UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA PROJETO DE GRADUAÇÃO

LARISSA BONADIMAN GRASSI

ANÁLISE DA REDE DE SATÉLITES SPACEWAY NGSO: UMA ABORDAGEM VIA GRAFOS

LARISSA BONADIMAN GRASSI

ANÁLISE DA REDE DE SATÉLITES SPACEWAY NGSO: UMA ABORDAGEM VIA GRAFOS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Larissa Bonadiman Grassi**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Dra. Marcia Helena Moreira Paiva

LARISSA BONADIMAN GRASSI

ANÁLISE DA REDE DE SATÉLITES SPACEWAY NGSO: UMA ABORDAGEM VIA GRAFOS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Larissa Bonadiman Grassi**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 14 de maio de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profa. Dra. Marcia Helena Moreira Paiva Universidade Federal do Espírito Santo Orientadora

Prof. Dr. Moisés Renato Nunes Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Prof. Dr. Roberto Colistete Junior Universidade Federal do Espírito Santo Examinador



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, força maior e razão do meu viver, que sempre atendeu aos meus pedidos e derramou muitas bênçãos sobre mim. Agradeço aos meus pais, por todo suporte, confiança e por estarem sempre comigo, principalmente nos momentos mais difíceis. Agradeço também aos demais familiares e amigos pelo apoio, torcida e desejos de sucesso.

Agradeço a professora Marcia por aceitar esse desafio e de me orientar, com toda sua paciência, disponibilidade, dedicação e empenho. Mesmo em tempos difíceis, de forma remota, conseguimos trocar muitos conhecimentos e chegamos ao nosso objetivo e sucesso do trabalho.

Agradeço ainda ao Laboratório de Telecomunicações da UFES e às contribuições de Kamilla, Yruí e George pelos seus conhecimentos passados para a realização desse trabalho.

RESUMO

Muitos estudos e aprimoramentos foram realizados na área de redes de satélites, porém essa temática ainda apresenta deficiências e busca por melhores soluções topológicas e de tráfego, como a resiliência a falhas e a capacidade de rotear com baixo atraso. Enquanto isso, no âmbito da matemática, a Teoria dos Grafos surge como uma ferramenta de grande potencial para a resolução de problemas, possibilitando a utilização de diversos recursos no estudo das redes de satélites. O objetivo desse trabalho é a representação da rede de satélites de pequeno porte e de órbitas não geoestacionárias (NGSO, do inglês non-geostationary orbit) Spaceway - chamada Spaceway NGSO, por grafos gêmeos correspondentes. Essa classe de grafos é uma alternativa promissora para modelagem dessas topologias, proporcionando caminhos alternativos em caso de falhas e de menor latência. A metodologia consiste na modelagem da rede em questão por grafos gêmeos, incluindo a análise e comparação de métricas associadas a robustez e desempenho da rede original e do modelo em grafos. Além das métricas analisadas, observouse os comprimentos dos caminhos de trabalho e de backup. Chegou-se a dois grafos para representar a rede Spaceway NGSO, que apresentaram resultados positivos com relação a algumas métricas e resultados negativos com relação a outras, quando comparados com a rede original. O modelo mais adequado dependerá das necessidades específicas de cada aplicação.

Palavras-chave: Rede de satélites. Falha. Atraso. Spaceway NGSO. Grafos gêmeos.

ABSTRACT

Many studies and improvements have been achieved in the area of satellite networks, but this thematic still has deficiencies like the search for better topological and traffic solutions, such as resilience to failures and the capacity to route with low delay. Meanwhile, in the field of mathematics, the Theory of Graphs emerges as a tool with great potential for solving problems, enabling the use of several resources in the study of satellite networks. The objective of this work is to represent the network of small satellites and non-geostationary orbits (NGSO) Spaceway - called Spaceway NGSO, by corresponding twin graphs. This class of graphs is a promising alternative for modeling these topologies, providing alternative paths in case of failures and low latency. The methodology consists of modeling the network in question using twin graphs, including the analysis and comparison of metrics associated with the robustness and performance of the original network and the model in graphs. Besides the analyzed metrics, the lengths of the working and backup paths were observed. Two graphs were chosen to represent the Spaceway NGSO network, which presented positive results regarding some metrics and negative results regarding others, when compared with the original network. The most appropriate model will depend on the specific needs of each application.

Keywords: Satellite network. Failure. Delay. NGSO Spaceway. Twin graphs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Tipos de radiocomunicação	.22
Figura 2 –	WDM ISLs e roteamento de comprimento de onda em OTN em constelações	
	não geoestacionárias	.24
Figura 3 –	Esquema dos nós ópticos de cada satélite	.25
Figura 4 –	Geometria da Terra e satélite em órbita	.26
Figura 5 –	Distância entre dois pontos na superfície da Terra	.27
Figura 6 –	Constelação rosette <i>Spaceway</i> NGSO e suas projeções (a) equidistante azimutal	
	e (b) longitude x latitude	.29
Figura 7 –	Grafo gêmeo com 14 nós	.36
Figura 8 –	Fluxograma do algoritmo genético	.39
Figura 9 –	Exemplificação do algoritmo de Dijkstra: (a) grafo inicial, com $vo = v1$ e	
	vd = v6 e (b) caminho de menor custo destacado em vermelho, obtido pelo	
	algoritmo de Dijkstra	.40
Figura 10 –	- Exemplificação das etapas do algoritmo ST: (a) grafo inicial, com $vo = v1$ e	
	vd = v8, (b) transformação em grafo direcionado, (c) menor caminho P1	
	tracejado de azul, obtido pelo algoritmo de <i>Dijkstra</i> e atribuição dos pesos às	
	arestas, (d) menor caminho P2 tracejado de laranja, obtido pelo algoritmo de	
	Dijkstra e (e) dois caminhos disjuntos P1' e P2'	.43
Figura 11 –	- Grafo G' com os nós duplicados e com as chamadas arestas falsas	
Figura 12 –	- Mapa de correlação de métricas após segunda seleção	.51
_	Mapa de correlação de métricas finalistas	
Figura 14 –	Grafo gêmeo caminhos duplos de 20 nós	.54
Figura 15 –	Caminho de trabalho e de proteção para o grafo: (a) da rede Spaceway NGSO,	
	(b) caminhos duplos, (c) caminhos duplos com adição das arestas 0-4, 5-9, 10-	
	14, 15-19, (d) caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 10-19 ou 9-10, 0-	
	19, (e) caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 9-10, (f) caminhos duplos	
	com adição das arestas 0-9, 9-19 ou 9-10, 9-19 (g) caminhos duplos com	
	adição das arestas 0-9, 0-19, 9-10, 10-19 e (h) caminhos duplos com adição	
	das arestas 0-9, 0-10, 9-19, 10-19 ou 0-10, 0-19, 9-19, 9-10	.56
Figura 16 -	- Projeção equidistante azimutal: (a) rede <i>Spaceway</i> NGSO, (b) grafo gêmeo,	
-	(c) grafo regular	.59

Figura 17 – Caminho de trabalho e de proteção: (a) da rede Spaceway NGSO, (b) do gra	fo
gêmeo e (c) do grafo regular	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Representação das métricas da rede Spaceway NGSO e os valores de mínimo,	
	máximo e os quartis dos grafos gêmeos de graus 4, 5 e 6	.49
Tabela 2 –	Representação das métricas em uma escala de 0 a 1 da rede <i>Spaceway</i> NGSO	
	e os valores de mínimo, máximo e os quartis dos grafos gêmeos de graus 4, 5	
	e 6	.50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Constelações de satélites	28
Quadro 2 –	Passo a passo algoritmo de <i>Dijkstra</i> para o exemplo da Figura 9	40
Quadro 3 –	Comparação de métricas da rede Spaceway NGSO, grafo caminhos duplos e	
	suas variações	55
Quadro 4 –	Comparação de métricas de desempenho da rede Spaceway NGSO e grafos	
	selecionados	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG Algoritmo genético

CB Centralidade de betweenness

CBC Communicability betweenness centrality

CC Centralidade de *closeness*

CFCC Current flow closeness centrality

GC Geodesicamente-conexo

GEO Geostationary Earth Orbit

HEO Highly Elliptical Orbit

ICO Intermediate Circular Orbit

ISL Inter-Satellite Link

km Quilômetro

LEO Low Earth Orbit

MEO Medium Earth Orbit

NGSO Non-Geostationary Orbit

NN Nearest Neighbors

OTN Optical transport network

rad radianos

SCORE Signal Communications by Orbiting Relay Equipment

ST Suurballe e Tarjan

UFES Universidade Federal do Espírito Santo

WDM Wavelength division multiplexing

WROTNS Wavelength-routed optical transport networks over nongeosychronous satellite

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Latitude	
ϕ	Longitude	
G(V,E)	Grafo de conjunto de vértices V e conjunto de arestas E	
n	Número de vértices	
m	Número de arestas	
NCon(G)	Conectividade de vértices do grafo G	
ECon(G)	Conectividade de arestas do grafo G	
A(G)	Matriz de adjacência do grafo G	
μ	Autovalor da matriz de adjacência A(G)	
L(G)	Matriz laplaciana do grafo G	
w(u, v)	Peso da aresta uv	
$dist_G(u,v)$	Distância entre os vértices u,v do grafo G	
diam(G)	Diâmetro do grafo G	
$\Omega_G(u,v)$	Distância de resistência entre os vértices u,v do grafo G	
$grau_G(v)$	Grau do vértice v do grafo G	
$\psi(G)$	Grau mínimo do grafo G	
$\Psi(G)$	Grau máximo do grafo G	
$C_b(v)$	Centralidade de betweenness de um vértice v	
$\sigma_{st}(v)$	Número de menores caminhos entre os vértices s e t que passam pelo vértice v	
σ_{st}	Número de caminhos que ligam o vértice s a t	
$C_c(u)$	Centralidade de betweenness de um vértice u	
$d_G(u,v)$	Comprimento de um caminho mais curto entre os vértices u e v	
ConAlg(G)	G) Conectividade algébrica do grafo G	
EE(G)	Índice de Estrada do grafo G	
$C_{cfcc}(u)$	Current flow closeness centrality para o vértice u	
$v_{st}(u)$	Tensão do vértice u para corrente que entra no vértice s e sai no vértice t	
$C_{cbc}(v)$	Communicability betweenness centrality de um vértice v	
$P_{st}(v)$	Número de cadeias começando no vértice s e terminando em t , envolvendo v	
D	Número de cadejas começando no vértice s e terminando no vértice t	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Apresentação do Tema e Justificativa	15
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	Organização do Trabalho	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Redes de Satélites	21
2.1.1	Classificação quanto à altitude	21
2.1.2	Tipos de ligação	22
2.1.3	ISLs	22
2.1.4	Geometria da Terra e satélite em órbita	25
2.1.5	Distância entre dois pontos na superfície da Terra	26
2.1.6	Constelações de satélites	27
2.2	Teoria dos Grafos	30
2.2.1	Definições	30
2.2.2	Métricas de grafos em redes	34
2.2.3	Grafos gêmeos	35
3	ALGORITMOS	37
3.1	Nearest Neighbors	37
3.2	Algoritmo Genético	37
3.3	Algoritmo de Dijkstra	39
3.4	Algoritmo de Suurballe e Tarjan Original - Disjuntos por Arestas	41
3.5	Algoritmo de Suurballe Generalizado – Disjuntos por Nós	44
4	METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	46
4.1	Processo de Seleção de Grafos Gêmeos a Partir de Características e Mé	tricas
	em Comum com a Rede Spaceway NGSO	47
4.1.1	Escolha das métricas de seleção dos grafos gêmeos	48
4.1.2	Mapeamento entre nós dos grafos gêmeos e rede Spaceway NGSO	52
4.2	Uma Análise a Partir do Grafo Caminhos-Duplos	53

4.2.1	Variações do grafo caminhos duplos	54
5	RESULTADOS E ANÁLISE	59
6	CONCLUSÃO E PROJETOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Tema e Justificativa

Um corpo em órbita terrestre com aproximadamente 35 mil quilômetros de altitude, localizado em plano coincidente com o Equador, movendo com a mesma velocidade de rotação da Terra é chamado geoestacionário, por parecer estacionário em relação às estações terrenas. Se esse corpo possuísse equipamentos transmissores e receptores de microondas poderia funcionar como repetidor ativo de comunicações entre dois pontos do planeta. Essa ideia foi publicada em 1945 pelo cientista Arthur C. Clarke à revista Wireless World (SOARES NETO, 1988).

Fomentados por essa ideia, a era espacial teve início em 1957, no contexto da Guerra Fria, com o lançamento do primeiro satélite artificial, o *Sputnik I*, em 4 de outubro do mesmo ano, por parte dos soviéticos. Desde então, diversos outros satélites foram lançados na busca por novidades e melhorias quando comparados aos anteriores.

Segundo Soares Neto (1988) e Miya (1985), sobre a evolução histórica inicial dos satélites, o primeiro satélite de comunicação, chamado de Comunicações de Sinal por Equipamento de Relés em Órbita (SCORE, do inglês Signal Communications by Orbiting Relay Equipment), foi fracassado devido à exaustão de suas baterias. Sendo assim, foi lançado em 1960 o Courier 1B, onde, com a troca de bateria por células solares, realizou-se uma retransmissão de dados enviados da Terra. Já com o abandono de experimentos com satélites naturais, em 1962 têmse, com o auxílio da American Telephone and Telegraph, o primeiro satélite de comunicações verdadeiro, o Telstar 1, de baixa órbita e o primeiro de utilização comercial. A partir daí surgiu uma série de satélites como o Telstar 2, Relay 1, Relay 2 e os primeiros satélites síncronos (velocidade do satélite igual a revolução da Terra): Syncom 1, Syncom 2 e o Syncom 3. Esse último realizou a retransmissão dos jogos olímpicos ao vivo em 1964. Em 1965 foi lançado o Intelsat 1 – o Early Bird, o primeiro satélite geoestacionário comercial, com 240 canais telefônicos, que operou por 4 anos. A seguir, vieram o Intelsat 2, Intelsat 3 e Intelsat 4, com aumento do número de canais telefônicos e de TV e de forma a cobrir diversas regiões do planeta Terra.

Dos tipos de satélites existentes, têm-se os satélites de comunicação (como da empresa Iridium, *Globalstar* e *Starlink* ainda em operação e a Celestri e Teledesic, abandonadas em 1998 e 2002, respectivamente), astronômicos, militares, meteorológicos, entre outros.

Dessa forma, houve a rápida expansão dos serviços de comunicação por satélite, de modo a oferecer retransmissão de TV, telefonia e comunicação de dados. Os satélites permitem esses e outros serviços de telecomunicações com uma grande flexibilidade de roteamento e penetração geográfica (SOARES NETO, 1988).

Devido às funcionalidades e capacidade de comunicação mencionadas, os satélites artificiais se tornaram cruciais com o advento da globalização, dos demais avanços tecnológicos e do necessário fluxo de informações em todo o mundo. Com o indispensável acesso às redes de computadores e *internet*, houve o surgimento da latência como fator limitante na comunicação, além da preocupação com falhas. A latência é aqui definida como o tempo que um pacote de dados leva para chegar ao seu destino com sucesso (RADHAKRISHNAN et al., 2016). Logo, essas redes ainda precisam de melhorias com relação aos aspectos citados.

A latência dos caminhos de uma rede de satélites afeta o desempenho da própria rede e gera atrasos na comunicação. Isto é, o atraso e a susceptibilidade a erros de uma ligação entre satélites podem gerar um efeito considerável no desempenho de aplicações cujo tráfego utiliza um caminho com essa ligação (WOOD, 2003).

Além do mais, quando se analisa a topologia da rede, ou seja, a disposição dos vários elementos dela, além da latência ser uma questão a se tratar, também deve-se atenção a resiliência da rede a falhas, uma vez que há frequentes casos em que ocorre uma interrupção na ligação entre dois satélites (HANDLEY, 2018; ZHU et al., 2019).

Como exemplo de implementação de rede de baixa latência temos a constelação *Starlink*, uma rede classificada como baixa órbita terrestre (LEO, do inglês *low earth orbit*). Com seus 4.425 satélites que se conectam num padrão previsível e dinâmico, essa rede é capaz de superar redes terrestres de fibras ópticas para comunicações em distâncias superiores a 3.000 km. Também

oferece caminhos alternativos disjuntos e de baixa latência em caso de falha dos caminhos de maior prioridade (HANDLEY, 2018).

Na busca por redução do atraso na transmissão, Hu, Yeung e Li (2000) testaram algoritmos de roteamento e redirecionamento de um sistema de comunicações móveis. O sistema consiste em uma rede de comunicações por satélite de camada dupla, utilizando constelações de baixa órbita terrestre e de média órbita terrestre (MEO, do inglês *medium earth orbit*). Os algoritmos lidam de forma eficiente com o roteamento para chamadas distantes, com redução do atraso na transmissão na rede MEO.

Em um outro estudo em redes LEO/MEO, Zhu e outros (2019) propuseram um algoritmo de roteamento com prioridade na probabilidade de falhas. Os serviços de voz, *streaming* de vídeos e dados foram divididos em prioridade alta, média e baixa, respectivamente. No algoritmo, buscou-se priorizar tráfegos de baixa latência dos serviços de maior prioridade, através da comunicação pela rede LEO. Já os tráfegos dos serviços de menor prioridade se deram por meio da comunicação pela rede MEO, cujos caminhos são de maior latência.

É interessante destacar que na pesquisa de Zhu e outros (2019) utilizou-se a representação da rede pela ferramenta matemática grafos, uma estrutura matemática composta basicamente por um conjunto de vértices, também denominado de nós, e um conjunto de arestas, onde os vértices representam os objetos de algum tipo de problema e as arestas representam as relações entre esses objetos. Nesse caso, os satélites são representados pelos nós e as ligação entre eles pelas arestas. Considera-se que um caminho que une dois vértices u e v de um grafo G é o conjunto de vértices e arestas numa sequência de vértices e arestas consecutivas, cuja origem é u e destino é v, em que todos os vértices são distintos (HARARY, 1969). Os caminhos selecionados como caminhos primários e alternativos são chamados caminhos de trabalho e caminhos de reserva (ou backup), respectivamente. O comprimento de um caminho é definido como o número de arestas percorridas. Dessa forma, os grafos permitiram uma melhor manipulação e escolha de caminhos, visando baixa latência, uma vez que a latência é proporcional ao comprimento de um caminho, além de proporcionar caminhos alternativos em caso de falhas, pelos caminhos de backup.

Dentre os possíveis fatores que acarretam falhas é o cinturão de radiação de Van Allen, situado na região interna do campo magnético da Terra, contendo partículas eletricamente carregadas. Os dois principais cinturões da Terra se localizam a altitudes de 640 km a 58 mil quilômetros, de modo que engloba os satélites, podendo danificá-los (ALLEN, 1958). Na matéria de Mori (2019), afirma-se que há regiões onde o campo magnético é muito baixo, de maneira a oferecer menor proteção a ventos solares, principalmente em altas altitudes. Especificamente na América do Sul, têm-se uma anomalia no campo magnético, tornando-o de baixa intensidade e assim, comprometendo equipamentos atmosféricos e satélites sob essa região. Martins (2020) em seu noticiário, também comenta da anomalia no campo na América do Sul, pontuando como uma depressão que parece estar se dividindo ao meio. Como a depressão permite que raios cósmicos e partículas carregadas cheguem mais abaixo na atmosfera, os satélites podem ser atingidos por prótons de alta energia e entrar em curto-circuito.

Apesar da latência ser tratada nas pesquisas acerca de redes de satélite, ainda há muitas questões a serem abordadas. A rede *Starlink* ainda requer melhorias. Se trata de uma rede estática quanto ao número de satélites, não considerando o comportamento da rede caso haja a necessidade do acréscimo de satélites, ou seja, não é vista como uma rede flexível quanto a essas alterações. Além disso, sua atenção se dá a latência em ligações ascendentes e descendentes (entre o terminal terrestre e o satélite), ficando à pesquisa a resolução de problemas de atraso em ligações intersatélites (ISL, do inglês *inter-satellite link*).

Embora Hu, Yeung e Li (2000) se preocupem com atraso nas comunicações móveis via satélite de dois níveis com ISLs, os autores não abordam a problemática de falhas. Já o estudo do sistema LEO/MEO com a atribuição de prioridades de serviços não garante melhorias em falhas e atrasos para os serviços de baixa prioridade, que utilizam a camada MEO, comprometendo os serviços de dados. Também não necessariamente atribui caminhos de *backup* de comprimento igual ou menor que o primeiro melhor caminho apresentado.

Portanto, para suprir as lacunas mencionadas e obter melhorias, vale a pena examinar a topologia da rede, uma vez que latência e vulnerabilidade a falhas estão intimamente ligadas a ela. É com isso que surge a ideia de modelagem das redes de satélites por grafos, com destaque na família dos grafos gêmeos, uma vez que essa classe de grafos apresenta propriedades

importantes como tolerância a falhas, melhor desempenho, custo, escalabilidade (capacidade de um grafo gêmeo gerar outro gêmeo após a inserção de um vértice, e de dois gêmeos se reunirem e formarem outro grafo gêmeo).

Dessa forma, ao modelar uma rede de satélites utilizando de grafos gêmeos, é possível calcular diversos invariantes (parâmetros numéricos que não levam em conta a forma como os nós estão rotulados) e analisar quais são importantes para determinar caminhos mais eficientes, de maior confiabilidade, robustez e menor custo, dentro de suas limitações.

Em especial, esse trabalho visa a modelagem da rede de satélites MEO *Spaceway* NGSO. A rede proposta para modelagem foi escolhida por ser de pequeno porte, logo, de maior facilidade para modelar e também, por ser uma rede MEO, que, como mencionado, apresenta maior atraso em sua topologia em relação às redes LEO.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo dessa pesquisa experimental é verificar se os grafos gêmeos são uma boa alternativa para o projeto das topologias de redes de satélites, ou seja, se é satisfatório e compensador realizar essa modelagem para algum tipo de rede de satélites.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos definidos nesse trabalho, a fim de alcançar o objetivo geral, estão listados a seguir:

- Modelar a rede de satélites Spaceway NGSO, em um determinado instante de tempo, como um grafo, e analisar suas características topológicas;
- Analisar as características topológicas dos grafos gêmeos, em comparação à rede Spaceway NGSO;
- Selecionar um conjunto de métricas de grafos apropriadas para uma análise comparativa entre grafos gêmeos e a rede *Spaceway* NGSO;

• Avaliar a adequação do modelo de grafos gêmeos, com base nas métricas selecionadas.

1.3 Organização do Trabalho

A seção 1 contextualiza o tema do trabalho, apresentando suas justificativas e objetivos.

A seção 2 traz o referencial teórico em que se baseia o trabalho. Ela aborda conceitos e considerações importantes de rede de satélites e apresenta algumas constelações, em especial a rede a ser trabalhada, a *Spaceway* NGSO. Também discute conceitos e considerações sobre grafos, grafos gêmeos e as métricas a serem utilizadas.

A seção 3 introduz algoritmos que serão utilizados no processo metodológico e também para a obtenção de resultados.

A seção 4 apresenta os métodos e as etapas de desenvolvimento do trabalho, sendo dividida em duas partes, cada uma para uma obtenção diferente de grafo para a modelagem.

A seção 5 demonstra os resultados obtidos a partir dos grafos selecionados da seção 4, em comparação com a rede *Spaceway* NGSO.

A seção 6 comenta sobre projetos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Redes de Satélites

A partir do estudo de referências acerca de redes de satélites, foi observado que a latência e a capacidade de manter a comunicação mesmo diante de falhas são fatores de melhoria que ainda são fontes de estudo.

Dentre as diversas formas de aprimoramento diante dos problemas apresentados, esse trabalho destaca a otimização por meio da topologia da própria rede, ou seja, como são as ligações entre os satélites e os caminhos percorridos na comunicação entre dois deles. Para isso, é importante o conhecimento de alguns conceitos e classificações relacionados a características topológicas de satélites, exemplos de redes existentes e detalhes da rede selecionada para o objetivo do trabalho.

2.1.1 Classificação quanto à altitude

É possível classificar uma rede de acordo com a altitude dos satélites. Dentre as classificações disponíveis na literatura, podemos listar a seguinte (WOOD, 2001):

- Órbita terrestre geoestacionária (GEO, do inglês geostationary earth orbit): localizada a cerca de 35.786 km de altitude, em plano coincidente com o Equador terrestre. Os satélites nessa órbita movem-se com a mesma velocidade de rotação da Terra;
- Baixa órbita terrestre (LEO, do inglês low earth orbit): geralmente localizada entre 500
 e 2.000 km de altitude. É preciso um grande número de satélites para fornecer uma cobertura global simultânea;
- Média órbita terrestre (MEO, do inglês medium earth orbit): geralmente localizada em altitudes entre 9.000 e 11.000 km. Estas órbitas podem permitir uma cobertura total da Terra com menor quantidade de satélites de maior tamanho. Nessa classificação, os satélites têm uma cobertura maior em relação às redes LEO, devido ao aumento da altitude. Porém, por possuir menos satélites, pelos caminhos serem maiores e por se movimentarem a uma velocidade menor, o atraso resultante é maior.

As classificações GEO, LEO e MEO se tratam de órbitas circulares, diferentemente da órbita terrestre elíptica (HEO, do inglês *highly elliptical orbit*).

2.1.2 Tipos de ligação

Como visto na Figura 1, os tipos de radiocomunicação são: (a) comunicação entre estação espacial e estação terrestre, (b) comunicação entre as estações espaciais, (c) comunicação entre estações terrestres via estação espacial, (d) comunicação entre satélites (ISL) e (e) é a localização e retransmissão de dados via satélite, uma combinação dos tipos (a) e (b) (MIYA, 1985).

Figura 1 – Tipos de radiocomunicação

Fonte: Miya (1985).

Nota: Traduzido pela autora.

O caminho de transmissão entre estação espacial e estação terrestre é referenciado como ligação ascendente ou ligação descendente, dependendo da direção de transmissão. Se a direção for da estação terrestre para a estação espacial, é chamada de ligação ascendente, caso contrário, ligação descendente.

2.1.3 ISLs

No presente trabalho, a análise consistirá nas ISLs, uma vez que objetiva otimizar a topologia da constelação em si.

Considera-se que órbita se refere ao ponto de localização do satélite no espaço (SOARES NETO, 1988) e que o plano orbital de um objeto com relação ao objeto orbitado é o plano geométrico em que a órbita está contida (MIYA, 1985). Diante disso, dentre as ISLs, há as ligações intra-planares e interplanares. As ligações intra-planares são as ligações entre satélites de mesmo plano orbital, onde um satélite tem uma ligação de comunicação com o satélite à frente ou atrás. São geralmente permanentes se as órbitas forem circulares, pois as posições dos satélites são fixas uma em relação à outra. Já as ligações interplanares se referem às ligações de satélites em planos orbitais adjacentes, podendo não ser permanentes (WOOD, 2001).

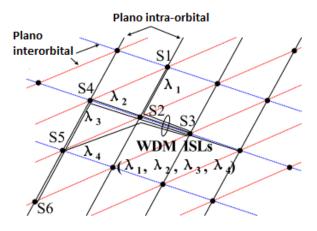
Esse padrão para ligações intra-planares e interplanares também foi observado para outras constelações. Keller e Salzwedel (1996) e Wood (2003) afirmam esse padrão de ligação para a constelação Iridium e Handley (2018) para a rede *Starlink*.

Vale ressaltar que as ligações são dinâmicas, ou seja, os satélites se movem e a cada momento se configuram para estabelecer uma nova rota de comunicação. Como o estudo desse trabalho está em sua fase inicial, em primeira instância será considerada apenas uma configuração de rede estática, isto é, serão analisadas as ISLs somente em um determinado instante de tempo.

Por características construtivas, as ISLs a *laser* usam uma tecnologia que promete alta capacidade de comunicações entre satélites no futuro. Na maioria das constelações, as ISLs são projetadas com um único canal óptico. Porém, Karafolas e Baroni (2000) propuseram formar uma rede de transporte óptico (OTN, do inglês *optical transport network*), onde as ISLs são multiplexadas por divisão de comprimento de onda (WDM, do inglês *wavelength division multiplexing*), conforme mostra a Figura 2.

Tan e outros (2010) propuseram roteamento de comprimento de onda sobre constelações de satélites não geoestacionárias (WROTNS, do inglês *wavelength-routed optical transport networks over nongeosychronous satellite*), uma vez que realizando o roteamento por comprimento de onda das ISLs que utilizam WDM, aproveitam de forma eficiente a largura de banda do amplificador óptico do satélite, além de simplificar as decisões de roteamento e minimizar os atrasos.

Figura 2 – WDM ISLs e roteamento de comprimento de onda em OTN em constelações não geoestacionárias



Fonte: Tan e outros (2010). Nota: Traduzido pela autora.

Tan e outros (2010) consideram no modelo de redes que cada satélite deve conter elementos ópticos como terminais ISL ópticos, unidades terminais e unidade de roteamento de comprimento de onda. Também afirmam que, geralmente, cada satélite possui quatro ou seis terminais ISL para fornecer o caminho óptico, ou seja, cada satélite pode se comunicar com outros quatro ou seis satélites. Ainda, as ligações ópticas entre satélites da rede são bidirecionais. A Figura 3 mostra o esquema dos nós ópticos de cada satélite.

No WROTNS, a cada conexão solicitada, é atribuído uma rota de menor custo, uma rota alternativa e um comprimento de onda específico. Essa rota é uma sequência de ISLs, desde o satélite de origem até o de destino, atravessando os vários nós intermediários.

As limitações de conexões dos satélites apresentadas pelos autores Tan e outros (2010) são o número de terminais ópticos por satélite e a distância máxima do ISL óptico. Além disso, essa distância de ISL entre dois satélites é contada como custo, decisivo para a escolha das rotas, uma vez que, quanto maior a distância, maior o atraso de propagação. Em uma conexão, o número de saltos ISL de um satélite de origem a um de destino também proporciona maior atraso na propagação, quanto maior o número de saltos, maior o atraso.

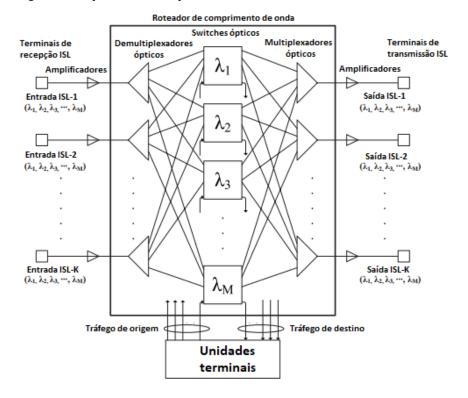


Figura 3 – Esquema dos nós ópticos de cada satélite

Fonte: Tan e outros (2010). Nota: Traduzido pela autora.

Definidas as rotas para cada par de satélites, elas são agrupadas em ordem decrescente de custo de *links*. Dessa forma, escolhe-se aleatoriamente uma das rotas no primeiro grupo e atribui-se o comprimento de onda de menor índice ainda não utilizado em qualquer ISL dessa rota. Repete-se esse procedimento para as demais rotas do grupo. Após, o mesmo é feito para o grupo seguinte e assim por diante.

2.1.4 Geometria da Terra e satélite em órbita

A Figura 4 apresenta alguns parâmetros da geometria de satélites, onde O representa o centro da terra, S um satélite a uma altitude de H e M o ponto sub-satélite. Se S for um satélite geoestacionário e E a estação terrestre, α é o ângulo entre o sub-satélite e a estação terrestre vista do satélite S e, β a distância angular entre E e M sobre a superfície terrestre. θ representa o ângulo de elevação do satélite e l a distância entre S e E. R=6.378 km é o raio da Terra, γ a latitude da estação terrestre e $\Delta \phi = \phi_E - \phi_S$ a diferença longitudinal entre a estação terrestre e o ponto sub satélite. δ é o azimute do satélite medido a partir do norte da estação terrestre.

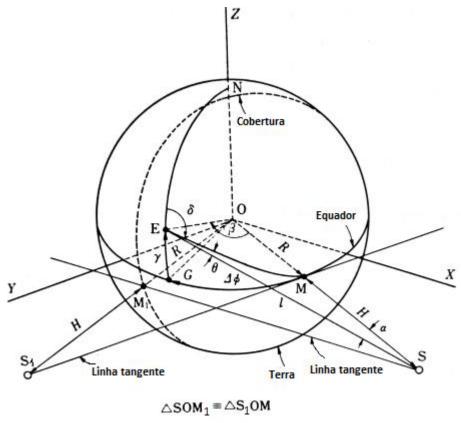


Figura 4 – Geometria da Terra e satélite em órbita

Fonte: Miya (1985).

Nota: Traduzido pela autora.

A área visível de S, delimitada pelas tangentes de S na superfície da Terra é chamada de cobertura por satélite. Seja S_1 um satélite de mesma altura H que o satélite S e, M_1 o sub-satélite de mesmo plano horizontal que M, então a área de cobertura de S é igual a área de cobertura de S_1 (MIYA, 1985).

Os parâmetros citados que envolvem *S* também são aplicáveis para qualquer outro satélite, não necessariamente geoestacionário.

2.1.5 Distância entre dois pontos na superfície da Terra

Considerando a Terra esférica, conforme ilustrado na Figura 5, sejam Q_1 e Q_2 dois pontos na superfície da Terra com latitudes γ_1 e γ_2 , respectivamente, e $\Delta \phi$ a diferença de suas longitudes.

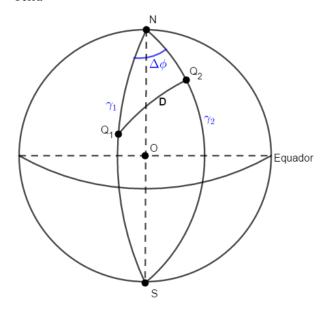


Figura 5 – Distância entre dois pontos na superfície da Terra

Fonte: Produção da própria autora.

O arco D unindo os dois pontos é a distância entre Q_1 e Q_2 na superfície da Terra, podendo ser encontrado a partir da equação (1), mais conhecida como lei dos cossenos.

$$cos(D) = sen(\gamma_1) \cdot sen(\gamma_2) + cos(\gamma_1) \cdot cos(\gamma_2) \cdot cos(\Delta \phi)$$
 (1)

Porém, o valor de D encontrado pela equação (1) se refere à uma esfera de raio unitário. Para encontrar a distância D a um raio r do centro da Terra, basta multiplicar D por r.

2.1.6 Constelações de satélites

Há diversas constelações conhecidas existentes e que são potencial fonte de estudo quanto a sua topologia. Essas constelações apresentam diferentes características como aplicações, altitudes orbitais, número de órbitas e número de satélites. Como exemplo, pode-se citar as constelações Celestri, *Globalstar*, Órbita Circular Intermediária 10 (ICO-10, do inglês *Intermediate Circular Orbit*), Iridium, LEONET, *Odyssey*, *Spaceway* NGSO e Teledesic. O Quadro 1 apresenta as constelações mencionadas, com destaque no número de satélites, número de órbitas e sua classificação orbital, características importantes quando se trata de topologia.

Quadro 1 – Constelações de satélites

Constelação	Número de Satélites	Número de órbitas	Altura orbital
Celestri	63	7	1400 km (LEO)
Globalstar	48	8	1400 km (LEO)
ICO-10	10	2	10350 km (MEO)
Iridium	66	6	780 km (LEO)
LEONET	15	3	6390 km (MEO)
Odyssey	12	3	10354 km (MEO)
Spaceway NGSO	20	4	10352 km (MEO)
Teledesic	288	12	1650 km (LEO)

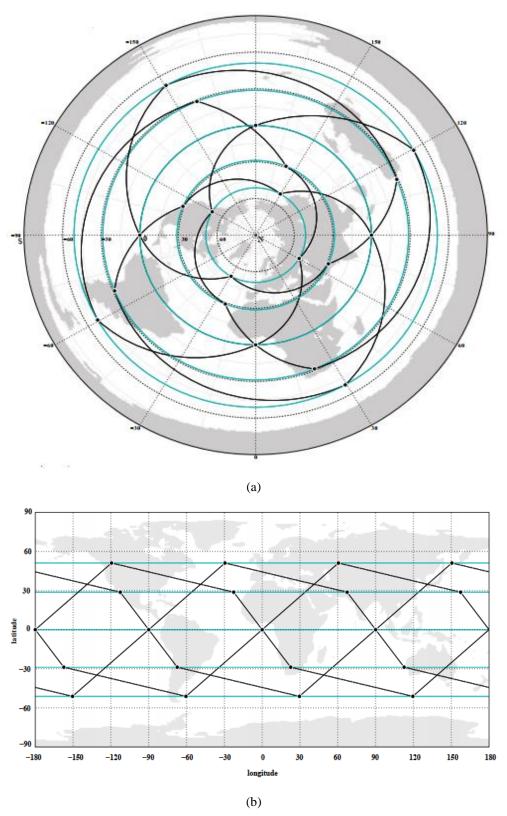
Fonte: Karafolas e Baroni (2000), Donner e outros (2004), Schindall (1995), Werner e outros (1995), Montero e outros (2002), Hart e outros (1995), Hutcheson e Laurin (1995), Keller e Salzwedel (1996), Spitzer (1993), Wood (2001), Federal Communications Comission (2002), Wood (2003).

Dentre as diversas redes de satélites, priorizou-se o estudo e aplicação no presente trabalho de redes de menor porte, a fim de uma maior facilidade na modelagem. Com isso, foi escolhida a rede *Spaceway* NGSO, por ser uma rede simples e cuja literatura foi capaz de fornecer dados essenciais para a posterior construção de seu modelo em grafos. O fornecimento da informação da disposição dos satélites em coordenadas e como ocorrem suas ligações, em um determinado instante de tempo t, foi decisivo para a seleção da rede *Spaceway* NGSO, uma vez que esses dados são dificilmente encontrados nas referências e seriam essenciais para a modelagem.

A rede *Spaceway* NGSO possui 20 satélites distribuídos igualmente em 4 órbitas, classificadas como MEO. Cada satélite é capaz de manter o mesmo número de ISLs (grau de conectividade) que, nesse caso, é igual a quatro (duas ligações intra-planares e duas ligações interplanares), formando uma malha de rede regular.

A Figura 6 apresenta a topologia da Spaceway NGSO em um dado momento do tempo, sendo as ligações intra-planares representadas pelas linhas pretas e as ligações interplanares representadas pelas linhas azuis.

Figura 6 – Constelação $\it rosette Spaceway \, NGSO \, e \, suas \, projeções \, (a) \, equidistante azimutal \, e \, (b) \, longitude \, x \, latitude$



Fonte: Wood (2003). Nota: Traduzido pela autora.

2.2 Teoria dos Grafos

A Teoria de Grafos é uma ferramenta que possui grande potencial para facilitar a modelagem e a resolução de problemas nas mais diversas áreas. Uma rede de satélites, por exemplo, pode ser modelada a partir de um grafo, onde os vértices representam os satélites e as arestas correspondem aos canais de comunicação entre eles. Por meio dessa representação surge a possibilidade da utilização de diversos recursos da Teoria de Grafos no estudo das redes de satélites.

2.2.1 Definições

Matematicamente, um grafo é uma estrutura G = G(V, E), onde V é um conjunto finito e não vazio de objetos denominados nós ou vértices, e E é um conjunto de subconjuntos $\{u, v\}$, com $u, v \in V$, denominados arestas. Se e é a aresta que contém os vértices u e v, denotado por e = uv, então é dito que u e v são adjacentes e que o vértice u e a aresta e são incidentes. Convenciona-se o uso de n para representar o número de nós e m para representar o número de arestas de um grafo.

A seguir são apresentadas algumas definições importantes sobre grafos:

- Caminho: um caminho P chamado de u v de G é definido como um subconjunto do grafo G, tal que os vértices podem ser listados como P = (u = v₀, v₁, ..., v_k = v), com (v₀v₁, ..., v_{k-1}v_k) sendo arestas de P (BENJAMIN; CHARTRAND; ZHANG, 2015). Nesse caso, se o vértice origem v₀ for igual ao vértice destino v_k, para k > 1, têm-se um caminho fechado. Os nós intermediários do percurso são distintos entre si e dos nós de origem e destino, de modo que em um caminho não se admite a repetição de vértices e arestas;
- Cadeia: similar ao conceito de caminho, porém admite repetição de vértices e arestas;
- Conexidade: um grafo G é conexo quando houver ao menos um caminho interligando qualquer par de nós {u, v} de G. Caso contrário, é dito desconexo (HARARY, 1969; ABREU et al., 2007);

- Conectividade de nós e arestas: a conectividade de nós NCon(G) de um grafo G é o menor número de nós que precisam ser retirados para torná-lo desconexo (ABREU et al., 2007). Um grafo é k-conexo se NCon(G) ≥ k, de modo que há k caminhos disjuntos que interligam qualquer par de nós (WHITNEY, 1932; HARARY, 1969). Da mesma forma, a conectividade de arestas ECon(G) de um grafo G é o menor número de arestas que precisam ser retiradas para torná-lo desconexo (ABREU et al., 2007). Um grafo é k'-aresta-conexo se ECon(G) ≥ k', de modo que há k' caminhos disjuntos por arestas que interligam qualquer par de nós (WHITNEY, 1932; HARARY, 1969);
- Matriz de adjacência: a matriz de adjacência de ordem n do grafo G, denotada por A(G)
 é definida pela equação (2) (ABREU et al., 2007):

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{ se } v_i, v_j \in E \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$
 (2)

O polinômio característico da matriz de adjacência de G é definido pela equação (3):

$$P_{A(G)}(\mu) = \det\left(\mu I - A(G)\right) \tag{3}$$

onde I é a matriz identidade de ordem n e as raízes $\mu_1, \mu_2, ..., \mu_n$ de $P_{A(G)}$ são denominadas de autovalores de A(G), que não são necessariamente distintos e assumem valores reais;

- Matriz laplaciana: a matriz laplaciana de um grafo G de n nós, denotada por L(G), é definida por Abreu e outros (2007) como L(G) = D(G) A(G), onde D = D(G) é a matriz diagonal dos graus, também de ordem n, tal que D[i,j] = d(vi), vi ∈ V, e D[i,j] = 0 ∀ i ≠ j.
- Peso: denotado por w(u, v), é medida atribuída a cada aresta e = uv (BENJAMIN; CHARTRAND; ZHANG, 2015);
- Um ciclo é um caminho fechado, que começa e termina no mesmo nó (HARARY, 1969);
- Uma árvore é um grafo conexo que não possui ciclos (acíclico) (HARARY, 1969);

 Grafo dirigido: também chamado de grafo orientado, grafo direcionado ou dígrafo, são grafos que são associados sentido às suas arestas, ou seja, uma aresta {u, v} é diferente de uma aresta {v, u} (BENJAMIN; CHARTRAND; ZHANG, 2015).

Especificamente, tem-se as métricas utilizadas em grafos que merecem atenção quanto à sua definição. São elas:

- (a) Distância: denotada por $dist_G(u, v)$, é o comprimento do menor caminho entre dois nós $\{u, v\}$ de G. Também chamado de distância geodésica (HARARY, 1969). A distância média é a média das distâncias de todos os pares $\{u, v\}$ de G;
- (b) Diâmetro: denotado por diam(G), é a maior distância dentre todos pares de vértices de um grafo G (HARARY, 1969; ABREU et al., 2007);
- (c) Distância de resistência: a distância de resistência $\Omega_G(u,v)$ entre dois nós $\{u,v\}$ de G é semelhante a tratar o grafo como uma rede elétrica e calcular a resistência equivalente entre cada par de nós $\{u,v\}$. Uma aresta com peso w(u,v) corresponde a um resistor com valor de resistência $\Omega_G(u,v) = \frac{1}{w(u,v)}$ (VOS, 2016). Com isso, dentre os vários valores de distância de resistência, pode-se obter, numa rede, as distâncias de resistência máxima, mínima e média;
- (d) Grau: denotado por $grau_G(v)$, é o número de arestas que incidem em um nó v de um grafo G. Os graus mínimo e máximo de G são $\psi(G)$ e $\Psi(G)$, respectivamente (HARARY, 1969);
- (e) Centralidade de *betweenness* (CB) de vértices e arestas: a centralidade de *betweenness* de um vértice v, denotada por $C_b(v)$, quantifica o número de vezes que um vértice v participa do caminho mais curto entre cada par de vértices (FREEMAN, 1977; BRANDES; FLEISHER, 2005). A equação (4) apresenta a ideia matematicamente.

$$C_b(v) = \frac{1}{n_b} \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$$
(4)

onde $\sigma_{st}(v)$ é o número de menores caminhos entre s e t que passam pelo vértice v, σ_{st} é o número de menores caminhos que ligam o vértice s a t e $n_b = (n-1)(n-2)$ é uma constante de normalização $(n_b = n(n-1)$ se v for o nó origem ou destino). Analogamente, a centralidade de *betweenness* de uma aresta e, quantifica a proporção

de menores caminhos que uma aresta participa do caminho mais curto entre cada par de vértices. Como cada vértice e aresta possui um valor de centralidade de *betweenness*, é possível determinar os valores máximo, mínimo e a média de centralidade de *betweenness* de nós e de arestas;

(f) Centralidade de *closeness* (CC): refere-se à soma das distâncias geodésicas de um nó a todos os outros (n-1) nós da rede (BRANDES; FLEISHER, 2005). A equação (5) define o cálculo da centralidade de *closeness*:

$$C_c(u) = \frac{n_c}{\sum_{v \neq u} d_G(u, v)}$$
 (5)

onde $d_G(u,v)$ representa o comprimento de um caminho mais curto entre os nós u e v e, $n_c = n - 1$ é uma constante de normalização. Como cada vértice possui um valor de centralidade de *closeness*, é possível determinar os valores máximo, mínimo e a média dessa métrica;

- (g) Conectividade algébrica: denotada por ConAlg(G), corresponde ao segundo menor autovalor da sua matriz laplaciana associada. Segundo Fiedler (1973), um grafo é conexo se, e somente se, o seu segundo menor autovalor Laplaciano é positivo. Logo, se ConAlg(G) > 0, o grafo é conexo e, se um grafo é conexo, ConAlg(G) > 0;
- (h) Índice de Estrada: Estrada (apud LA PEÑA; GUTMAN; RADA, 2007) definiu uma invariante chamada índice de Estrada, expressa pela equação (6):

$$EE(G) = \sum_{i=1}^{n} \exp(\mu_i)$$
 (6)

onde exp é o número de Euler e $\mu_1, \mu_2, ..., \mu_n$ são os autovalores da matriz de adjacência A(G) de ordem n, conforme ainda visto nas definições em 2.2.1;

(i) Current flow closeness centrality (CFCC): também conhecida como centralidade de fluxo de corrente, essa métrica de centralidade pode ser comparada a corrente elétrica que flui em uma malha de circuito elétrico, porém disseminando informações. Assim como a corrente elétrica, as informações se espalham com eficiência em uma malha ao invés de apenas percorrerem os menores caminhos. De mesmo modo visto para o cálculo da distância de resistência, seja o grafo G comparado a uma rede de resistores cujas arestas representam resistores de resistência $\Omega_G(u,v) = \frac{1}{w(u,v)}$ e que $v_{st}(u)$

representa a tensão do nó u quando uma unidade de corrente entra na rede no nó s e sai no nó t. Assim, o cálculo da *current flow closeness centrality* para um nó u é expresso pela equação (7) (BRANDES; FLEISHER, 2005):

$$C_{cfcc}(u) = \frac{n_c}{\sum_{v \in V} (v_{uv}(u) - v_{uv}(v))}$$
(7)

onde $n_c = n - 1$ é uma constante de normalização. Como cada vértice possui um valor de *current flow closeness centrality*, é possível determinar os valores máximo, mínimo e a média dessa métrica;

(j) Communicability betweenness centrality (CBC): o valor de communicability betweenness centrality de um nó v, denotada por $C_{cbc}(v)$, é calculado segundo a equação (8) (ESTRADA; HIGHAM; HATANO, 2009):

$$C_{cbc}(v) = \frac{1}{n_{cbc}} \sum_{s \neq t \in V} \sum_{t \neq v \in V} \frac{P_{st}(v)}{P_{st}}$$
(8)

onde $P_{st}(v)$ é o número de cadeias entre s e t que passam pelo vértice v, P_{st} é o número de cadeias começando no nó s e terminando no nó t, e $n_{cbc} = (n-1)^2 - (n-1)$ é um fator de normalização igual ao número de termos na soma. Observe que a ideia dessa métrica de centralidade se assemelha a ideia da centralidade de *betweenness* de vértices, porém voltada à análise de caminhos de qualquer comprimento envolvendo os nós inicial e final e não somente o menor caminho entre eles. Como cada vértice possui um valor de *communicability betweenness centrality*, é possível determinar os valores máximo, mínimo e a média dessa métrica.

2.2.2 Métricas de grafos em redes

Pode-se relacionar as métricas mencionadas na seção 2.2.1 com a eficiência da rede, no quesito de menores caminhos e robustez (capacidade da rede em suportar falhas em nós), avaliando também a questão de viabilidade e custos.

É importante projetar uma rede que possua menor valor de diâmetro possível e que as comunicações entre dois nós se deem por meio de geodésicas, com o intuito de evitar atrasos. Da mesma forma, quanto menor o valor de distância de resistência entre dois nós, melhor será.

Quanto maior o valor do grau em um nó, mais importante ele será para a rede. Logo, o grau pode ser visto como uma métrica de centralidade. Caso ocorra uma falha em nós de maiores graus, mais comprometedor será para a rede em questão. Com isso, é importante avaliar o grau máximo para que não ultrapasse o valor suportado pelos aspectos construtivos do objeto representado pelo nó. Valores de grau elevados podem gerar custos inviáveis ou outros fatores limitantes e indesejáveis.

As conectividades de nós e arestas podem ser consideradas métricas de robustez, uma vez que uma rede k-conexa pode suportar até (k-1) falhas sem comprometer a existência de comunicação entre quaisquer dois pontos.

A conectividade algébrica é considerada uma métrica de robustez, pois pode ser vista como medida de dificuldade de quebrar uma rede em sub-redes independentes (JAMAKOVIC; UHLIG, 2007).

Com relação às métricas de centralidade, quanto maior a *betweenness* e a *closeness* de uma aresta ou vértice e também quanto maior o valor da *current flow closeness centrality* e *communicability betweenness centrality*, mais importante esses objetos são. Logo, sua retirada ou falha será mais comprometedora para toda a rede.

2.2.3 Grafos gêmeos

Dentro do universo dos grafos, os grafos gêmeos se destacam devido as suas características de tolerância a falhas, desempenho, custo e escalabilidade. Por definição, os grafos gêmeos são grafos 2-geodesicamente-conexos (2-GC) minimais, ou seja, para cada par de nós não adjacentes do grafo, existem no mínimo 2 geodésicas (menores caminhos) disjuntas que os interligam e, além disso, são os grafos com o menor número de arestas a possuírem tal propriedade (VASSOLER et al., 2014). Dessa forma, caso ocorra uma falha em qualquer nó ou

aresta, a comunicação entre dois nós não adjacentes não é comprometida, pois a ligação entre eles pode ser substituída por outra geodésica. A Figura 7 exemplifica um grafo gêmeos de 14 nós e 24 arestas. Observe que, para cada par de nós não adjacentes, há pelo menos duas geodésicas disjuntas os conectando.

Grafos gêmeos também garantem escalabilidade, uma vez que, ao adicionar um nó a um grafo gêmeos de n nós, é possível gerar um outro grafo gêmeo de (n + 1) nós, além de ser possível gerar um grafo gêmeo a partir de dois outros.

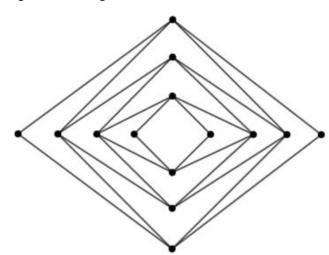


Figura 7 – Grafo gêmeo com 14 nós

Fonte: Produção da própria autora.

3 ALGORITMOS

Para a obtenção dos resultados foram utilizadas ferramentas matemáticas, como certos algoritmos, que merecem prévia explicação teórica para posterior aplicação, dentro do contexto estudado.

3.1 Nearest Neighbors

Segundo Cover e Hart (1967), o método *Nearest Neighbors* ou método dos vizinhos mais próximos ou k-NN tem o objetivo de encontrar um número predefinido k de amostras de treinamento mais próximas em distância do novo ponto ou objeto, e prever o rótulo para esse ponto a partir do rótulo desses k vizinhos. A distância euclidiana é a mais comumente usada. O número k pode ser estipulado pelo usuário ou variar com base na densidade local dos pontos.

Para um estudo em grande escala, pode-se fazer uma análise do k-NN para definir os pontos mais prováveis de serem considerados *outliers* do conjunto, ou seja, pontos cujos valores fogem da normalidade, onde a distância até o k-ésimo vizinho mais próximo pode ser usada como uma estimativa de densidade local. Logo, quanto maior a distância, menor a densidade local e maior a probabilidade de que o ponto comparado com o ponto de referência seja um ponto *outilier*.

3.2 Algoritmo Genético

O algoritmo genético (AG) se baseia na teoria da evolução das espécies, proposta por Charles Darwin. Consiste no fato de que indivíduos mais aptos têm maior probabilidade em sobreviver, cruzar e gerar indivíduos ainda mais aptos que os pais, uma vez que herdaram seus genes (MITCHELL, 1998).

O AG parte de uma população inicial constituída por alguns indivíduos (primeiras soluções). Esses indivíduos são submetidos a uma avaliação *Fitness*, ou seja, a função objetivo, que calcula a aptidão de cada um. Após, é feita uma seleção dos progenitores da próxima população,

onde os mais aptos possuem maior probabilidade de cruzamento. No cruzamento, os indivíduos são combinados entre si, aumentando a probabilidade de gerarem indivíduos ainda melhores que a população anterior. Assim, alguns indivíduos são escolhidos aleatoriamente para terem seus genes modificados, a fim de aumentar a diversidade da população. Após todo esse processo, se o critério de parada for atendido, o indivíduo mais apto é a solução. Caso contrário, o processo continua até atingir o critério de parada.

O AG possui algumas fases, que podem variar com a necessidade de cada modelagem. Aqui é citado:

- Codificação: é a primeira etapa do algoritmo, onde são gerados alguns indivíduos (primeiras soluções), que correspondem à população inicial;
- Avaliação Fitness: após a geração da população inicial, é aplicada a avaliação Fitness,
 ou seja, a função objetivo. Desse modo é calculada a aptidão de cada indivíduo;
- Seleção: com a aptidão de cada indivíduo, é feita uma seleção dos progenitores da próxima população. Os mais aptos possuem maior probabilidade de cruzamento;
- Cruzamento: após a seleção dos indivíduos, eles são combinados entre si, aumentando a probabilidade de gerarem indivíduos ainda melhores que a população anterior;
- Mutação: alguns indivíduos são escolhidos de forma aleatória para serem mudados geneticamente. A mutação garante o aumento a diversidade da população;
- Decodificação: após os passos anteriores, se o critério de parada for atendido, o indivíduo mais apto é a solução, chegando-se ao fim do algoritmo. Caso contrário, o algoritmo se repete iterativamente até atingir o critério de parada.

A Figura 8 representa o fluxograma do AG.

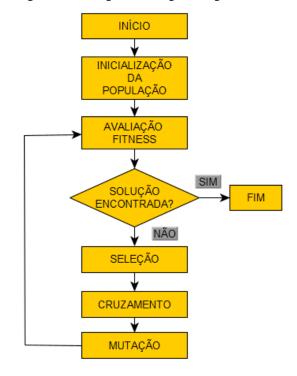


Figura 8 – Fluxograma do algoritmo genético

Fonte: Produção da própria autora.

3.3 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo de *Dijkstra* soluciona o caminho mais curto, em termos do peso total das arestas, entre um nó origem e todos os outros nós de um grafo dirigido ou não dirigido com arestas de peso não negativo (DIJKSTRA, 1959). O peso total das arestas é a soma dos pesos das arestas que compõem o caminho. Seu tempo computacional é de $O([m+n]\log(n))$, onde m é o número de arestas e n é o número de vértices.

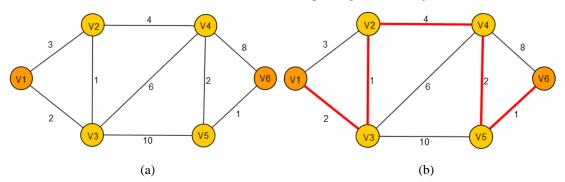
O algoritmo de *Dijkstra* é descrito na sequência, para encontrar o caminho de custo mínimo entre o vértice origem v_o e o vértice destino v_d de G(V, E)(OLIVEIRA, 2010):

- i. O vértice origem v_o recebe custo 0 e todos os outros vértices recebem custo $+\infty$;
- ii. Marcar todos os outros nós como não selecionados;
- iii. Considerar v_o como vértice atual;
- iv. Marcar o vértice atual como selecionado;
- v. Calcular a soma de custo da ligação do vértice atual com cada vértice i não selecionado, vizinho do vértice atual;

- vi. Atribuir o custo calculado no passo 5 como custo do vértice a, para o vértice a selecionado dentre os casos em que se obteve a menor soma de custos em cada nó vizinho i;
- vii. Se o vértice destino v_d for marcado como selecionado, o algoritmo termina e o caminho de menor custo procurado é o caminho de v_o a v_d incluindo os vértices selecionados durante o processo. Caso contrário, repete-se o procedimento a partir do passo 4, considerando o nó atual a aquele selecionado no passo 6, cujo custo de v_o a a é o menor.

Para exemplificar os passos do algoritmo de *Dijkstra*, seja o grafo ilustrado na Figura 9(a), cujos vértices de origem e destino são $v_o = v_1$ e $v_d = v_6$. O caminho de menor custo obtido é $v_1 \leftrightarrow v_3 \leftrightarrow v_2 \leftrightarrow v_4 \leftrightarrow v_5 \leftrightarrow v_6$, conforme visto na Figura 9(b), com custo 10.

Figura 9 – Exemplificação do algoritmo de Dijkstra: (a) grafo inicial, com $v_0 = v_1$ e $v_d = v_6$ e (b) caminho de menor custo destacado em vermelho, obtido pelo algoritmo de Dijkstra



Fonte: Produção da própria autora.

O Quadro 2 mostra os passos acima para cada iteração do algoritmo, até se chegar ao vértice destino e obter o caminho de menor custo.

Quadro 2 – Passo a passo algoritmo de Dijkstra para o exemplo da Figura 9

Vértices	1ª iteração	2ª iteração	3ª iteração	4ª iteração	5ª iteração	6ª iteração
v_1	$0, v_1$	*	*	*	*	*
v_2	$3, v_1$	$3, v_3$	$3, v_3$	*	*	*
v_3	2, <i>v</i> ₁	$2, v_1$	*	*	*	*
v_4	∞	$8, v_3$	$7, v_2$	$7, v_2$	*	*
v_5	∞	12, v_3	∞	9, v_4	9, v_4	*
v_6	∞	∞	∞	15, v_4	10, v_5	$10, v_5$

Fonte: Produção da própria autora.

Realizando os passos do algoritmo de Dijkstra, pela primeira vez (primeira iteração), calculase o custo de cada vértice vizinho i ao vértice de origem v_1 , considerado vértice atual e, por isso, destacado em vermelho no Quadro 2. Os vértices que não são vizinhos ao vértice atual recebem custo infinito. Na primeira iteração, o caminho de menor custo é $v_1 \leftrightarrow v_3$, com custo 2, sendo por isso, destacado de vermelho para a próxima iteração, onde o vértice de referência (vértice atual) passa a ser v_3 . O asterisco indica que o nó já foi visitado, não podendo mais ser considerado para nova escolha de rota. O mesmo raciocínio é repetido na segunda iteração, porém, agora calculando-se o custo da aresta que parte de v_3 até seus vértices vizinhos e somando esse custo com o menor custo calculado na iteração anterior. Os vértices não adjacentes ao vértice vizinho recebem custo infinito. Por fim, seleciona-se o caminho de menor custo e atualiza-se o vértice de referência. O algoritmo segue essa lógica, traçando-se o caminho de menor custo até o vértice destino v_6 . Com isso, obtêm-se o caminho $v_1 \leftrightarrow v_3 \leftrightarrow v_2 \leftrightarrow v_4 \leftrightarrow v_5 \leftrightarrow v_6$ de menor custo do nó origem v_1 ao nó destino v_6 , com custo 10.

3.4 Algoritmo de Suurballe e Tarjan Original - Disjuntos por Arestas

Dado um grafo G(V, E) 2-aresta-conexo, cujas arestas possuem peso unitário, para cada par de vértice origem v_o e vértice destino v_d de G, o algoritmo de Suurballe e Tarjan (ST) encontra o menor par de caminhos disjuntos por arestas que os interligam (SUURBALLE; TARJAN, 1984), podendo esses, serem usados como caminho de trabalho e caminho de backup.

A garantia de poder encontrar dois caminhos é devido ao grafo ser 2-aresta-conexo. Observe ainda que, se o grafo *G* for 2-geodesicamente-conexo, então os caminhos de trabalho e de *backup* são os menores caminhos disjuntos possíveis e de mesmo comprimento, interligando os vértices de origem e destino, que é o caso do grafo a ser aplicado.

A seguir, os passos do algoritmo ST (OLIVEIRA, 2010):

- i. Caso o grafo seja não-orientado, transforma-o em um grafo orientado;
- ii. Definição do menor caminho P_1 entre os vértices v_o e v_d através da execução do algoritmo de Dijkstra.

iii. Modifica-se o peso (custo) das arestas, obedecendo a seguinte regra mostrada na equação (9):

$$w(v_{i}, v_{j}) = \begin{cases} N, & se(v_{i}, v_{j}) \in P_{1} \\ w(v_{i}, v_{j}) + d(v_{o}, v_{j}) - d(v_{o}, v_{j}), & se(v_{i}, v_{j}) \notin P_{1} e(v_{j}, v_{i}) \notin P_{1} \end{cases}$$

$$0, & se(v_{j}, v_{i}) \in P_{1}$$

$$(9)$$

onde $w(v_i, v_j)$ é o custo da aresta $d(v_i, v_j)$ e $d(v_o, v_j)$ é o custo total do caminho mais curto entre os vértices v_o e v_j . Observe que se a aresta pertencer a P_1 , recebe custo infinito, atribuído por N no presente trabalho, se for no mesmo sentido a que foi atribuído P_1 . Se for no sentido contrário, recebe custo zero. Caso a aresta não pertença a P_1 , o custo sofre a transformação indicada. Nesse passo, é calculada a árvore de caminhos mais curto (T) no grafo, sendo o vértice de origem chamado de raiz da árvore;

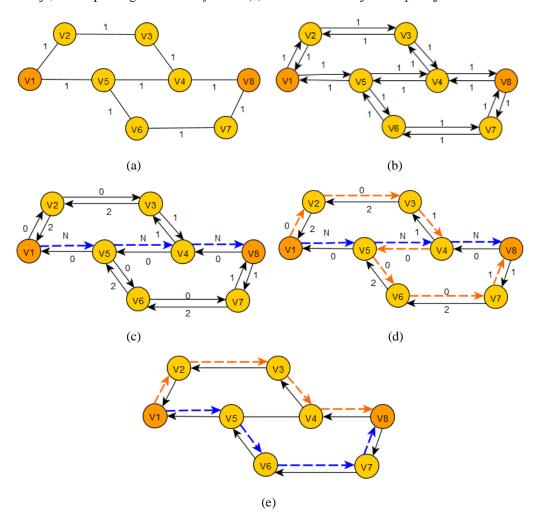
- iv. Executa-se o algoritmo de Dijkstra novamente, agora com os novos pesos, de modo a encontrar o segundo menor caminho P_2 ;
- v. Se houver aresta em comum em P_1 e P_2 , esses caminhos são redefinidos como P_1' e P_2' , respectivamente, onde P_1' é formado pelas arestas iniciais de P_1 , que antecedem a aresta compartilhada, seguida pela junção das arestas finais de P_2 , que sucedem a aresta compartilhada. A mesma lógica é aplicada a P_2' , formado pelas arestas iniciais de P_2 , que antecedem a aresta compartilhada, seguida pela junção das arestas finais de P_1 , que sucedem a aresta compartilhada. Esse procedimento se repete caso houver mais arestas compartilhadas, até que se obtenha dois caminhos disjuntos por arestas. Caso não houver aresta em comum em P_1 e P_2 , esses já são os caminhos disjuntos procurados.

Assim, P_1 e P_2 (caso não houver aresta em comum) ou P_1 e P_2 são definidos como os caminhos de trabalho e de *backup*. Mais especificamente, se o grafo for 2-GC, os dois caminhos disjuntos P1' e P2' possuem mesmo comprimento, exceto para pares de nós adjacentes.

Para exemplificar os passos do algoritmo ST, seja o grafo ilustrado na Figura 10(a), cujos vértices de origem e destino são $v_o = v_1$ e $v_d = v_8$. Como o grafo é não direcionado, transforma-o em direcionado, como ilustrado na Figura 10(b). O menor caminho P_1 obtido é

 $v_1\leftrightarrow v_5\leftrightarrow v_4\leftrightarrow v_8$, com três saltos. Ao modificar os pesos das arestas unitárias conforme equação (9), chega-se aos custos das arestas ilustrados na Figura 10(c). Com os novos pesos, o menor caminho P_2 obtido é $v_1\leftrightarrow v_2\leftrightarrow v_3\leftrightarrow v_4\leftrightarrow v_5\leftrightarrow v_6\leftrightarrow v_7\leftrightarrow v_8$, com custo dois, mostrado na Figura 10(d). Nesse caso, há aresta em comum entre P_1 e P_2 , a aresta $v_4\leftrightarrow v_5$. Dessa forma, são definidos os novos caminhos P_1' e P_2' , sendo $v_1\leftrightarrow v_2\leftrightarrow v_3\leftrightarrow v_4\leftrightarrow v_8$ e $v_1\leftrightarrow v_5\leftrightarrow v_6\leftrightarrow v_7\leftrightarrow v_8$, ambos com quatro saltos.

Figura 10 – Exemplificação das etapas do algoritmo ST: (a) grafo inicial, com $v_o = v_1$ e $v_d = v_8$, (b) transformação em grafo direcionado, (c) menor caminho P_1 tracejado de azul, obtido pelo algoritmo de Dijkstra e atribuição dos pesos às arestas, (d) menor caminho P_2 tracejado de laranja, obtido pelo algoritmo de Dijkstra e (e) dois caminhos disjuntos P_1 e P_2



Fonte: Produção da própria autora.

3.5 Algoritmo de Suurballe Generalizado – Disjuntos por Nós

O algoritmo de Suurballe generalizado é semelhante ao algoritmo para percursos disjuntos por arestas, conforme explicado na subseção 3.4, porém os caminhos de trabalho e de *backup* encontrados são também disjuntos por nós. Como caminhos disjuntos por nós também são disjuntos por arestas (a volta não necessariamente é válida), o algoritmo de Suurballe disjunto por nós também é chamado de algoritmo de Suurballe generalizado.

Os passos do algoritmo de Suurballe generalizado segue a sequência (SUURBALLE; TARJAN, 1984):

- i. Caso o grafo seja não-orientado, transforma-o em um grafo orientado;
- ii. Duplica-se os vértices, criando o vértice v' a partir do vértice v;
- iii. Une-se as arestas vv' de custo zero. As arestas vu tornam-se uma aresta v'u, mantendo-se o custo de uv anteriormente definido, nesse caso unitário;
- iv. Aplica-se o algoritmo de Surballe e Tarjan, descrito na subseção 3.4, no novo grafo G';
- v. Remova-se os vértices duplicados.

A Figura 11 ilustra o processo da duplicação dos vértices do algoritmo disjuntos por nós no grafo da Figura 10(a).

V2 0 1 1 1 V3 V3 V3 V4 V8 V8 V4 V8 V8 V7 V7 V8 V7 V7

Figura 11 – Grafo G' com os nós duplicados e com as chamadas arestas falsas

Fonte: Produção da própria autora.

Se implementado conforme Suurballe e Tarjan (1984), seu tempo computacional é de $O(m \log_{1+m/n}(n))$, tanto para o caso disjunto por aresta quanto para o generalizado.

4 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Ao classificar este trabalho, percebe-se que, quanto à sua natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, uma vez que os resultados obtidos foram destinados a aplicações práticas para a solução de um problema. Quanto aos seus objetivos, o presente trabalho é classificado como uma pesquisa exploratória, uma vez que busca explicações e comparações para uma análise maior e mais abrangente. Quanto a abordagem, classifica-se por pesquisa quantitativa, pois utilizará de modelos matemáticos e a coleta e análise de dados numéricos. Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, observa-se que esta é uma pesquisa experimental, devido à manipulação direta de variáveis e como estas proporcionam a relação entre as causas e efeitos relacionadas ao desempenho da rede.

Em primeira instância, foi realizado o aprofundamento nos estudos de redes de satélites, em especial a rede *Spaceway* NGSO, com destaque nas ISLs e topologia, apresentados na subseção 2.1. Em paralelo, foi feito um estudo mais detalhado de grafos gêmeos e métricas de interesse relacionadas à robustez e menores caminhos, discutidos na subseção 2.2. Foram implementadas rotinas computacionais em máquina pessoal, utilizando de linguagem de programação *Python* (ROSSUM, 1995), em especial a biblioteca *NetworkX* (HAGBERG; SCHULT; SWART, 2008) para o cálculo das métricas de interesse. *NetworkX* é um pacote para criação, manipulação e estudo de grafos.

O trabalho também contou com o auxílio do *software MATrix LABoratory* (MATLAB) (MATHWORKS, acesso em 03 nov. 2020) e *yEd Graph Editor* (YWORKS, acesso em 03 mar. 2021) para obtenção de desenhos e gráficos. O tempo computacional para os cálculos das soluções desejadas foi da ordem de segundos. Apenas para o cálculo do Algoritmo Genético a partir de 30 grafos é que se gastou um tempo maior, de 30 a 40 minutos.

Como a rede *Spaceway* NGSO possui 20 satélites, foi preciso relacioná-la aos grafos gêmeos com esse mesmo número de nós. Dentre todos os grafos gêmeos de 20 nós, foi selecionado um conjunto específico, os potenciais modelos otimizados procurados. Essa seleção se deu por comparação de métricas (as estudadas em 2.2.1) entre o modelo de grafo da rede original com os grafos gêmeos. Definido o melhor grafo gêmeo, foi feita a correspondência de cada satélite

da rede *Spaceway* NGSO com cada nó do grafo, utilizando o algoritmo genético. Paralelamente a esse processo de seleção de grafos, observou-se que um tipo de grafo gêmeos denominado de caminhos duplos também poderia ser uma opção promissora para a análise e comparação das métricas, devido ao seu aspecto regular, parecido com a rede *Spaceway* NGSO. Portanto, também foram realizados estudos e testes com esse tipo de grafo. As subseções 4.1 e 4.2 detalham os processos comentados.

Após a conclusão da modelagem, já realizadas as comparações entre métricas de desempenho da rede original encontrada na literatura e das topologias selecionadas a partir da etapa de modelagem, estudou-se e comparou-se os caminhos de trabalho e de *backup*, utilizando os algoritmos de *Dijskstra* e de Suurballe e Tarjan, apresentados na seção 5.

Todas as etapas foram registradas e documentadas para relatar de forma fiel todo o processo e resultados alcançados e escritos, permitindo sua reprodução.

4.1 Processo de Seleção de Grafos Gêmeos a Partir de Características e Métricas em Comum com a Rede *Spaceway* NGSO

Primeiramente, para realizar a modelagem, algumas considerações a respeito da rede foram feitas, pois na literatura não se encontra muitas informações precisas sobre a rede *Spaceway* NGSO, uma vez que ainda é uma rede em estudo que não foi implementada. Foi considerado que o grafo é não orientado, ou seja, a comunicação entre dois satélites quaisquer é bidirecional, tanto pode enviar quanto receber informações. Também foram consideradas livres as ligações interplanares e intra-planares, não sendo necessariamente ligação de um satélite com seus satélites vizinhos das órbitas vizinhas e ligação de um satélite com os satélites posterior e anterior a ele na mesma órbita. Porém, será analisado um valor máximo de distância espacial na comunicação para cada par de satélites. As considerações de ISLs se basearam nas mesmas mencionadas por Tan e outros (2010) no WROTNS discutidas em 2.1.3.

4.1.1 Escolha das métricas de seleção dos grafos gêmeos

Como a rede satélite *Spaceway* NGSO possui 20 satélites, buscou-se todos os 1770 grafos gêmeos de 20 nós a fim de selecionar aqueles com características, ou seja, métricas, mais próximas com as da rede original para se trabalhar.

Primeiramente, desse conjunto de 1770 grafos, foi limitado o grau máximo de 4, 5 e 6, onde há 2, 61 e 447 grafos gêmeos de 20 nós respectivamente, restringindo a um conjunto de 510 grafos gêmeos. Essa escolha se baseou em observações de constelações já existentes, encontrando-se, em um determinado momento, grau, em todos os nós, igual 4 para as redes *Spaceway* NGSO (a rede analisada), Iridium (BERIOLI, 2004), LEONET (WERNER et. al, 1995) e Celestri (DONNER, 2004) e grau, em todos os nós, igual a 5 para a rede Teledesic (WOOD, 2003). Também se baseou no número de terminais de um satélite, como visto em 2.1.3.

A seleção dentre os 510 grafos gêmeos foi feita pela comparação de métricas dos grafos desse conjunto com as métricas da rede *Spaceway* NGSO. Para cada grafo da lista de grafos contendo a rede *Spaceway* NGSO e os 510 grafos gêmeos, foi aplicado o método *Nearest Neighbors* para k = 30 vizinhos mais próximos e selecionados os k vizinhos mais próximos em relação ao grafo da *Spaceway* NGSO, excluindo os demais pontos considerados *outliers* do conjunto.

As métricas utilizadas para a obtenção desses vizinhos foram diâmetro, distância média, Índice de Estrada, resistência mínima e CFCC máximo. Lembrando que em todo o processo de seleção até a obtenção dos 30 grafos finais, as métricas foram ajustadas para assumirem valores entre 0 e 1 para melhor comparação dos valores dos grafos gêmeos com os valores da rede original.

Para a escolha final dessas métricas, primeiro foram selecionadas 22 métricas iniciais. Essas métricas foram escolhidas por estarem ligadas a eficiência da rede, no quesito de menores caminhos e robustez. São elas: diâmetro, distância média, Índice de Estrada, conectividade algébrica, máximo, mínimo e média da *betweenness centrality* de nós, máximo, mínimo e média da *betweenness centrality* de arestas, resistência máxima, mínima e média, *closeness centrality* máximo, mínimo e médio, CFCC máximo, mínimo e médio, CBC máximo, mínimo e médio.

Essas 22 métricas passaram por um processo de seleção de variáveis que consistiu na exclusão de métricas cujo valor obtido para a rede *Spaceway* NGSO era considerado um *outlier* no conjunto. Logo, a segunda seleção se deu retirando as métricas cujo valor da rede original se destoava dos valores dessa métrica de todos os grafos gêmeos, pois é visível que esse comportamento não é válido para a aplicação do método *Nearest Neighbors*, uma vez que não haveria um grupo de vizinhos mais próximos ao grafo da rede *Spaceway* NGSO. Com isso, foram eliminadas as métricas: conectividade algébrica, máximo e mínimo da *betweenness centrality* de arestas, resistência máxima e média, *closeness centrality* mínimo, CFCC mínimo e médio, CBC máximo, mínimo e médio, restando apenas nove métricas das 22 iniciais.

A Tabela 1 apresenta os valores de cada métrica para a rede *Spaceway* NGSO e os valores de mínimo, 1º quartil (Q1), 2º quartil ou mediana (Q2), 3º quartil (Q3) e máximo do conjunto dos 510 grafos gêmeos. Q1, Q2 e Q3 representam 25%, 50% e 75%, respectivamente, dos valores das métricas ao se dividir a amostra com seus valores ordenados em quatro partes iguais.

Tabela 1 – Representação das métricas da rede *Spaceway* NGSO e os valores de mínimo, máximo e os quartis dos grafos gêmeos de graus 4, 5 e 6

Métricas	Spaceway NGSO	Mín.	Q1	Q2	Q3	Máx.
Diâmetro	4	4	6	7	8	10
Distância média	2,32	2,57	2,87	2,99	3,12	3,62
Índice de Estrada	109,49	105,81	116,37	119,70	122,90	135,51
Conectividade algébrica	1,38	0,19	0,26	0,29	0,33	0,54
Máx. de CB de nós	0,07	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32
Mín. de CB de nós	0,07	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
Média de CB de nós	0,07	0,09	0,10	0,11	0,12	0,15
Máx. de CB de arestas	0,06	0,11	0,13	0,13	0,13	0,13
Mín. de CB de arestas	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Média de CB de arestas	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10
Resistência máx.	0,70	1,50	2,00	2,25	2,50	3,00
Resistência mín.	0,47	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50
Resistência média	0,61	1,00	1,04	1,07	1,10	1,19
CC máx.	0,43	0,37	0,43	0,48	0,50	0,59
CC mín.	0,43	0,19	0,22	0,24	0,26	0,34
CC médio	0,43	0,29	0,34	0,35	0,37	0,41
CFCC máx.	0,09	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08
CFCC mín.	0,09	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
CFCC médio	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06
CBC máx.	0,14	0,30	0,36	0,40	0,43	0,48
CBC mín.	0,14	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04
CBC médio	0,14	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19

Fonte: Produção da própria autora.

A Tabela 2 é semelhante a Tabela 1, porém com os valores em uma escala entre 0 e 1, ao qual foram trabalhados em todo o código, sendo de mais fácil comparação.

 $Tabela\ 2-Representação\ das\ métricas\ em\ uma\ escala\ de\ 0\ a\ 1\ da\ rede\ \textit{Spaceway}\ NGSO\ e\ os\ valores\ de\ mínimo, máximo\ e\ os\ quartis\ dos\ grafos\ gêmeos\ de\ graus\ 4,\ 5\ e\ 6$

Métricas	Spaceway 1	NGSO Mín.	Q1	Q2	Q3	Máx.
Diâmetro	0,00	0,00	0,33	0,50	0,67	1,00
Distância média	0,00	0,19	0,42	0,52	0,62	1,00
Índice de Estrada	0,12	0,00	0,36	0,47	0,58	1,00
Conectividade algébrica	1,00	0,00	0,05	0,08	0,12	0,29
Máx. de CB de nós	0,00	0,66	0,77	0,85	0,92	1,00
Mín. de CB de nós	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Média de CB de nós	0,00	0,19	0,42	0,52	0,62	1,00
Máx. de CB de arestas	0,00	0,69	0,92	0,98	0,99	1,00
Mín. de CB de arestas	1,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,50
Média de CB de arestas	0,00	0,32	0,51	0,60	0,68	1,00
Resistência máx.	0,00	0,35	0,57	0,67	0,78	1,00
Resistência mín.	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Resistência média	0,00	0,68	0,75	0,80	0,85	1,00
CC máx.	0,29	0,00	0,30	0,48	0,59	1,00
CC mín.	1,00	0,00	0,14	0,21	0,28	0,62
CC médio	1,00	0,00	0,32	0,43	0,53	0,82
CFCC máx.	1,00	0,00	0,28	0,41	0,53	0,72
CFCC mín.	1,00	0,00	0,07	0,10	0,13	0,26
CFCC médio	1,00	0,00	0,10	0,13	0,17	0,23
CBC máx.	0,00	0,48	0,65	0,76	0,84	1,00
CBC mín.	1,00	0,00	0,01	0,02	0,05	0,21
CBC médio	0,00	0,40	0,53	0,60	0,68	1,00

Fonte: Produção da própria autora.

Após essa primeira eliminação, a terceira seleção se deu pela correlação de métricas. Sabe-se que os valores de algumas métricas se aproximam muito de valores de outras, podendo até mesmo serem iguais, de modo que a escolha das métricas fortemente correlacionadas acaba se tornando repetitiva e não agregando nos cálculos. Para isso, foi gerada uma grade com as métricas obtidas a partir da segunda seleção, da qual foram retiradas aquelas destoantes e, a partir de então foram comparadas as nove métricas, duas a duas. Valores de correlação mais próximos de 1 indicam métricas fortemente correlacionadas positivamente e, valores mais próximos de -1 indicam métricas fortemente correlacionadas negativamente. Correlação igual a 1 significa que as métricas são exatamente iguais. Essa correlação pode ser vista na Figura 12.

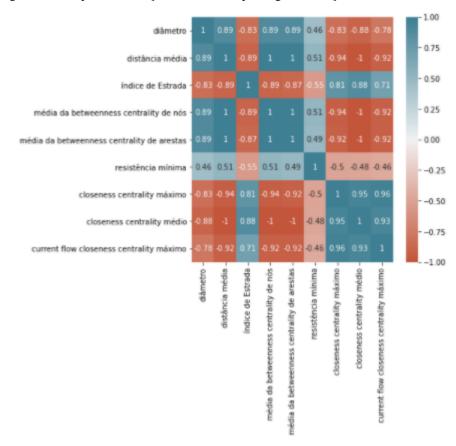


Figura 12 – Mapa de correlação de métricas após segunda seleção

Fonte: Produção da própria autora.

Note que a distância média, média da betweenness centrality de nós e betweenness centrality de arestas possuem correlação 1 umas com as outras, logo apresentam valores próximos. Dessa forma, pode-se escolher apenas uma dessas três. Nesse caso, foi escolhida a distância média. A distância média possui correlação igual a -1 com closeness centrality médio, possibilitando a exclusão dessa última também. Closeness centrality máximo e CFCC máximo possuem correlação 0,96, sendo fortemente correlacionadas. Comparando as correlações dessas duas métricas com as demais, percebe-se que CFCC máximo apresenta valores de correlação menores, em módulo. Dessa forma, closeness centrality máximo é excluída. Assim, chegou-se às cinco métricas finais: diâmetro, distância média, índice de Estrada, resistência mínima e current flow closeness centrality máximo, cujo mapa de correlação é visto na Figura 13.

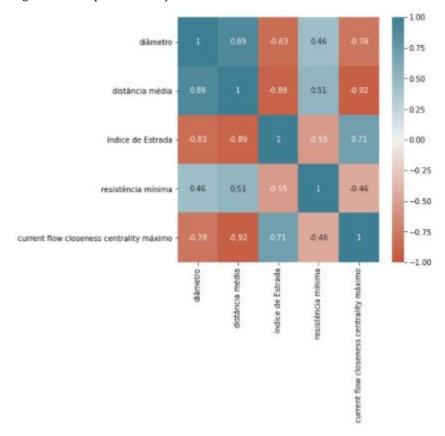


Figura 13 – Mapa de correlação de métricas finalistas

Fonte: Produção da própria autora.

4.1.2 Mapeamento entre nós dos grafos gêmeos e rede Spaceway NGSO

Após a seleção dos 30 grafos gêmeos de 20 nós, é preciso corresponder cada satélite, dentre os 20, de cada grafo gêmeo, a cada satélite da rede *Spaceway* NGSO, ou seja, é preciso mapear os nós de cada grafo gêmeo aos nós da rede *Spaceway* NGSO. Com isso, se saberá as coordenadas de cada ponto dos grafos gêmeos e como serão as novas ligações dos satélites, facilitando também, dessa forma, a ilustração planar do novo grafo, com seus respectivos satélites em suas respectivas coordenadas (latitude e longitude), similar ao visto na Figura 6.

Com isso, foi utilizado o algoritmo genético com características evolutivas para a obtenção de resultados. O código, em *Python*, foi adaptado a partir do desenvolvido por Neris, Paiva e Pavan (2019).

Tendo como base as fases do AG na subseção 3.2, para o caso em questão têm-se:

- Codificação: cada indivíduo da população é representado por um vetor com o tamanho igual a quantidade de nós, ou seja, 20. O valor contido no vetor representa os satélites, e o valor do índice representa a posição fixa, ou seja, o indivíduo [1, 0, 4, 2], por exemplo, corresponde dizer que o satélite 1 está mapeado na posição fixa 0, o satélite 0 na posição 1 o satélite 4 na posição 2 e o satélite 2 na posição 3;
- Avaliação Fitness: a aptidão dos indivíduos se dá pela menor distância espacial máxima
 de ISL, cujo cálculo é apresentado na seção 2.1.5. Mais especificamente, esse valor é
 chamado de custo. Dessa forma, quanto menor o custo, melhor o candidato será. Como
 critério de desempate dos custos, caso houver, é utilizada a soma das distâncias espaciais
 de cada ISL;
- Seleção: para a seleção é utilizado o método de roleta, onde os mais aptos têm maior probabilidade de serem selecionados, porém todos possuem chance de serem selecionados.
- Cruzamento: o cruzamento é feito com corte único, ou seja, cada 2 indivíduos irão gerar novos 2 indivíduos.
- Decodificação: o critério de parada utilizado é o número de ciclos que o melhor indivíduo da população não melhora a sua aptidão.

Assim, obteve-se como solução o indivíduo [12, 15, 5, 1, 6, 13, 19, 18, 7, 10, 17, 0, 8, 11, 2, 4, 9, 16, 14, 3], de máxima distância espacial de ISL igual a 1,80 radianos e soma das distâncias espaciais de cada ISL de 44,17 radianos.

4.2 Uma Análise a Partir do Grafo Caminhos-Duplos

Devido às características das ligações interplanares e intra-planares da rede *Spaceway* NGSO e demais redes vistas, conforme apresentado por Keller e Salzwedel (1996), Wood (2001, 2003) e Handley (2018) em 2.1.3, foi pensado no grafo de caminhos-duplos como possível candidato a modelagem. Isso pois, tal grafo é propício, nas ligações interplanares, fazer com que cada satélite se conecte com os satélites vizinhos das órbitas vizinhas e, nas ligações intra-planares, fazer com que cada satélite se comunique com um satélite anterior e um posterior a ele, na

mesma órbita. Consequentemente, na modelagem com esse tipo de grafo gêmeo, a rede se apresenta de forma mais regular e padronizada, assim como nas redes vistas.

Para esse tipo de modelagem, também foi considerado grafo não orientado, porém foi priorizado manter as ligações interplanares com satélites adjacentes das órbitas adjacentes e intra-planares com satélites seguidos, da mesma órbita.

Assim, chegou-se ao grafo gêmeo caminhos duplos de 20 nós mostrado na Figura 14, com 36 arestas, grau máximo igual a 4, diâmetro 9 e distância média de 3,58¹.

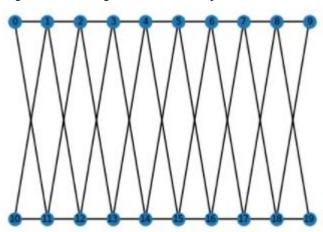


Figura 14 – Grafo gêmeo caminhos duplos de 20 nós

Fonte: Produção da própria autora.

4.2.1 Variações do grafo caminhos duplos

Apesar dos graus do grafo de caminhos duplos obtido ser aceitável, uma vez que possui graus 2 ou 4 e a rede *Spaceway* NGSO graus iguais a 4, o diâmetro de 9 é comparativamente alto com diâmetro de 4 da rede original, além da distância média também ser maior. Esse fator pode ser custoso à nova rede e, portanto, variações do grafo gêmeo foram propostas a partir da adição de 2 ou 4 arestas, de forma estratégica, a fim de melhorar essas métricas e ainda assim garantir

¹ Métricas escolhidas por serem consideradas variantes topológicas de grafos relevantes ao se analisar uma rede, segundo Depizzol (2018).

a qualidade da rede. A adição dessas arestas não causaria prejuízo, pois o grafo da rede *Spaceway* NGSO possui 40 arestas e o grafo gêmeo possui 36.

O Quadro 3 compara métricas da rede original com o grafo gêmeo de caminhos duplos e suas variações com a adição de duas, três ou quatro arestas.

Quadro 3 – Comparação de métricas da rede Spaceway NGSO, grafo caminhos duplos e suas variações

Grafo	Número	Diâmetro	Grau	Distância
	de arestas		máximo	média
Spaceway NGSO	40	4	4	2,32
Caminhos duplos	36	9	4	3,58
Caminhos duplos com adição das arestas 0-4, 5-9,	40	5	5	2,57
10-14, 15-19				
Caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 10-19	38	5	4	2,76
ou 9-10, 0-19				
Caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 9-10	38	6	4	2,82
Caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 9-19	38	6	4	2,86
ou 9-10, 9-19				
Caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 0-19,	40	5	4	2,74
9-10, 10-19				
Caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 0-10,	40	5	4	2,74
9-19, 10-19 ou 0-10, 0-19, 9-19, 9-10				
Caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 9-10,	39	5	5	2,78
9-19				
Caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 9-10,	39	5	4	2,75
0-19 ou 0-9, 9-10, 10-19				
Caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 9-10,	39	6	4	2,82
0-10				

Fonte: Produção da própria autora.

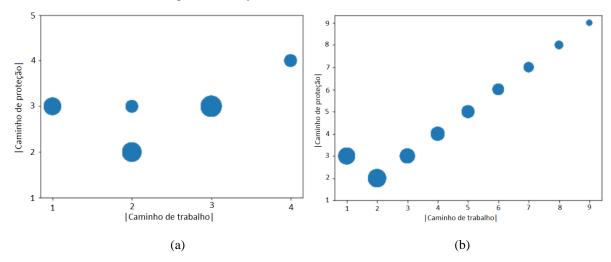
A partir do Quadro 3, eliminou-se as variações de caminhos duplos com adição de três arestas, uma vez que, além de tornar a rede mais irregular comparada com a adição de duas ou quatro arestas, apresenta métricas iguais ou piores que essas.

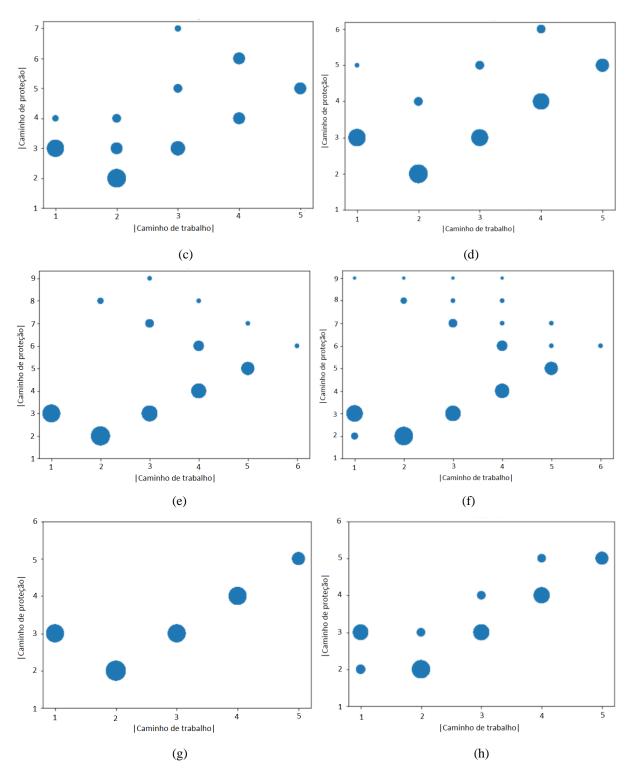
A adição das arestas 0-4, 5-9, 10-14, 15-19 foi pensada com a intenção de fechar as ligações intra-planares, obtendo-se as quatro órbitas com 5 satélites em cada, de modo a obedecer ao critério de ligações intra-planares da rede *Spaceway* NGSO. As demais variações ficam faltando apenas uma ligação para cada órbita para obedecer a tal critério.

Note que a adição de arestas proporcionou resultados positivos, diminuindo o diâmetro, grau máximo e distância média, quando comparado ao grafo de caminhos duplos, chegando a valores próximos da rede original e aceitáveis.

Veja que os grafos são *k*-aresta-conexos, sendo válida a aplicação do algoritmo ST para encontrar dois caminhos disjuntos para cada par de nós do grafo. Através do algoritmo de ST disjuntos por nós, foi possível comparar o comprimento dos caminhos de trabalho e de *backup* para a rede *Spaceway* NGSO, grafo gêmeo caminhos duplos e para suas variações, a partir do gráfico visto na Figura 15. O símbolo "| |" representa comprimento, portanto, |Caminho de trabalho| e |Caminho de proteção| são o comprimento dos caminhos de trabalho e de proteção, respectivamente. O tamanho do círculo é proporcional a quantidade do respectivo comprimento de caminho do grafo.

Figura 15 – Caminho de trabalho e de proteção para o grafo: (a) da rede Spaceway NGSO, (b) caminhos duplos, (c) caminhos duplos com adição das arestas 0-4, 5-9, 10-14, 15-19, (d) caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 10-19 ou 9-10, 0-19, (e) caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 9-10, (f) caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 9-19 ou 9-10, 9-19 (g) caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 0-19, 9-10, 10-19 e (h) caminhos duplos com adição das arestas 0-9, 0-10, 9-19, 10-19 ou 0-10, 0-19, 9-19, 9-10





Fonte: Produção da própria autora.

Pelos gráficos, note que a adição de quatro arestas produz caminhos de *backup* de comprimentos menores do que aqueles produzidos pela adição de apenas duas arestas. Dentre os grafos obtidos com a adição de quatro arestas, destaca-se o grafo cujo gráfico é representado

em Figura 15(g), sendo esse o escolhido, correspondendo à adição das arestas 0-9, 0-19, 9-10, 10-19, pois é um grafo 2-GC e, portanto, os caminhos de trabalho e *backup* possuem mesmo comprimento, exceto para pares de nós adjacentes.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

A Figura 16 apresenta a projeção equidistante azimutal da rede original, do grafo gêmeo e do grafo regular selecionados, onde grafo gêmeo é o grafo obtido do processo de seleção a partir do conjunto de 1770 grafos gêmeos, descrito em 4.1 e, grafo regular é o grafo 2-GC obtido a partir da adição de arestas no grafo gêmeo de caminhos duplos, conforme descrito em 4.2.

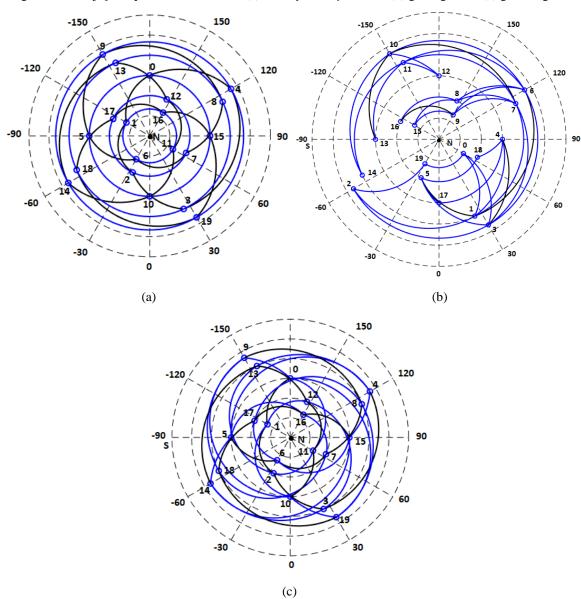


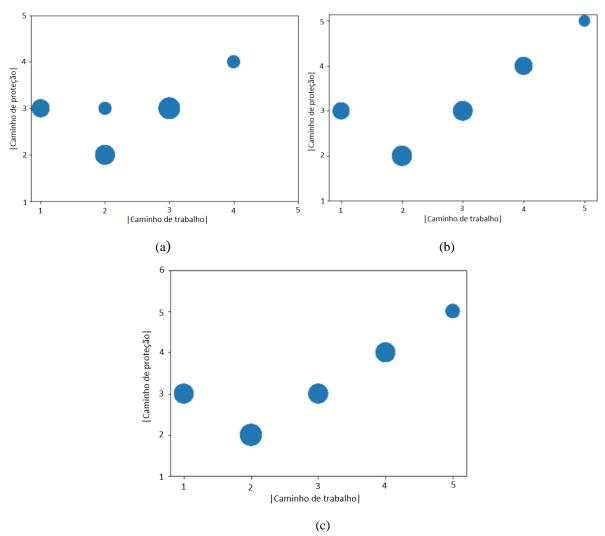
Figura 16 – Projeção equidistante azimutal: (a) rede Spaceway NGSO, (b) grafo gêmeo, (c) grafo regular

Fonte: Produção da própria autora.

Observe como o grafo regular segue um padrão mais parecido com o da rede original, devido ao critério de ligações intra-planares adotado para sua obtenção.

A Figura 17 mostra os gráficos, evidenciando os caminhos de trabalho e de *backup* para a rede original e os grafos selecionados.

Figura 17 – Caminho de trabalho e de proteção: (a) da rede Spaceway NGSO, (b) do grafo gêmeo e (c) do grafo regular



Fonte: Produção da própria autora.

Veja que, na rede *Spaceway*, caminhos de trabalho de comprimento 1 e 2 possuem caminho de *backup* de comprimento 3. Nos grafos selecionados, por serem 2-GC, os caminhos de comprimento 2, 3, 4 e 5 possuem mesmo comprimento de caminho de *backup* e, caminhos de trabalho de comprimento 1 possuem caminhos de *backup* de comprimento 3.

O Quadro 4 apresenta alguns valores relacionados às ISLs, analisadas ao longo do trabalho, além de algumas métricas, comparando a rede original *Spaceway* NGSO com os grafos selecionados.

Quadro 4 – Comparação de métricas de desempenho da rede *Spaceway* NGSO e grafos selecionados

Métricas de desempenho	Spaceway NGSO	Grafo gêmeo	Grafo regular
Máxima distância espacial de ISL (rad)	1,57	1,80	2,39
Média das distâncias espaciais de ISL (rad)	1,24	1,23	1,47
Número de ISLs comum com a rede original	-	17	16
Número de ISLs	40	36	40
Grau máximo	4	6	4
Diâmetro	4	5	5
Distância média	2,32	2,72	2,74

Fonte: Produção da própria autora.

As distâncias espaciais das ISLs estão indicadas em radianos (rad). Para saber a distância em quilômetros, basta multiplicar pela soma do raio da Terra e a altitude da órbita da rede, conforme mencionado em 2.1.5. Considerando o raio da Terra R=6.378~km e a altitude da órbita da rede *Spaceway* NGSO de H=10.352~km, indicado em 2.1.4 e 2.1.6, respectivamente, têm-se que a máxima distância espacial da rede original, do grafo gêmeo e do grafo regular são 26.279,42 km, 30.144,95 km e 40.021,20 km, respectivamente. Analogamente para a média das distâncias têm-se 20.707,64 km, 20.525,37 km e 24.627,51 km para a rede original, grafo gêmeo e grafo regular.

Pela análise a partir do Quadro 4, a rede original é mais vantajosa quando comparada aos grafos selecionados em termos de máxima distância espacial de ISLs, diâmetro e distância média. O grafo gêmeo, ao mesmo tempo em que apresenta média das distâncias espacial de ISL melhor que a original e menor número de arestas, possui maior grau máximo. O grafo regular apenas é melhor quando comparada ao grafo gêmeo em termos de grau máximo, porém não apresenta vantagens em termos das métricas analisadas quando comparado à rede original.

Por outro lado, os grafos analisados são 2-GC e, pelos gráficos de caminhos de trabalho e de *backup* mostrados na Figura 17, comparados com o gráfico da rede original, os grafos gêmeo e

regular apresentam melhores soluções para os caminhos de comprimento 2 e 3, porém, aumentam em menores quantidades para caminhos de comprimento 4, além de surgir os caminhos de comprimento 5.

6 CONCLUSÃO E PROJETOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma proposta de representar uma rede não geoestacionária de pequeno porte – a *Spaceway* NGSO, por grafos gêmeo correspondente, ou ainda, por grafos 2-GC, a fim de proporcionar caminhos de *backup* de mesmo comprimento que caminhos de trabalho, sendo esses caminhos os menores possíveis. Dessa forma, o objetivo foi obter uma rede resiliente a falhas e de menor latência.

Foi utilizada como metodologia para a obtenção dos grafos gêmeos para a modelagem a análise de métricas relacionadas a eficiência da rede, no quesito de menores caminhos e robustez. O intuito foi selecionar os grafos gêmeos cujos valores de suas métricas eram os mais próximos possíveis dos valores das métricas da rede de satélites estudada. Com isso, do conjunto inicial de 1770 grafos gêmeos de 20 nós, com a delimitação de grau máximo 4, 5 e 6 e a aplicação do algoritmo *nearest neighbors* chegou-se a 30 grafos. Desse conjunto, chegou-se ao grafo final a partir do algoritmo genético para definir as coordenadas de cada nó, cuja aptidão utilizada foi distância espacial máxima de ISL, além da distância média de ISL. Paralelamente, foi estudada variações do grafo gêmeo de caminhos duplos a partir da adição de arestas e comparando algumas de suas métricas com as métricas da rede *Spaceway* NGSO, além da comparação dos caminhos de trabalho e de *backup*. Com isso obteve-se um grafo 2-GC.

O resultado final obtido com a seleção dos dois grafos foi positivo com relação a algumas métricas e negativo com relação a outras. Os grafos selecionados apresentam melhores soluções para os caminhos de comprimento 2 e 3, porém, aumentam em menores quantidades para caminhos de comprimento 4 e 5. Portanto, a escolha de qual modelo utilizar dependerá da aplicação.

Das métricas analisadas para comparação (máxima distância espacial de ISL, distância espacial de ISL média, diâmetro, distância média e grau máximo), o grafo gêmeo apenas apresenta melhores valores quando comparado à rede *Spaceway* NGSO no quesito distância média espacial de ISL, porém possui maior grau máximo, diâmetro, distância média e máxima distância de ISL. Desse modo, imagina-se um cenário em que, pelas características construtivas, o *laser* é potente o suficiente para garantir a maior distância de comunicação, além do fato do

número máximo de terminais por satélite não gerar muitos custos adicionais, porém, ainda assim, deseja-se que a maior parte das ISLs não sejam tão distantes. Nesse caso é recomendada a modelagem pelo grafo gêmeo. Ou seja, nesse modelo procura-se uma menor média das distâncias espaciais de ISL, uma vez que seria custoso manter mais de um *laser* com maior potência.

Já o grafo obtido pela variação de caminhos duplos apresentou piores valores quando comparado à rede *Spaceway* NGSO e apenas se destacou do grafo gêmeo selecionado por apresentar menor grau máximo. Assim, é dado um cenário onde a tecnologia das ligações a *laser* não é um problema. Todavia, é mais custoso manter mais terminais nos satélites e ainda assim, priorizar pelas ligações de comprimento 1, 2 e 3, uma vez que essas podem estar mais sujeitas a falhas ou ainda, participarem de rotas que utilizam informações de mais alta prioridade. Nesse contexto, o grafo regular passa a ser uma melhor opção quando comparado ao grafo gêmeo e rede *Spaceway* NGSO.

Recomenda-se o estudo de redes de satélites com a visão de redes ópticas. Propõe-se um algoritmo de roteamento para alocação de comprimentos de onda em um cenário dinâmico, característico das redes de satélites, utilizando de modelos de grafos variantes no tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, N. M. M.; DEL-VECCHIO, R. R.; VINAGRE, C. T. M.; STEVANOVIÉ, D. Introdução a teoria espectral de grafos com aplicações. 1. ed. [S. 1.]: SBMAC, 2007.

ALLEN, J. A. V.; Radiation belts around the earth. Scientific American, San Francisco, v. 200, n. 3, p. 39-47, 1958. Disponível em: http://www.thesleuthjournal.com/wp-content/uploads/2015/05/Van-Allen-Radiation-Belts-Disclosure.pdf. Acesso em: 20 maio 2021.

BENJAMIN, A; CHARTRAND G.; ZHANG, P. **The Fascinating World of Graph Theory**. 1. ed. New Jersey: Princeton University, 2015.

BRANDES, U.; FLEISHER, D. Centrality Measures Based on Current Flow. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THEORETICAL ASPECTS OF COMPUTER SCIENCE, 22., 2005, Heidelberg. **Proceedings** [...]. Heidelberg: Springer, 2005. p. 533-544. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-31856-9_44.

COVER, T. M.; HART, P. E. Nearest neighbor pattern classification. **IEEE Transactions on Information Theory**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 21-27, jan. 1967. DOI 10.1109/TIT.1967.1053964. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/1053964._Acesso em: 26 fev. 2021.

DEPIZZOL, D. B. Uma Abordagem Estatística para o Projeto de Topologias Físicas de Redes Ópticas. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_8268_%5BVersao_Final%5D_Tese_Daniela-Bertolini-Depizzol 201820190920-104855.pdf. Acesso em: 23 mar. 2021.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische mathematik**, Springer, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 269-271, 1 dez. 1959. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01386390. Disponível em: http://www-m3.ma.tum.de/foswiki/pub/MN0506/WebHome/dijkstra.pdf. Acesso em: 17 mar. 2021.

DONNER, A.; BERIOLI, M.; WERNER, M. MPLS-based satellite constellation networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, [s. 1], v. 22, n. 3, p. 438-448, 5 abr. 2004. DOI 10.1109/JSAC.2004.823406. Disponível em: https://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/trabajos/MPLS-Based%20Satellite%20Constellation%20Networks-Donner2004.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

ESTRADA, E.; HIGHAM D. J.; HATANO, N. Communicability betweenness in complex networks. **Physica A**: Statistical Mechanics and its Applications, [s. l.], v. 388, n. 5, p. 764-774, 1 mar. 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.11.011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378437108009473. Acesso em: 24 fev. 2021.

- FEDERAL COMMUNICATIONS COMISSION. IB Docket n°. 02-19, January 31, 2002. Notice of proposed rulemaking. **FCC 02-30**: Washington, D.C., February 6, 2002. Disponível em: https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-02-30A1.pdf. Acesso em: 16 fev. 2021.
- FIEDLER, M. Algebraic connectivity of graphs. **Czechoslovak Mathematical Journal**, Praha, v. 23, n. 2, p. 298-305, 1 jan. 1973. DOI 10.21136/CMJ.1973.101168. Disponível em: https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/101168/CzechMathJ_23-1973-2_11.pdf. Acesso em: 22 fev. 2021.
- FREEMAN, L. C. A. A set of measures of centrality based on betweenness. **Sociometry**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 35-41, 1977. Disponível em: http://moreno.ss.uci.edu/23.pdf. Acesso em: 28 out. 2020.
- GOOGLE. **Google Colaboratory**. [S. 1.]: 2020. Disponível em: https://colab.research.google.com/notebooks/intro.ipynb. Acesso em: 03 nov. 2020.
- HAGBERG, A. A.; SCHULT, D. A.; SWART, P. J. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. *In*: PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE, 7., 2008, Pasadena. **Proceedings** [...]. [S. l.]: SciPy, 2008. p. 11–15. Disponível em: http://aric.hagberg.org/papers/hagberg-2008-exploring.pdf. Acesso em: 21 out. 2020.
- HANDLEY, M. Delay is Not an Option: Low Latency Routing in Space. *In*: ACM WORKSHOP ON HOT TOPICS IN NETWORKS, 17., 2018, Redmond. **Proceedings** [...]. New York: ACM, 2018. p. 85-91. DOI: https://doi.org/10.1145/3286062.3286075. Disponível em: https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10062262/7/Handley_hotnets.pdf. Acesso em: 02 out. 2020.
- HARARY, F. Graph Theory. 1. ed. [S. l.]: Addison-Wesley, 1969.
- HART, N.; GOERK, T.; JAHN, A. A Discussion on Mobile Satellite and the Myths of CDMA and Diversity Revealed. *In*: INTERNATIONAL MOBILE SATELLITE CONFERENCE, 4., 1995, Ottawa. **Proceedings** [...]. [S. 1.]: NTRS, 1995. p. 469-475. Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960022452/downloads/19960022452.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.
- HU, J.-H.; YEUNG, K. L.; LI, T. Routing and re-routing in a LEO/MEO two-tier mobile satellite communications system with inter-satellite links. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, 2000, New Orleans. **Proceedings** [...]. New Jersey: IEEE, 2000. p. 134-138. DOI 10.1109/ICC.2000.853079. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/37884986.pdf. Acesso em: 09 out. 2020.
- HUTCHESON, J.; LAURIN, M. Network Flexibility of the IRIDIUM Global Mobile Satellite System. *In*: INTERNATIONAL MOBILE SATELLITE CONFERENCE, 4., 1995, Ottawa. **Proceedings** [...]. [S. 1.]: NTRS, 1995. p. 503-507. Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960022452/downloads/19960022452.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

JAMAKOVIC, A; UHLIG, S. Influence of the network structure on robustness. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKS, 15., 2007, Adelaide. **Proceedings** [...]. New Jersey: IEEE, 2007. p. 278-283. DOI 10.1109/ICON.2007.4444099. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4444099. Acesso em: 25 fev. 2021.

JETBRAINS. **Pycharm**. Versão 2020.2.2. [S. 1.]: 2020. Software. Disponível em: https://www.jetbrains.com/pt-br/pycharm/. Acesso em: 03 nov. 2020.

KARAFOLAS, N.; BARONI, S. Optical satellite networks. **Journal of Lightwave Technology**, [s. 1.], v. 18, n. 12, p. 1792-1806, dez. 2000. DOI 10.1109/50.908734. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/908734. Acesso em: 15 fev. 2021.

KELLER, H.; SALZWEDEL, H. Link Strategy for the Mobile Satellite System Iridium. *In*: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 1996, Atlanta. **Proceedings** [...]. New Jersey: IEEE, 1996. p. 1220-1224. DOI 10.1109/VETEC.1996.501506. Disponível em: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.44.9979&rep=rep1&type=pdf. Acesso em: 16 out. 2020.

LA PEÑA, J. A.; GUTMAN, I.; RADA, J. Estimating the Estrada index. **Linear Algebra and its Applications**, [s. l.], v. 427, n. 1, p. 70-76, 1 nov. 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.laa.2007.06.020. Disponível em: https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0024379507002844?token=03EACA30E75E032D2 92B7A48C4480A6EF61551D1ED7E5EAD81D25AA45F83923F3745D833366344DE2AC7 D2B29E2FB62A&originRegion=us-east-1&originCreation=20210415135413. Acesso em: 22 fev. 2021.

MARTINS, H. NASA detecta mudança no campo magnético da Terra que pode afetar voos, GPS e rede elétrica. **Estado de Minas Internacional**, Minas Gerais, 20 ago. 2020. Disponível em:

https://www.em.com.br/app/noticia/internacional/2020/08/20/interna_internacional,1178048/nasa-ve-mudanca-campo-magnetico-terra-que-pode-afetar-voos-gps-e-rede.shtml. Acesso em: 19 maio 2021.

MATHWORKS. **MATLAB – MATrix LABoratory**. Versão R2018b. Disponível em: https://www.mathworks.com/products/matlab.html. Acesso em: 03 nov. 2020.

MITCHELL, M. An introduction to genetic algorithms. Massachusetts: MIT Press, 1998. 209 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=0eznlz0TF-IC&oi=fnd&pg=PP9&dq=An+introduction+to+genetic+algorithms.&ots=sijI63YbRe&sig=JgVyyHm1t4a0sEiHc70VKI5v0xo#v=onepage&q=An%20introduction%20to%20genetic%20 algorithms.&f=false. Acesso em: 3 mar. 2021.

MIYA, K. General Descriptions, *In*: MIYA, K. (ed.); KOMURO, K.; MURATANI, T.; YOKOI, H.; SATOH, T.; SHIMIZU, K.; OGAWA, A.; YAMAMOTO, H.; SATOH, H. **Satellite Communications Technology**. 2. ed. Tokyo: KDD Engineering and Consulting, 1985. cap. 1, p. 1-42.

- MONTERO, J. A.; SERRANO, S.; MARTÍNEZ, R.; CALVO, M. Tool for Satellite Mobile Communications Systems Simulation. *In*: INCE, A. J. **Modeling and Simulation Environment for Satellite and Terrestrial Communications Networks**. Boston: Springer, 2002. cap. 12, p. 213-223.
- MORI, L. O campo magnético da Terra está se comportando de maneira imprevista e intrigando cientistas. **BBC News**, São Paulo, 11 jan. 2019. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/geral-46825941. Acesso em: 19 maio 2021.
- NERIS, Y. G.; PAIVA, M. H. M.; PAVAN, C. Solving Quadratic Assignment Problem for Survivable Optical Networks with Genetic Algorithm. *In*: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE, 12., 2019, Aveiro. **Proceedings** [...]. New Jersey: IEEE, 2019. p. 1-3. DOI 10.1109/IMOC43827.2019.9317641. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9317641. Acesso em: 05 mar. 2021.
- OLIVEIRA, J. M. S. d. S. **Protecção Máxima de Redes de Telecomunicações**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações) Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010. Disponível em: https://ria.ua.pt/bitstream/10773/7557/1/241465.pdf. Acesso em: 17 mar. 2021.
- RADHAKRISHNAN, R.; EDMONSON, W. W.; AFGHAH, F.; RODRIGUES-OSORIO, R. M.; PINTO, F.; BURLEIGH, S. C. Survey of Inter-Satellite Communication for Small Satellite Systems: Physical Layer to Network Layer View. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, Fourthquarter, v. 18, n. 4, p. 2442-2473, 09 maio 2016. DOI 10.1109/COMST.2016.2564990. Disponível em: https://arxiv.org/pdf/1609.08583.pdf. Acesso em: 02 out. 2020.
- ROSSUM, G. van. Python tutorial. Amsterdam: Stichting Mathematisch Centrum, 1995.
- SCHINDALL, J. Concept and implementation of the Globalstar mobile satellite system. *In*: INTERNATIONAL MOBILE SATELLITE CONFERENCE, 4., 1995, Ottawa. **Proceedings** [...]. [S. l.]: NTRS, 1995. p. A-11 A-16. Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960022452/downloads/19960022452.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.
- SOARES NETO, V. **Comunicações via satélite**. Rio de Janeiro: SENAI/DN, Divisão de Pesquisas, Estudos e Avaliação, 1988. 76 p. (Série Monografias, v. 6).
- SPITZER, C. J. Odyssey Personal Communications Satellite System. *In*: INTERNATIONAL MOBILE SATELLITE CONFERENCE AND EXHIBITION, 3.,1993, [s. 1.]. **Proceedings** [...]. [S. 1.]: NTRS, 1993. p. 297-302. Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19940018314/downloads/19940018314.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.
- SUURBALLE, J. W.; TARJAN, R. E. A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths. **Networks**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 325-336, 1984. DOI: https://doi.org/10.1002/net.3230140209. Disponível

em:https://www.cadmo.ethz.ch/education/lectures/FS18/SAADS/papers/Networks84_Quick_Method_Disjoint_Paths.pdf. Acesso em: 17 mar. 2021.

TAN, L.; YANG, Q.; MA, J.; JIANG, S. Wavelength Dimensioning of Optical Transport Networks Over Nongeosychronous Satellite Constellations. **Journal of Optical Communications and Networking**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 166-174, mar. 2010. DOI: https://doi.org/10.1364/JOCN.2.000166. Disponível em: https://www.osapublishing.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-2-4-166. Acesso em: 15 fev. 2021.

VASSOLER, G. L.; PAIVA, M. H. M.; RIBEIRO, M. R. N.; SEGATTO, M. E. V. Twin Datacenter Interconnection Topology. **IEEE Micro**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 8-17, set./out. 2014. DOI 10.1109/MM.2014.63. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6866036. Acesso em: 20 out. 2020.

VOS, V. S. S. Methods for determining the effective resistance. 2016. Tese (Doutorado) – Mathematisch Instituut, Universiteit Leiden, Leiden, dez. 2016. Disponível em: https://www.universiteitleiden.nl/binaries/content/assets/science/mi/scripties/master/vos_vaya _master.pdf. Acesso em: 22 fev. 2021.

WERNER, M.; JAHN, A.; LUTZ, E.; BOTTCHER, A. Analysis of system parameters for LEO/ICO-satellite communication networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 371-381, 2 fev. 1995. DOI 10.1109/49.345881. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Axel_Jahn/publication/3233493_Analysis_of_System_P arameters for LEOICO-

Satellite_Communication_Networks/links/551fab1c0cf2f9c1304df5f1/Analysis-of-System-Parameters-for-LEO-ICO-Satellite-Communication-Networks.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

WHITNEY, H. Congruent graphs and the connectivity of graphs. **American Journal of Mathematics**, [s. l.]: v. 54, n. 1, p. 150-168, 1932.

WOOD, L. Satellite Constellation Networks. *In*: ZHANG, Y. **Internetworking and Computing Over Satellite Networks**. Boston: Springer, 2003. cap. 2, p. 13-34. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0431-3_2. Disponível em: http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/publications/zhang-book/zhang-book-wood-chapter-2.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

WOOD, L. **Internetworking with satellite constellations**. 2001. Tese (Doutorado em Filosofia) – Universidade de Surrey, Guildford, 2001. Disponível em: http://epubs.surrey.ac.uk/704760/1/WOODInternetworking_with_satellite_constellations%20 PhD%20%20thesis.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

YWORKS. **yEd – Graph Editor**. Versão 3.21.1. Disponível em: https://www.yworks.com/products/yed. Acesso em: 03 mar. 2021.

ZHU, Y.; RUI, L.; QIU, X.; HUANG, H. Double-layer Satellite Communication Network Routing Algorithm Based on priority and failure probability. *In*: INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS & MOBILE COMPUTING CONFERENCE, 15., 2019,

Tangier. **Proceedings** [...]. New Jersey: IEEE, 2019. p. 1518-1523. DOI 10.1109/IWCMC.2019.8766688. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8766688. Acesso em: 09 out. 2020.