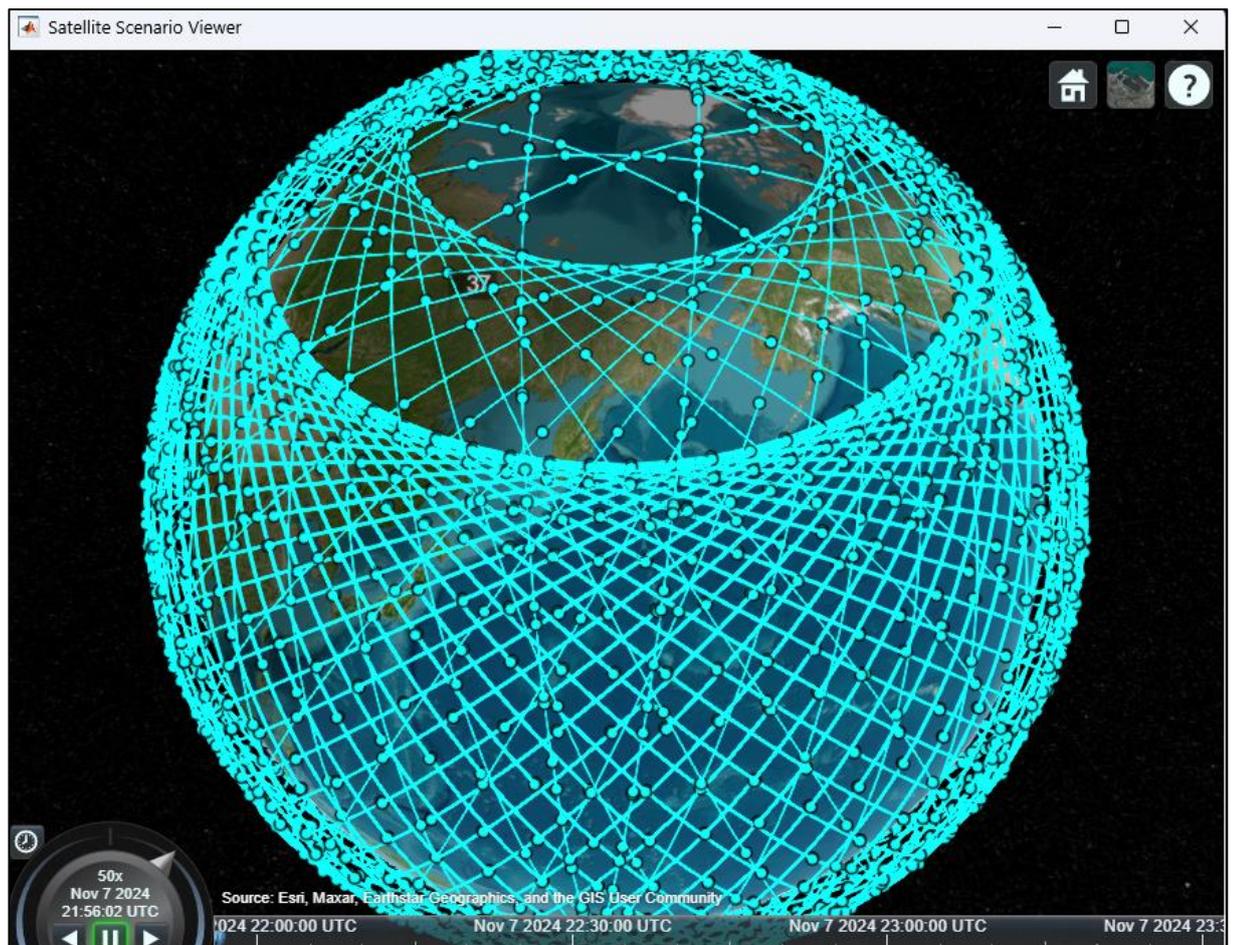
Quadro 4: Parâmetros de simulação das constelações do Starlink

| Constelações | Inclinação | Nº total de satélites | Nº de constelações | Altitude |
|--------------|------------|-----------------------|--------------------|----------|
| B1           | 53         | 1584                  | 72                 | 550      |
| B2           | 53,2       | 1584                  | 72                 | 540      |
| B3           | 70         | 720                   | 36                 | 570      |
| B4           | 97,6       | 348                   | 6                  | 560      |
| B5           | 97,6       | 172                   | 4                  | 560      |

Fonte: Leyva-Mayorga et al. (2022)

A Figura 46 ilustra o resultado da simulação utilizando os parâmetros definidos no Quadro 4.

Figura 46: Simulação Quadro 4



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Os satélites apresentam uma maior densidade nas áreas próximas de  $50^\circ$  de latitude, devido ao maior número de satélites em constelações Walker Delta com essa inclinação. Utilizando inclinações superiores a  $60^\circ$ , é possível cobrir regiões próximas aos polos.

As simulações permitiram uma compreensão mais aprofundada sobre o funcionamento das constelações *Walker* utilizadas pela Starlink, que combinam características de constelações *Walker Delta* e *Walker Star*. Essa configuração mista possibilita a criação de uma cobertura global de *Internet* via satélite, garantindo maior alcance de cobertura proporcionando acesso para áreas próximas aos polos.

### 5.3 Teste C: Roteamento ISL com satélites estáticos

Este tópico apresenta os testes realizados para o roteamento estático nas constelações de satélites, utilizando parâmetros semelhantes aos da Starlink.

#### 5.3.1 Descrição do código

O código de roteamento implementado é um algoritmo para determinar o caminho ótimo em redes de comunicação por satélite. A simulação considera uma constelação de satélites LEO e duas estações terrestres fixas: uma de origem e outra de destino. O objetivo é estabelecer uma conexão entre essas duas estações, utilizando links ISLs já descritos no item 2.4 desse trabalho.

O primeiro passo do código é a definição do tempo de simulação, seguido pela criação das constelações *Walker Delta* e das estações terrestres. Em seguida, são calculados os ângulos de elevação dos satélites em relação às estações terrestres, a fim de determinar a visibilidade entre eles. Após isso, o primeiro nó é determinado, e um *loop* iterativo é iniciado para encontrar os demais nós, onde o próximo nó deve estar visível em relação ao anterior e mais próximo do destino. O processo do *loop* continua até que a estação terrestre de destino seja alcançada. Por fim, há uma parte do código responsável por gerar a visualização gráfica do resultado.

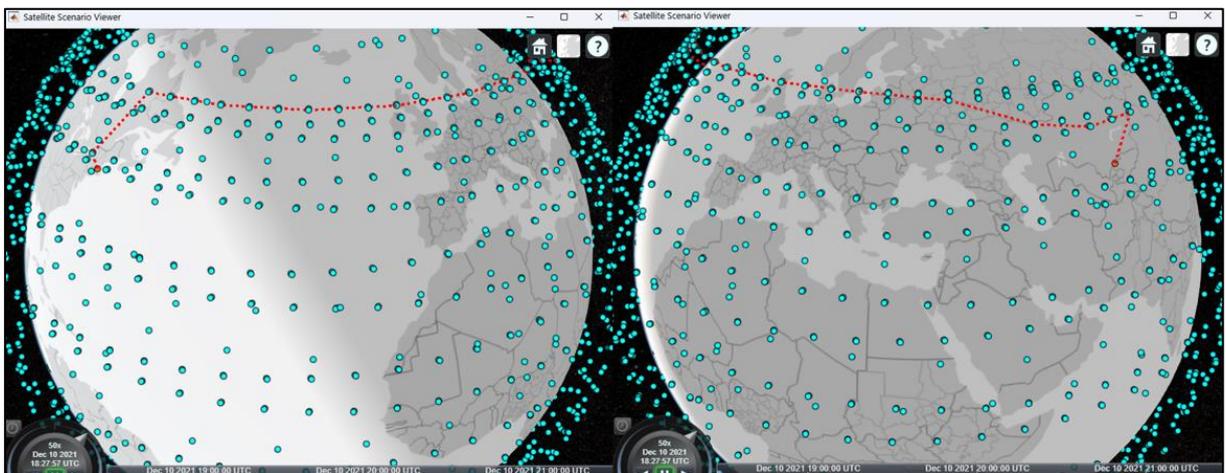
O código de roteamento utilizado permite apenas uma configuração de constelação por vez. Nos testes realizados, foram consideradas as configurações de constelações de satélites do Starlink do Quadro 4 da secção 5.2. O código completo dessa simulação encontra-se detalhado no Apêndice C.

### 5.3.2 Comunicação no sentido leste-oeste

O primeiro teste simula a transmissão entre duas estações terrestres que estão no mesmo hemisfério e que usam a rede de satélites para se comunicarem. Nos testes, constatou-se que, a comunicação leste-oeste realizada por meio dos satélites ocorre de maneira similar em ambos os hemisférios, sul e norte, porém com uma diferença notável, conforme é descrito a seguir.

Na Figura 47, observa-se o cenário de simulação no hemisfério norte. Foram aplicados os parâmetros da constelação Starlink descritos na seção 5.2, utilizando especificamente a configuração de constelação B1 do Quadro 4. O roteamento começa com rotas ISL ascendentes partindo da origem em direção aos polos. Em seguida, o trajeto segue pela borda polar definida pela configuração de constelação e utiliza rotas ISL descendentes para alcançar o destino, a imagem da esquerda é a rota saindo do ponto de origem e a imagem a direita é a rota chegando no destino.

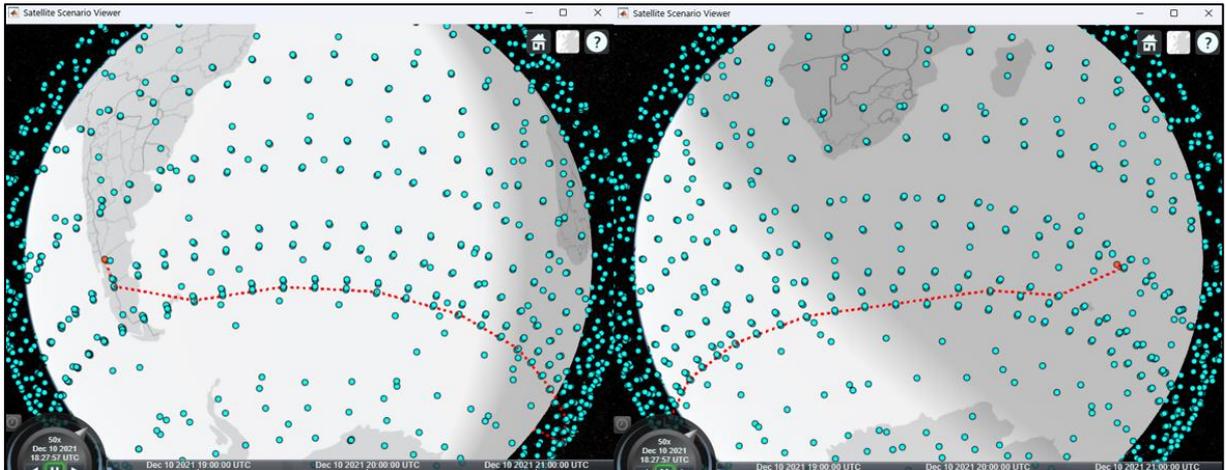
Figura 47: Rota ISL leste-oeste no hemisfério Norte



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Na Figura 48, apresenta-se o exemplo no hemisfério sul, em que é possível visualizar o processo de roteamento indo em direção ao polo sul e, posteriormente, subindo em direção ao destino. Nessa simulação, observa-se o processo inverso ao da imagem da Figura 47, em que, ao estar no hemisfério sul, a rota ISL parte do satélite de origem descendo até o polo sul, para depois seguir do polo sul até o destino. Na imagem à esquerda, tem-se a rota da origem até o polo sul, enquanto na imagem à direita, está representado o trajeto do polo sul até o destino.

Figura 48: Rota ISL leste-oeste no hemisfério Sul



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

A configuração B2 do Quadro 4 da seção 5.2 apresenta os mesmos resultados das Figuras 47 e Figura 48, uma vez que se tem como diferença entre B1 e B2 uma inclinação em relação a linha do Equador de  $0,2^\circ$ . Os testes realizados com os valores das constelações B3, B4 e B5 a trajetória do roteamento ISL não foram possíveis de serem concluídas, pois retornaram apenas a simulação das constelações, mas não houve trajetória traçada.

O Quadro 5 é uma comparação dos resultados obtidos pelos testes.

Quadro 5: Resultados dos testes de roteamento ISL no sentido leste-oeste

| Constelações                           | Direção          | Nº de satélites na rota ISL | Nº de constelações na rota ISL |
|--|------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Teste B1 (inclinação de $53^\circ$ )   | Hemisfério Norte | 11                          | 11                             |
| Teste B2 (inclinação de $53,2^\circ$ ) | Hemisfério Norte | 11                          | 11                             |
| Teste B1 (inclinação de $53^\circ$ )   | Hemisfério Sul   | 10                          | 9                              |
| Teste B2 (inclinação de $53,2^\circ$ ) | Hemisfério Sul   | 10                          | 9                              |

Fonte: Autoria Própria

Com os resultados obtidos, foi possível perceber um padrão indicando que:

- Para estabelecer uma conexão leste-oeste entre duas estações situadas em pontos diferentes do globo, o roteamento em constelações *Walker Delta* de inclinação próximas a  $53^\circ$  tende a direcionar-se em direção aos polos para traçar a rota, enquanto as outras inclinações apresentadas não conseguem realizar essa conexão de forma eficiente;

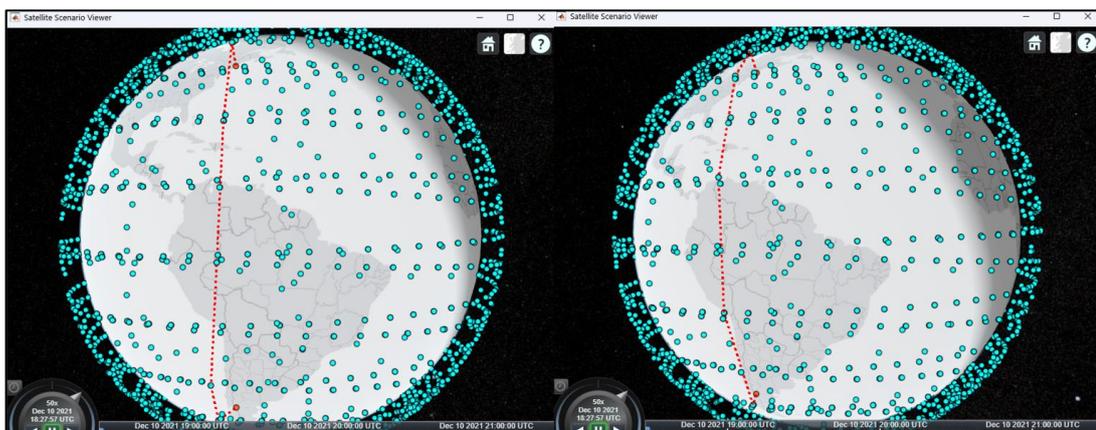
- As comunicações leste-Oeste das conexões B1 e B2 priorizam rotas de satélites Ascending to Descending, Ascendentes com Descendentes (A2D) e depois Descending to Ascending, Descendente com Ascendente (D2A) fora de regiões polares, alinhando-se com as observações de Stock, Fraire e Hermanns (2022).

### 5.3.3 Comunicação no sentido norte-sul

O principal objetivo da comunicação norte-sul foi determinar a seleção dos satélites durante a transmissão. No caso da comunicação que parte do norte em direção ao sul, são selecionados satélites descendentes. Em contrapartida, para a comunicação que vai do sul para o norte, são utilizados satélites ascendentes, assegurando que a comunicação ocorra de maneira eficaz. Para a realização dos testes de norte-sul e sul-norte, foi preciso alterar o ângulo de elevação mínimo permitido entre os satélites no código, que era de -5 para o valor -15, o que permite a escolha de satélites mais distantes uns dos outros.

Para isso, foi realizada uma simulação tendo com um ponto de origem no hemisfério norte, direcionando-se para o hemisfério sul e, em seguida, outra do hemisfério sul ao hemisfério norte, conforme ilustrado na Figura 49. Nela, é possível visualizar a trajetória do caminho com a configuração de constelação B1 do Quadro 4 da Secção 5.2, representada pela linha vermelha tracejada, evidenciando a melhor rota entre a origem e o destino. Na esquerda da imagem é apresentada a trajetória de norte a sul e à direita a trajetória de sul para norte.

Figura 49: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B1

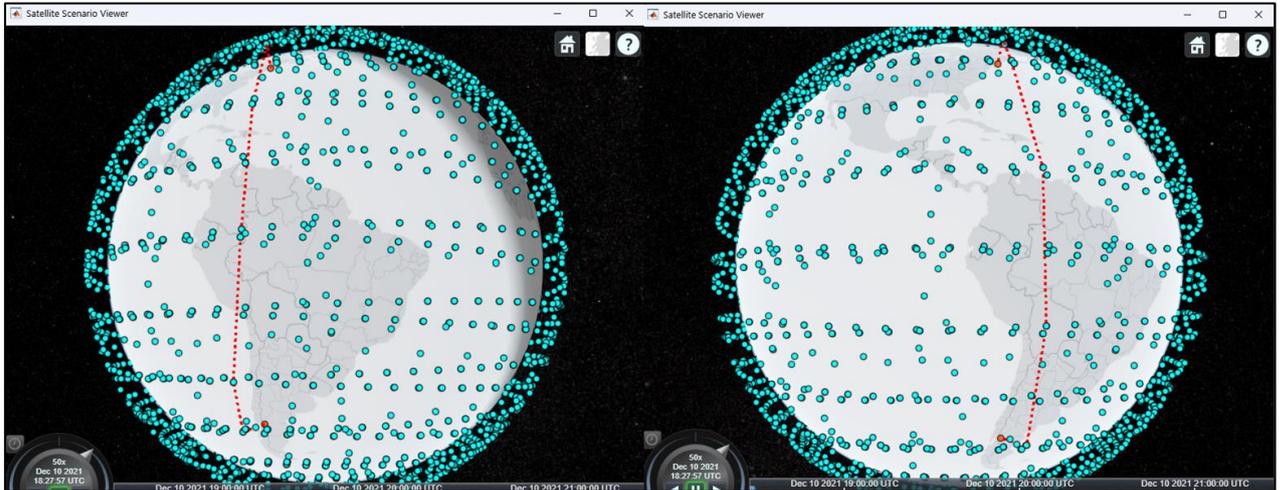


Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

A Figura 50 representa o resultado da simulação de uma trajetória norte-sul e sul-norte para a configuração de simulação da Constelação B2 do Quadro 4. Na Figura 50 é possível

visualizar à esquerda da imagem o resultado da simulação norte-sul e a direita o resultado sul-norte.

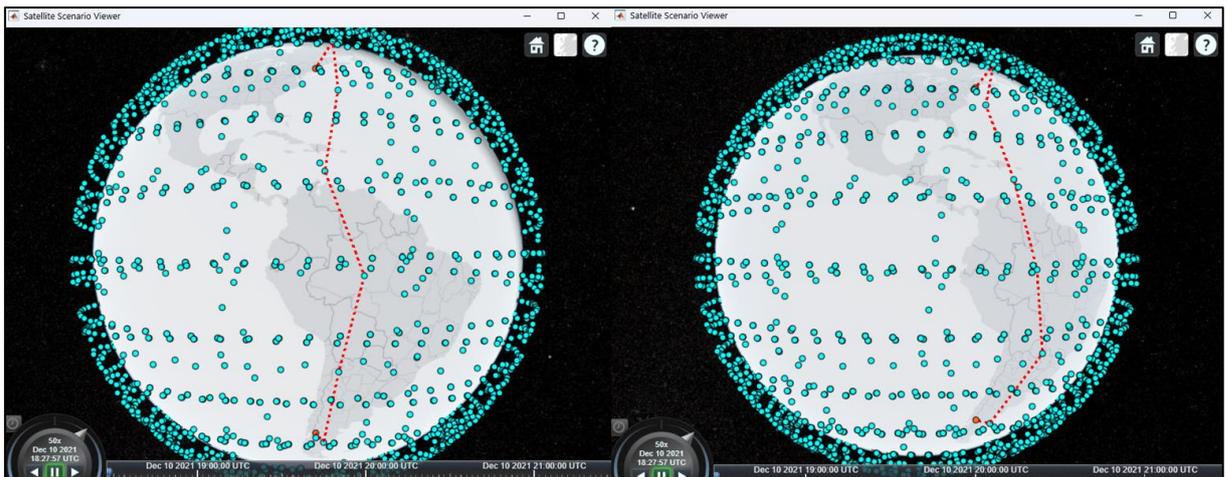
Figura 50: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B2



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

A rota ISL dos testes realizados com os parâmetros da Constelação B3, Quadro 4 podem ser visualizados na Figura 51, onde à direita foi realizada o teste do norte ao sul e a esquerda da imagem foi realizado teste do sul ao norte.

Figura 51: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B3

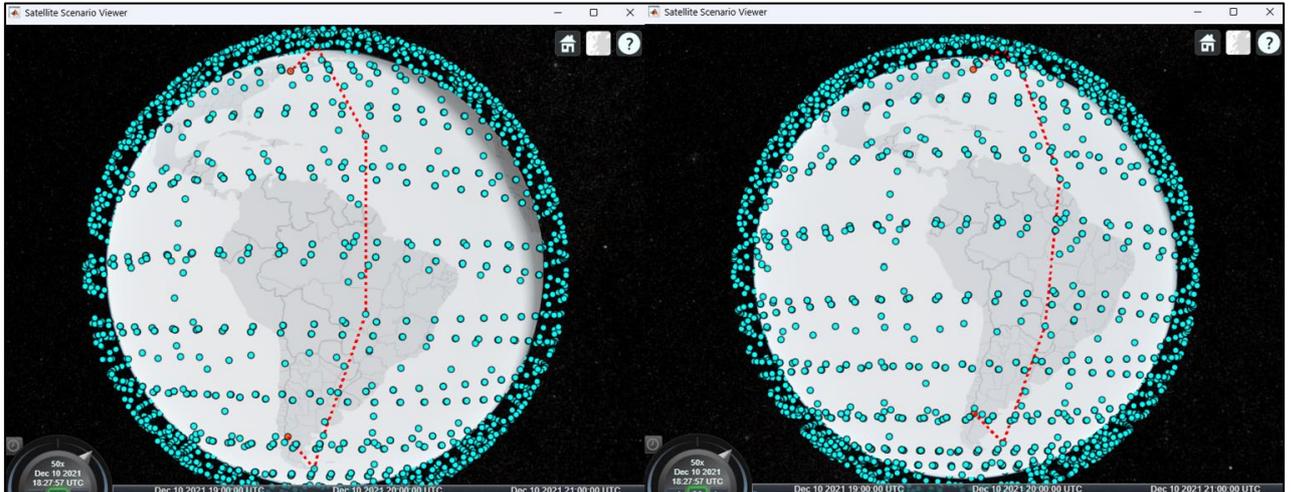


Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Os testes realizados com os parâmetros da constelação B4, Quadro 4 apresentaram resultados semelhantes entre as comunicações Norte-Sul e Sul-Norte com as rotas ISL traçadas

utilizando de alguns mesmos satélites. Os resultados do teste podem ser visualizados na Figura 52, onde à esquerda é visualizada a simulação de norte-sul e a direita a simulação de sul-norte.

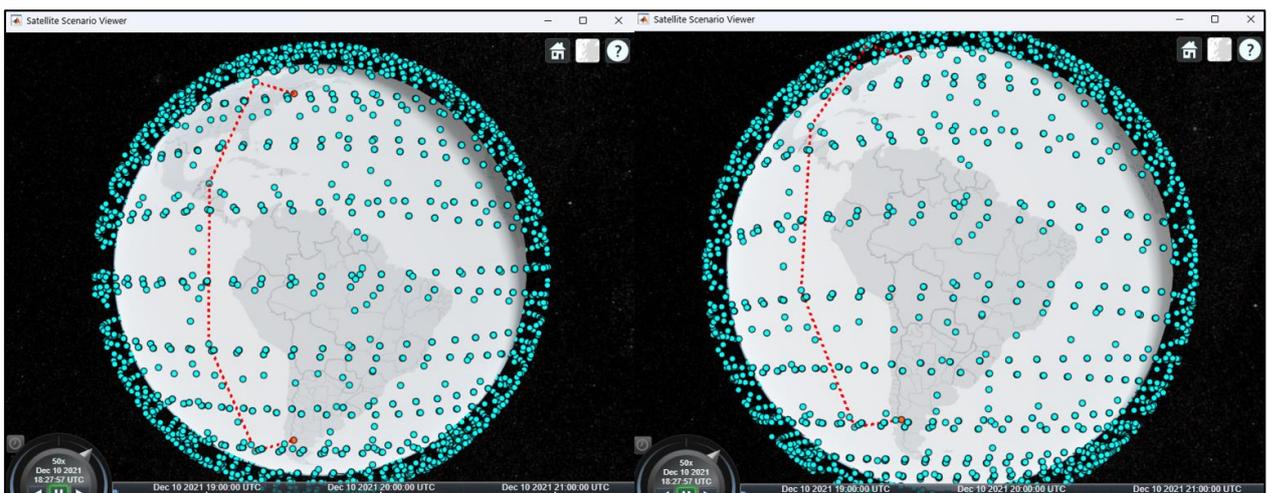
Figura 52: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B4



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Os testes realizados com a constelação B5, Quadro 4 apresentou rotas ISL iguais para o roteamento de norte-sul e sul-norte utilizando dos mesmos satélites em ambas as simulações. Os resultados do teste podem ser visualizados na Figura 53, onde à esquerda é visualizado a simulação de norte-sul e a direita a simulação de sul-norte.

Figura 53: Rota ISL norte-sul (à esquerda) e sul-norte (à direita) - Constelação B5



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

O Quadro 6 é uma comparação dos resultados obtidos pelos testes.

Quadro 6: Resultados dos testes de roteamento ISL norte-sul

| Constelações                   | Direção   | Nº de satélites na rota ISL | Nº de constelações na rota ISL |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------|--------------------------------|
| Teste B1 (inclinação de 53°)   | norte-sul | 5                           | 5                              |
| Teste B2 (inclinação de 53,2°) | norte-sul | 5                           | 5                              |
| Teste B3 (inclinação de 70°)   | norte-sul | 6                           | 5                              |
| Teste B4 (inclinação de 97,6°) | norte-sul | 5                           | 2                              |
| Teste B5 (inclinação de 97,6°) | norte-sul | 4                           | 2                              |
| Teste B1 (inclinação de 53°)   | sul-norte | 5                           | 5                              |
| Teste B2 (inclinação de 53,2°) | sul-norte | 6                           | 6                              |
| Teste B3 (inclinação de 70°)   | sul-norte | 6                           | 5                              |
| Teste B4 (inclinação de 97,6°) | sul-norte | 5                           | 2                              |
| Teste B5 (inclinação de 97,6°) | sul-norte | 4                           | 2                              |

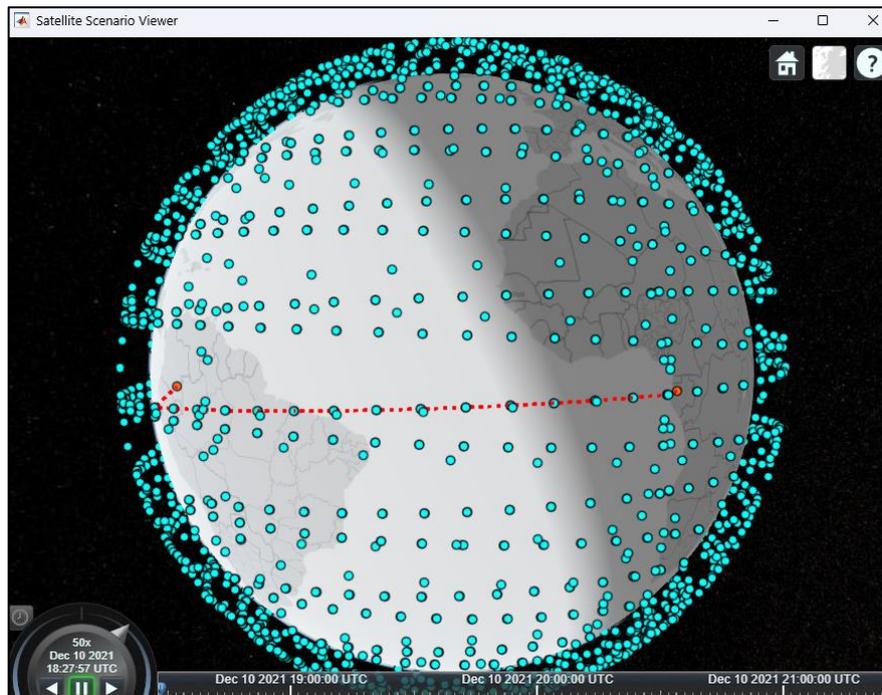
Fonte: Autoria própria

Por meio dos resultados dos testes foi possível perceber que, para comunicações entre as regiões norte e sul, ao contrário das comunicações leste-oeste, possuem resultados para todos os parâmetros, o que pode indicar que os satélites de constelações com ângulos próximos a 90° são mais bem utilizados para comunicações deste tipo de rota. Uma característica que pode se perceber nas simulações de B1, B2 e B3 é que as rotas traçadas foram diferentes para norte sul e o sul-norte, porém, indicando a utilização de rotas ISL *Ascending to Ascending*, Ascendentes com Ascendentes (A2A) para o sul-norte, assim como, a utilização de rotas ISL *Descending to Descending*, Descendente com Descendente (D2D) para as comunicações norte-sul, como padrão, resultados esses, coerentes como o que é descrito por Stock, Fraire e Hermanns (2022).

#### 5.3.4 Comunicação entre nós na linha do Equador

Foram realizados testes com as duas estações terrestres localizadas sobre a linha do Equador. Para esses testes foi utilizado os parâmetros da Starlink com os valores do Quadro 4 da seção 5.2. Na Figura 54 é possível visualizar o resultado da simulação para os parâmetros da constelação de B1.

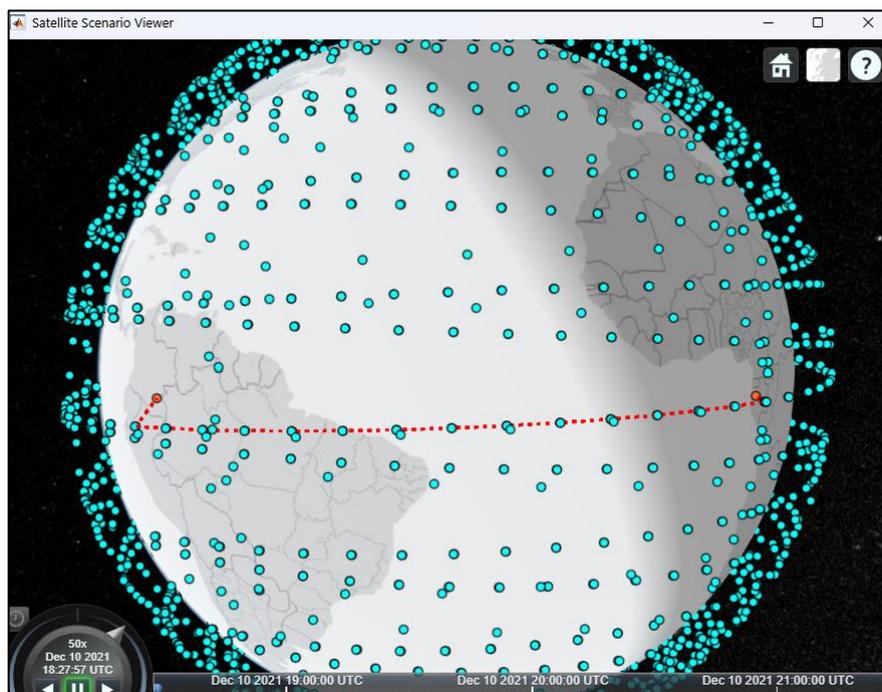
Figura 54: Rota ISL entre nós na linha do Equador – Constelação B1



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Foram realizados testes também para a constelação B2, Quadro 4. O resultado pode ser visualizado na Figura 55, onde assim como para a constelação B1, a trajetória traçada foi uma linha reta sobre o Equador.

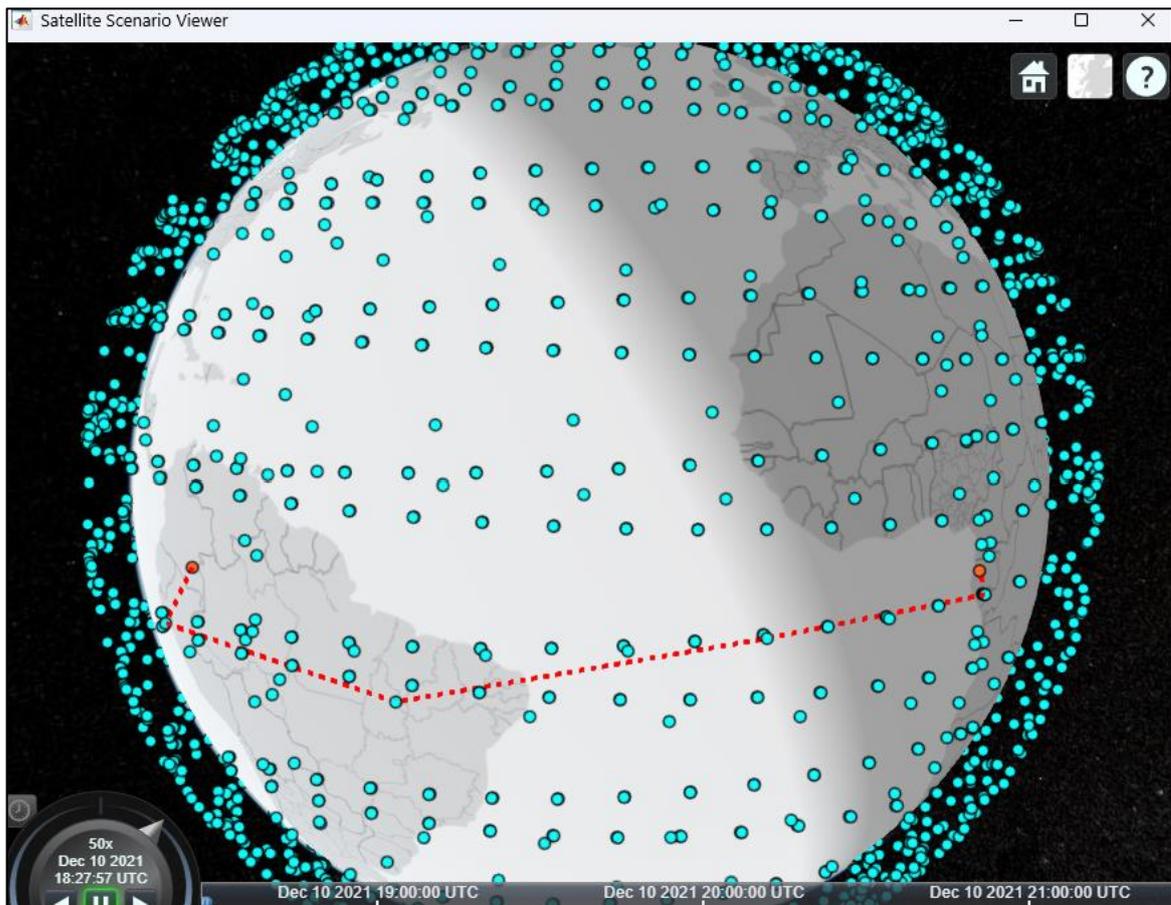
Figura 55: Rota ISL entre nós na linha do Equador – Constelação B2



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

O último teste que se foi possível obter algum resultado, foi o teste realizado com os parâmetros da constelação B3, onde é possível se visualizar na Figura 56 o resultado a simulação. Assim como o ocorrido na secção 5.3.3 é preciso alterar o ângulo de elevação mínimo permitido entre os satélites no código da simulação, de -5 que é o valor utilizado nos testes B1 e B2, para o valor -15 de forma a se encontrar a rota para essa configuração de simulação.

Figura 56: Rota ISL entre nós na linha do Equador – Constelação B3



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Quando foram ajustados no código da simulação para os parâmetros das constelações B4 e B5 do Quadro 4, não foi possível traçar uma rota na linha do Equador, pois não foi possível calcular a distância entre os satélites e as estações terrestres, o que indica que não foi possível achar um satélite com ângulo de inclinação suficiente até a estação terrestre.

O Quadro 7 mostra a comparação dos resultados obtidos pelas constelações de satélites no roteamento sobre a linha do Equador.

Quadro 7: Resultados dos testes de roteamento ISL na linha do Equador

| Constelações                   | Nº de constelações na rota ISL | Nº de satélites na rota ISL |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Teste B1 (inclinação de 53°)   | 15                             | 15                          |
| Teste B2 (inclinação de 53,2°) | 15                             | 15                          |
| Teste B3 (inclinação de 70°)   | 4                              | 4                           |

Fonte: Autoria própria

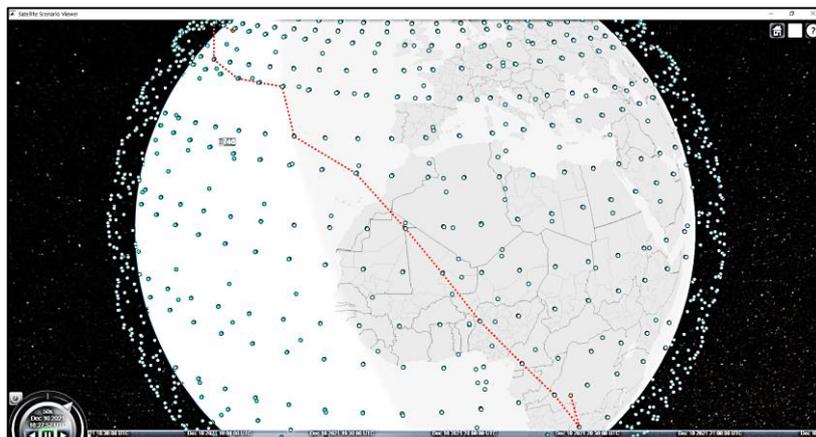
Por meio dos testes realizados na linha do Equador foi possível perceber que as trajetórias são traçadas com satélites que estejam próximos à linha do Equador, de forma a mostrar uma rota linear do ponto de origem até o ponto de destino. Esse resultado se mostrou diferente dos demais pois não utiliza diretamente de rotas A2A ou D2D, assim como também não faz uso de rotas D2A e A2D. O caminho traçado é seguindo uma única linha reta, como se uma única constelação ligasse os dois pontos.

### 5.3.5 Comunicação no sentido norte-sul leste-oeste

Foram realizados testes considerando as coordenadas da estação terrestre de origem no hemisfério norte e a estação terrestre de destino estava no hemisfério sul em uma posição à oeste da estação de origem. Esses testes utilizaram os parâmetros das constelações Starlink apresentados na Seção 5.2, Quadro 4.

O primeiro teste foi realizado com a constelação configurada com os parâmetros da constelação B1, Quadro 4. O resultado pode ser visualizado na Figura 57, na qual a trajetória foi traçada desde a estação de origem até a estação de destino, destacando a rota seguida pelos satélites.

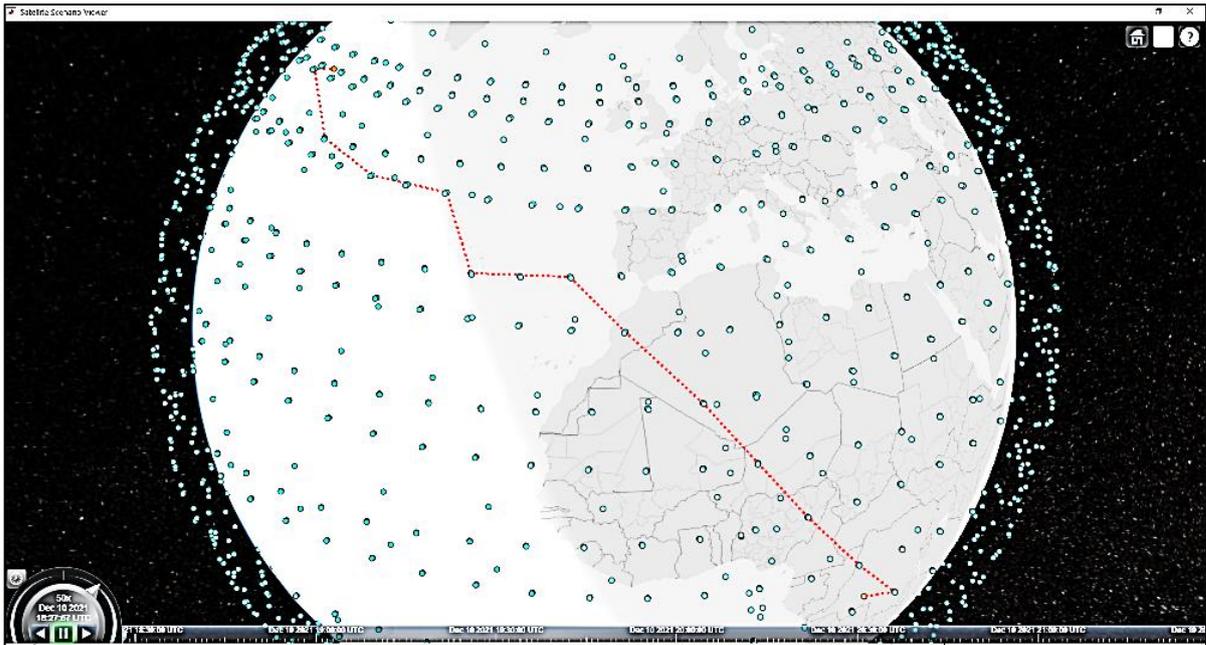
Figura 57: Rota ISL norte-sul-leste-oeste – constelação B1



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

A Figura 58 apresenta a visualização do resultado obtido ao traçar a rota utilizando os parâmetros de B2. Apesar de possuir o mesmo número de satélites que B1, essa configuração utiliza um maior número de constelações, permitindo observar diferenças na cobertura e na trajetória da rota.

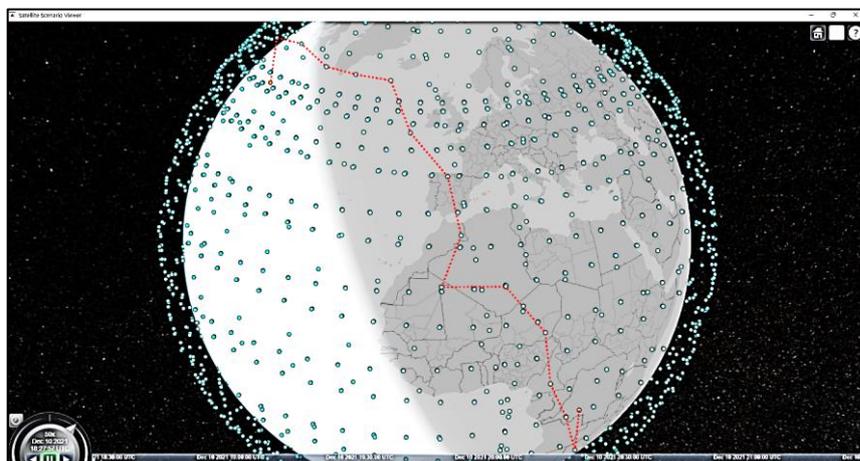
Figura 58: Rota ISL norte-sul-leste-oeste – constelação B2



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

A configuração dos parâmetros de B3 gerou o resultado apresentado na Figura 59. Nesse teste, a trajetória foi traçada utilizando um maior número de satélites, embora o número de constelações tenha permanecido o mesmo que no teste com B2.

Figura 59: Rota ISL norte-sul-leste-oeste – constelação B3



Fonte: Capturado pelo autor desse trabalho a partir de Matlab, 2024

Os parâmetros das constelações B4 e B5 não apresentaram resultados de roteamento. No Quadro 8, é apresentada a comparação entre as rotas traçadas por B1, B2 e B3, destacando-se o número de satélites utilizados e o número de constelações empregadas em cada caso.

Quadro 8: Comparação dos resultados roteamento de norte-sul leste-oeste

| Constelações                   | Nº de satélites da rota | Nº de constelações da rota |
|--------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Teste B1 (inclinação de 53°)   | 12                      | 7                          |
| Teste B2 (inclinação de 53,2°) | 12                      | 9                          |
| Teste B3 (inclinação de 70°)   | 14                      | 9                          |

Fonte: Autoria própria

Por meio dos testes, foi possível observar que os satélites traçam uma trajetória utilizando links A2A e D2D. Nos casos dos testes realizados para as rotas norte-sul e leste-oeste, as trajetórias utilizaram mais de uma vez a mesma constelação, embora não de forma sequencial. Na maioria dos casos, os satélites utilizados estavam posicionados em pontos distintos dentro da mesma constelação.

#### 5.4 Comentário sobre as simulações e limitações

Este tópico aborda os resultados obtidos nas simulações, comparando-os com os dados apresentados em artigos de referência. Além disso, inclui comentários acerca das dificuldades encontradas na realização de testes com roteamento dinâmico.

##### 5.4.1 Constelação mais adequada vs. localização das estações terrestres

Através dos testes realizados na secção 5.3 nas constelações de satélites, foi possível perceber que cada caso uma constelação se destaca. O Quadro 9 são os melhores resultados.

Quadro 9: Constelações de satélites com menor rota

| Localização das estações Terrestre           | Constelação com menor rota |                    |                       |
|--|----------------------------|--------------------|-----------------------|
|  | Inclinação                 | Nº de constelações | Nº total de satélites |
| Comunicação no sentido leste-oeste           | 53° e 53,2°                | 72                 | 1584                  |
| Comunicação no sentido norte-sul             | 97,6°                      | 4                  | 172                   |
| Comunicação entre nós na linha do Equador    | 70°                        | 36                 | 720                   |
| Comunicação no sentido norte-sul leste-oeste | 53°                        | 72                 | 1584                  |

Fonte: Autoria Própria

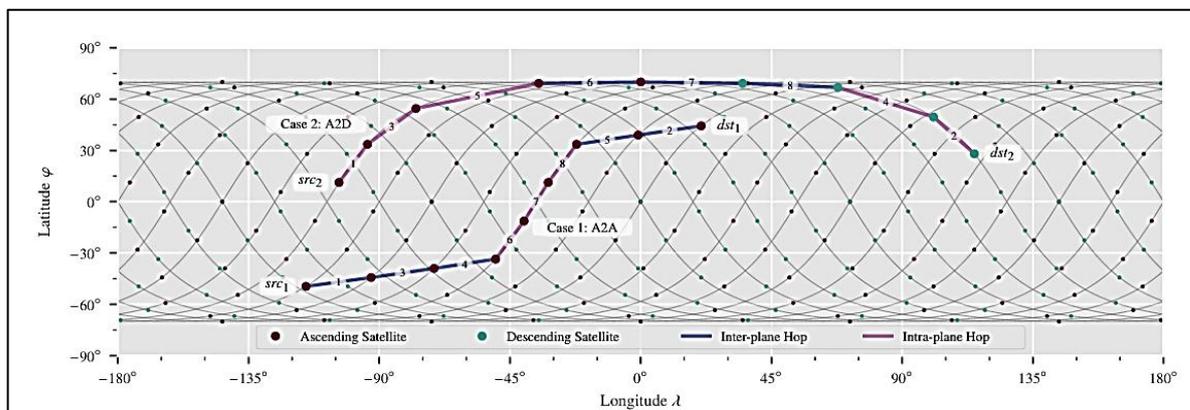
Para análise do desempenho do roteamento, foi considerado como métrica o número de satélites/constelações na rota ISL entre a origem e o destino, não levando em consideração o custo de processamento em cada satélite e a distância entre os satélites.

O motivo de haver mais satélites nas regiões próximas a  $53^\circ$  é que, segundo Guitarrara (2024), há maior concentração populacional no hemisfério Norte. Assim, presume-se que o tráfego de comunicação nessa direção (leste-oeste) seja maior.

#### 5.4.2 Comparação de resultados com trabalhos semelhantes

Os resultados deste trabalho revelaram-se semelhantes aos de outras pesquisas na área. No caso do roteamento, os resultados obtidos, especialmente nas comunicações Leste-Oeste, apresentaram um padrão análogo ao descrito no artigo de Stock, Fraire e Hermanns (2022). A Figura 60 que consta no referido artigo, os elementos exibidos na imagem são comparáveis aos resultados obtidos nas simulações realizadas neste estudo.

Figura 60: Roteamento entre satélites com DiscoRoute



Fonte: Stock; Fraire; Hermanns, 2022.

Os resultados obtidos pelos autores Stock, Fraire e Hermanns (2022), assim como os resultados deste trabalho, indicam que, ao realizar a comunicação leste-oeste, a tendência é que a rota seja traçada em direção aos polos utilizando do padrão A2D e D2A, para encontrar o melhor caminho. Como também na rota traçada entre norte e sul os resultados tiveram um padrão de A2A e D2D, o que seria similar o que é esperado pelo artigo. Isso corrobora os resultados alcançados neste estudo.

### ***5.4.3 Comentário sobre roteamento dinâmico***

Segundo Xiaogang et al. (2016), a principal dificuldade da comunicação via satélite reside no roteamento. As pesquisas em tecnologias de redes de satélites têm se concentrado na criação de protocolos e algoritmos de roteamento eficazes, que proporcionem rotas confiáveis para os usuários. Para isso, um dos principais aspectos é ter um algoritmo de roteamento com alta adaptabilidade às mudanças dinâmicas na topologia da rede.

Segundo Stock, Fraire e Hermanns (2022), o algoritmo DiscoRoute seria uma solução promissora para o problema de roteamento dinâmico em constelações de satélites. No entanto, as funções do algoritmo DiscoRoute não foram suficientemente detalhadas na publicação, impossibilitando o uso de funções desse algoritmo no código para testes específicos de roteamento dinâmico neste trabalho. Essa lacuna abre caminhos para pesquisas futuras, focadas na criação ou implementação de um algoritmo adaptável para roteamento dinâmico em constelações de satélites. Além disso, para desenvolver um algoritmo mais robusto, é essencial a interação entre diferentes tipos de constelações e inclinações, de forma que satélites em configurações variadas possam colaborar na criação de rotas mais eficientes e contínuas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o avanço e a expansão das redes de comunicação via satélite, torna-se essencial compreender os aspectos técnicos e operacionais dessas redes. As constelações de satélites do tipo LEO da Starlink representam um marco no campo das comunicações, proporcionando o acesso à *Internet* em áreas remotas e rurais, além de estabelecer uma concorrência direta com as infraestruturas terrestres, como a *Internet* por fibra óptica.

Este trabalho teve como objetivo principal estudar e compreender o comportamento das tecnologias empregadas no acesso à *Internet* por meio da constelação de satélites Starlink.

Por meio desse trabalho foi possível alcançar os objetivos iniciais, foram realizados estudos sobre o procedimento da estrutura da Starlink, foram descritas as antenas dos usuários, os tipos de constelações utilizados e possíveis métodos de roteamento utilizados, além de testes que simulam as constelações de satélites e como uma trajetória poderia ser traçada de um ponto de origem ao destino.

De acordo com os procedimentos metodológicos propostos, foram realizadas pesquisas de bibliografias para explicar e esclarecer o desempenho da topologia da Starlink. Segundo os métodos experimentais foram realizados experimentos que possibilitam visualizar as constelações e o processo de roteamento.

Os resultados apresentados pelas simulações desse trabalho condizem com resultados apresentados em artigos da referência onde segundo Stock, Fraire e Hermanns (2022), a comunicação em constelações Walker e divididas em 2 casos. O primeiro caso seria a comunicação entre satélites A2A e D2D e o segundo caso seria a comunicação A2D e D2A onde é mais evidente o direcionamento do roteamento em direção aos polos.

O principal aprendizado desse trabalho foi a compreensão do comportamento da estrutura da Starlink para a transmissão de um sinal de *Internet* global. Este trabalho esclareceu sobre o funcionamento das antenas e constelações da utilizadas pela empresa.

O trabalho contribui para o avanço do entendimento sobre redes LEO e suas implicações para a conectividade global, utilizando como base informações sobre a Starlink. A partir desse conhecimento, foi possível concluir que, para alcançar uma cobertura semelhante à da Starlink, é necessário utilizar constelações Walker com diferentes tipos de inclinação, o que permite a cobertura global. Além disso, é essencial contar com antenas de usuário que adotem métodos capazes de garantir a comunicação contínua com os satélites.

## 6.1 Limitações

Ainda que alcançado os objetivos principais desse trabalho, ainda houve algumas dificuldades e limitações encontradas ao longo dele:

- Inicialmente, o baixo número de informações oficiais divulgadas pela própria Starlink, uma vez que, como empresa, ela mantém privadas as informações mais relevantes;
- A falta de materiais publicados sobre os temas, por mais que ainda existam alguns artigos que comentem sobre o tema, estes ainda são poucos;
- A escolha inicial do *software* de simulação, que apresentaram problemas durante a instalação e utilização;
- A simulação de roteamento. Não foi possível realizar o roteamento dinâmico e o código utilizado apresentava limitações quanto ao número de configurações de satélites que poderiam ser empregadas em cada simulação.

## 6.2 Conclusão

Este trabalho contribuiu para as áreas de telecomunicação e tecnologia ao detalhar o funcionamento das tecnologias de constelações de satélites da Starlink. A análise abrangeu desde a transmissão do sinal pelas antenas de usuário até o envio das informações pelos satélites ao destino, destacando a complexidade e eficiência do sistema implementado. Os resultados obtidos nos testes de roteamento permitiram compreender a predominância de satélites com inclinação de  $53^\circ$ , bem como explorar as possíveis aplicações das demais configurações de constelações utilizadas pela Starlink.

## 6.3 Sugestão de trabalhos futuros

Sugestões para trabalhos futuros:

- Melhorar o código de roteamento utilizado nesse trabalho, possibilitando o roteamento entre vários padrões de constelações *Walker* com diferentes inclinações;
- Buscar ou criar um código de roteamento assim como seria o caso do DiscoRoute;
- Utilizar de outros *softwares* de simulação como o SNS3 para verificar resultados obtidos, assim como possibilitar diferentes modelagens de simulação.

## REFERÊNCIAS

BEARD, Cory; STALLINGS, William. **Wireless Communication Networks and Systems**, Global Edition. 1. ed. Pearson Education, 2016.

BRANCH EDUCATION. **HOW does Starlink Satellite Internet Work?** Youtube, 19 de agosto de 2022. [Vídeo]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=qs2QcycggWU>. Acesso em: 24 abr. 2024.

FOROUZAN, Behrouz A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.

GUITARRARA, Paloma. "**O que é hemisfério? (Geografia)**"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-hemisferio-geografia.htm>. Acesso em 03 de dezembro de 2024.

KUMAR, Jayant. **StarLink Network Topology**. [S. l.], 9 out. 2023. Disponível em: <https://medium.com/@jaykrs/starlink-network-topology-289dd3ddb14d#:~:text=The%20Starlink%20network%20topology%20is%20a%20complex%20mesh%20network%20consisting,plane%20containing%20approximately%2060%20satellites>. Acesso em: 24 abr. 2024.

LEYVA-MAYORGA, Israel; SORET, Beatriz; MATTHIESEN, Bho; RÖPER, Maik; WÜBBEN, Dirk; DEKORSY, Armin; POPOVSKI, Petar. NGSO Constellation Design for Global Connectivity. **Institution of Engineering and Technology (IET)**, arXiv:2203.16597 [cs.NI], 30 mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.16597>. Acesso em: 5 nov. 2024

LIANG, Jintao; CHAUDHRY, Aizaz U.; YANIKOMEROGLU, Halim. Phasing Parameter Analysis for Satellite Collision Avoidance in Starlink and Kuiper Constellations. **IEEE**, [s. l.], 19 nov. 2021.

MAZLOUMAN, Shahrzad Jalali; SCHULZE, Kim. **Distributed phase shifter array system and method**. US 2018 / 0241122 A1. Depósito: 18 fev. 2018. Concessão: 23 ago. 2018.

SAVISOURCEFORGE. **Savi**: satellite constellation visualization. [S. l.], 30 out. 2023. Disponível em: <https://savi.sourceforge.io/>. Acesso em: 28 out. 2024.

SHAENGCHART, Yarnaphat; KRAIWANIT, Tanpat. Starlink satellite project impact on the *Internet* provider service in emerging economies. *Research in Globalization*, **ScienceDirect**, 4 maio 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/research-in-globalization>

SILVA, Mateus de Castro; SANTOS, Willer Gomes; GONÇALVES, Liana. Estudo da variação do número total de satélites em constelações Walker para monitoramento da

fronteira terrestre brasileira. **SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA (SIGE)**, São José dos Campos: ITA, 2020.

SNS3. **Sns3-satellite**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://github.com/sns3/sns3-satellite>. Acesso em: 25 out. 2024.

SNS3.ORG. **SNS3**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.sns3.org/>. Acesso em: 25 out. 2024.

SOLYMAR, Laszlo. **Getting the Message: A History of Communications**. New York: Oxford University Press, 1999.

STARLINK. **Internet de alta velocidade: Disponível em quase qualquer lugar do mundo**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.starlink.com/br>. Acesso em: 24 abr. 2024.

STOCK, Gregory; FRAIRE, Juan Andrés A; HERMANNNS, Holger. **Distributed On-Demand Routing for LEO Mega-Constellations: A Starlink Case Study**. HAL open science, [s. l.], 24 out. 2022.

TANENBAUM, Andrew; FEANLSTER, Nick; WETHERALL, David. **Redes de computadores**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2021.

THE MATHWORKS, INC. **Aerospace Toolbox**. [S. l.], 1994. Disponível em: <https://la.mathworks.com/products/aerospace-toolbox.html>. Acesso em: 25 out. 2024.

THE MATHWORKS, INC. **Matlab**. [S. l.], 1994. Disponível em: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 25 out. 2024.

THE MATHWORKS, INC. **Satellite Mission Analysis**. [S. l.], 1994. Disponível em: [https://la.mathworks.com/help/aerotbx/satellite-mission-analysis.html?s\\_tid=CRUX\\_lftnav](https://la.mathworks.com/help/aerotbx/satellite-mission-analysis.html?s_tid=CRUX_lftnav). Acesso em: 25 out. 2024.

WAZLAWICK, R. S. **Metodologia da Pesquisa para Ciência da Computação**. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Campus, 2014.

XIAOGANG, QI; JIULONG, MA; DAN, WU; LIFANG, LIU; SHAOLIN, HU. A survey of routing techniques for satellite networks. **Journal of communications and information networks**, [S. l.], v. 1, n. 4, p. 66-85, 1 dez. 2016.

ZHANG, Jianjun; LI, Jing. **Laser Inter-Satellite Links Technology**. Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2023.

ZHU, Tang; JINGJING, Zhao; HU, Li; TIANHANG, Guo; QUAN, Wang; HONGYAN, Chen; BAO KANG, Zhao. Mini-Savi: Realistic Satellite Network Simulation Platform Based on Open-Source Tools. **IEEE**, Changsha, China, 2023.

## APÊNDICE A – CÓDIGO DO TESTE DOS PARÂMETROS

Figura 61: Código Do Teste Dos Parâmetros

```
1 % Criação do cenário
2 sc = satelliteScenario;
3
4 % Criar a constelação de satélites
5 sat = walkerDelta(sc, 550e3 + 6378.14e3, 53, 100, 70, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
6 sat.ShowLabel = false;
7
8 % Exibição da simulação
9 satelliteScenarioViewer(sc, 'ShowDetails', true);
10
```

Fonte: Autoria própria

## APÊNDICE B – CÓDIGO DA SIMULAÇÃO STARLINK

Figura 62: Código da Simulação Starlink

```
1 % Criação do cenário
2 sc = satelliteScenario;
3
4 % Criar a constelação de satélites
5 sat = walkerDelta(sc, 550e3 + 6378.14e3, 53, 1584, 72, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
6 sat.ShowLabel = false;
7
8 sat2 = walkerDelta(sc, 540e3 + 6378.14e3, 53.2, 1584, 72, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
9 sat2.ShowLabel = false;
10
11 sat3 = walkerDelta(sc, 570e3 + 6378.14e3, 70, 720, 36, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
12 sat3.ShowLabel = false;
13
14 sat4 = walkerDelta(sc, 560e3 + 6378.14e3, 97.6, 348, 6, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
15 sat4.ShowLabel = false;
16
17 sat5 = walkerDelta(sc, 560e3 + 6378.14e3, 97.6, 172, 4, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
18 sat5.ShowLabel = false;
19
20 % Exibição da simulação
21 satelliteScenarioViewer(sc, 'ShowDetails', true);
22
```

Fonte: Autoria própria

## APÊNDICE C – CÓDIGO DOS TESTE DE ROTEAMENTO

Figura 63: Código dos Teste De Roteamento Parte 1

```

1  startTime = datetime(2021,12,10,18,27,57); % 10 de dezembro de 2021, 18:27:57 UTC
2  stopTime = startTime + hours(3);          % 3 horas após o início
3  sampleTime = 60;                          % Segundos
4  sc = satelliteScenario(startTime,stopTime,sampleTime,"AutoSimulate",false)
5
6  % Criar a constelação de satélites
7  sat = walkerDelta(sc, 550e3 + 6378.14e3, 53, 1584, 72, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
8  sat.ShowLabel = false;
9
10 sat2 = walkerDelta(sc, 540e3 + 6378.14e3, 53.2, 1584, 72, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
11 sat2.ShowLabel = false;
12
13 sat3 = walkerDelta(sc, 570e3 + 6378.14e3, 70, 720, 36, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
14 sat3.ShowLabel = false;
15
16 sat4 = walkerDelta(sc, 560e3 + 6378.14e3, 97.6, 348, 6, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
17 sat4.ShowLabel = false;
18
19 sat5 = walkerDelta(sc, 560e3 + 6378.14e3, 97.6, 172, 4, 1, 'ArgumentOfLatitude', 180, 'Name', "");
20 sat5.ShowLabel = false;
21
22 gsSource = groundStation(sc,42.3001,-71.3504, ... % Latitude e longitude em graus
23 "Name","Source Ground Station");
24 gsTarget = groundStation(sc,42.3001, 71.3504, ... % Latitude e longitude em graus
25 "Name","Target Ground Station");
26
27
28 % Avança o cenário de satélite para o tempo de início.
29 advance(sc);

```

Fonte: Autoria própria

Figura 64: Código dos Teste De Roteamento Parte 2

```

31 % pegando angulo de elevação correspondente a estação terrestre
32 [~,elSourceToSat] = aer(gsSource,sat);
33 [~,elTargetToSat] = aer(gsTarget,sat);
34
35 % Determina um angulo de elevação melhor que 30°
36 elSourceToSatGreaterThanOrEqualTo30 = (elSourceToSat >= 30)';
37 elTargetToSatGreaterThanOrEqualTo30 = (elTargetToSat >= 30)';
38
39 % Encontra os índices dos satélites com ângulo de elevação suficiente
40 % em relação à estação terrestre de origem.
41 trueID = find(elSourceToSatGreaterThanOrEqualTo30 == true);
42
43 % Calcula a distância entre esses satélites e a estação terrestre de destino
44 [~,~,r] = aer(sat(trueID), gsTarget);
45
46 % Encontra o satélite mais próximo da estação terrestre de destino.
47 [~,minRangeID] = min(r);
48
49 % Índice do satélite escolhido como primeiro nó do caminho.
50 id = trueID(minRangeID);
51
52 % Inicializa uma lista de nós, começando com a estação terrestre de origem
53 % e o primeiro satélite escolhido.
54 nodes = {gsSource sat(id)};
55
56 earthRadius = 6378137; % metros
57 altitude = 500000; % metros
58 horizonElevationAngle = asind(earthRadius/(earthRadius + altitude)) - 90 % graus
59

```

Fonte: Autoria própria

Figura 65: Código dos Teste de Roteamento Parte 3

```

60 % Ângulo de elevação mínimo permitido entre os satélites.
61 minSatElevation = -5; % graus
62
63 % Flag para indicar se o caminho completo foi encontrado.
64 pathFound = false;
65
66 % Loop até que o caminho seja encontrado
67 while ~pathFound
68     % Índice do satélite atual no caminho.
69     idCurrent = id;
70
71     % Verifica se o satélite atual está visível pela
72     % estação terrestre de destino:
73     % Se sim, adiciona a estação terrestre de destino como último nó
74     % do caminho e sai do loop.
75     if elTargetToSatGreaterThanOrEqual30(idCurrent)
76         nodes = {nodes{:} gsTarget}; %#ok<CCAT>
77         pathFound = true;
78         continue
79     end
80
81     % Se não, encontra os satélites visíveis pelo satélite atual:
82     % Calcula o ângulo de elevação de todos os satélites em
83     % relação ao satélite atual, excluindo o próprio satélite
84     [~,els] = aer(sat(idCurrent),sat);
85

```

Fonte: Autoria própria

Figura 66: Código Dos Teste De Roteamento Parte 4

```

86 % Seleciona o satélite mais próximo da estação terrestre de destino:
87 % Escolhe o satélite com o menor ângulo de elevação negativo.
88 els(idCurrent) = -90;
89
90 % Adiciona o satélite escolhido como próximo nó do caminho.
91 s = els >= minSatElevation;
92
93 % Repete o processo até encontrar um caminho completo.
94 trueID = find(s == true);
95
96 [~,~,r] = aer(sat(trueID), gsTarget);
97 [~,minRangeID] = min(r);
98
99 id = trueID(minRangeID);
100
101 nodes = {nodes{:} sat(id)};
102 end

```

Fonte: Autoria própria

Figura 67: Código Dos Teste De Roteamento Parte 5

```
104 % Habilita a simulação automática do cenário.
105 sc.AutoSimulate = true;
106
107 % Cria um objeto de acesso para visualizar o caminho de comunicação.
108 ac = access(nodes{:});
109
110 % Define a cor da linha do caminho como vermelha.
111 ac.LineColor = "red";
112
113 % Calcula os intervalos de tempo em que cada link do caminho está ativo.
114 intvls = accessIntervals(ac)
115
116 % Cria um visualizador de cenário de satélite.
117 v = satelliteScenarioViewer(sc,"ShowDetails",false);
118
119 % Define o tamanho dos marcadores dos satélites.
120 sat.MarkerSize = 6;
121
122 % Define o ângulo de visão do visualizador.
123 campos(v,60,5);
124
```

Fonte: Autoria própria



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS  
GABINETE DO REITOR

Av. Universitária, 1069 • Setor Universitário  
Caixa Postal 86 • CEP 74605-010  
Goiânia • Goiás • Brasil  
Fone: (62) 3946.1000  
www.pucgoias.edu.br • reitoria@pucgoias.edu.br

## RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

### ANEXO I

#### APÊNDICE ao TCC

#### **Termo de autorização de publicação de produção acadêmica**

O(A) estudante Eduardo Pimenta Xavier Rodrigues Vaz do Curso de Ciência da Computação matrícula 20201002800144, telefone: 62 983057968 e-mail eduardopimenta95@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado *INTERNET VIA SATÉLITE: UM ESTUDO SOBRE O STARLINK*, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 17 de Setembro de 2024.

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Nome completo do autor: Eduardo Pimenta Xavier Rodrigues Vaz

Assinatura do professor-orientador: \_\_\_\_\_

Nome completo do professor-orientador: Angélica da Silva Nunes