UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS

Faculdade de Computação e Engenharia Elétrica Bacharelado em Sistemas de Informação

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ESTRATÉGIAS DE ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM REDES ÓPTICAS METROPOLITANAS ELÁSTICAS

ANTÔNIO RODRIGO DA SILVA E SILVA

Marabá-PA

ANTÔNIO RODRIGO DA SILVA E SILVA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ESTRATÉGIAS DE ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM REDES ÓPTICAS METROPOLITANAS ELÁSTICAS

Projeto Final de Curso, apresentado à Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Graduação Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador:

Prof(a). Me. Léia Sousa de Sousa

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará Biblioteca Setorial II da UNIFESSPA

S586a

Silva, Antonio Rodrigo da Silva e

Avaliação de desempenho de estratégias de roteamento e alocação de espectro em redes ópticas metropolitanas elásticas / Antonio Rodrigo de Silva e Silva. — 2022.

63 f. : il.

Orientador(a): Léia Sousa de Sousa.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Computação e Engenharia Elétrica, Curso de Sistemas de informação, Marabá, 2022.

1. Redes de computadores - Ópticas. 2. Cabos de telecomunicação. 3. Óptica — Equipamento e acessórios. 4. Sistemas de telecomunicação. I. Sousa, Léia Sousa de, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 621.36

ANTÔNIO RODRIGO DA SILVA E SILVA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ESTRATÉGIAS DE ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM REDES ÓPTICAS METROPOLITANAS ELÁSTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Marabá, 14 de junho de 2022.

Prof^a. Léia Sousa de Sousa – Orientadora

they borne Ver have

Prof. Hugo Pereira Kuribayashi - Avaliador

Profa. Zenaide Carvalho da Šilva - Avaliadora

Marabá - PA.

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me sustentar em todos os momentos que passei para chegar até aqui.

A minha mãe por ser meu ombro amigo, meu guia e minha motivação.

Aos meus amigos de faculdade: Gabriel Ribeiro, Gustavo Soares, Larisse Brito, Jociele Bezerra, Kildery Varela, Daniel Vasconcelos. E a todos os colegas de classe, vocês são demais.

Aos meus amigos que essa cidade me presenteou: Ecioneide Mendes, Nilde Pereira, Thays de Jesus, Neto Correa. Vocês foram peça importante nessa jornada.

A todos que fizeram parte direta ou indiretamente dessa inesquecível viagem, sintam-se abraçados.

Em especial a minha professora/orientadora Léia Sousa, você é um ser incrível.

Obrigado!

"Amortecer a dor por algum tempo só vai torná-la pior quando você realmente sentir."

 $(Albus\ Dumbledore)$

RESUMO

Com o surgimento das Redes Ópticas Elásticas (Elastic Optical Networks – EON) tem sido previsto o aumento de recursos nas redes de comunicação óptica. No atual cenário da Internet, é necessário criar tecnologias que desenvolvam um alto nível de eficiência, a fim de suprir uma necessidade global. A EON trouxe vantagens capazes de tornar o uso dos recursos da rede mais flexíveis e eficientes. Este trabalho explora esta tecnologia e discute o atual estado da metro óptica paraense. Além disso, são implementados cenários em ambientes que simulam Redes Ópticas Metropolitanas (ROM) reais. Ao final desta pesquisa são gerados resultados que demonstram o impacto desta tecnologia em uma grande infraestrutura considerando métricas como a taxa de bloqueio de requisições, taxa de bloqueio de largura de banda, entre outras métricas fundamentais. Esses resultados mostram que uma rede metro com nós mais conectados dispõe de maior vantagem em relação a uma rede menos conectada, incorrendo em maior eficiência dos recursos disponíveis.

Palavras-chave: Rede Óptica; Rede Óptica Metropolitana; Rede Óptica Elástica (EON); Roteamento e Alocação De Espectro (RSA); Topologias de Rede Ópticas Metropolitanas.

ABSTRACT

With the emergence of Elastic Optical Networks (EON), an increase in resources in optical communication networks has been foreseen. In the current internet scenario, it is urgent to create technologies that develop a high level of efficiency, in order to meet a global need for connection. EON brought advantages capable of making the use of network resources more flexible and efficient. This work explores this technology and discusses the current state of metro optics in Pará. In addition, network and traffic scenarios are implemented in environments that simulate real Metro Optical Networks (ROM). At the end of this research, results are generated that demonstrate the impact of this technology on a large infrastructure considering metrics such as request blocking rate, bandwidth blocking rate, among other fundamental metrics. These results show that a metro network with more connected nodes has a greater advantage in relation to a less connected network, incurring greater efficiency of the available resources.

Keywords: Optical Networks; Metropolitan Optical Network; Elastic Optical Networks (EON); Routing and Spectrum Allocation (RSA); Metropolitan Optical Networks Topologies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração de uma rede metropolitana	19
Figura 2 — Transmissão e recepção WDM	21
Figura 3 — Exemplo de conexão entre nós da rede	24
Figura 4 – Exemplo de roteamento estático	25
Figura 5 – Exemplo de roteamento dinâmico	26
Figura 6 – Exemplo de roteamento adaptativo	27
Figura 7 – Backbone Óptico do NavegaPará	30
Figura 8 – Ambiente de simulação ONS utilizando IDE NetBeans	41
Figura 9 – Menu inicial do Dispatcher	42
Figura 10 – Diretório de arquivos exportados do Dispatcher	44
Figura 11 – Topologia da rede USA	45
Figura 12 – Topologia da rede ALEMÃ	45
Figura 13 – Secção de áreas nas topologia (a) Alemã e na (b) USA	47
Figura 14 – Probabilidade de Bloqueio (BR) de requisições na topologia (a) Alemã	
e na (b) USA	49
Figura 15 – Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) na na topologia	
(a) Alemã e na (b) USA	50
Figura 16 – Número de caminhos ópticos criados na topologia (a) Alemã e na (b)	
USA	51
Figura 17 — Média de saltos físicos dos caminhos ópticos por requisição na topologia	
(a) Alemã e na (b) USA	52
Figura 18 – Taxa de espectro óptico disponível na topologia (a) Alemã e na (b) USA.	53
Figura 19 – Probabilidade de Bloqueio (BR) do SWK em duas topologias distintas.	54
Figura 20 – Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) do SWK em	
duas topologias distintas	54
Figura 21 – Número de caminhos ópticos criados pelo SWK em duas topologias	
distintas	55
Figura 22 – Probabilidade de Bloqueio (BR) do MHK em duas topologias distintas.	55
Figura 23 – Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) do MHK em	
duas topologias distintas	56
Figura 24 – Número de caminhos ópticos criados pelo MHK em duas topologias	
distintas	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Relação das principais metros paraenses e suas características	29
${\bf Tabela\ 2\ -}$	Linha de argumentos para executar o JsonReader	43
$Tabela\ 3\ -$	Linha de argumentos para executar o GnuplotONS	43
Tabela 4 -	Percentual de excedente de carga por área	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A2-RSA Area-Aware RSA

BBR Bandwidth Blocking Ratio

BP Blocking Probability

BPSK Binary Phase Shift Keying

BVT Bandwidth-Variable Transponder

BV-OXC Bandwidth Variable Optical Cross-Connects

CA Comprehensive Area

CASP Roteamento por Caminho Menos Congestionado

CWDM Coarse Wavelength Division Multiplexing

DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing

EON Elastic Optical Networks

FF First-Fit

FS Frequency Slots

GA Genetic Algorithm

IoT Internet of Things

IXP Internet Exchange Point

ISP Internet Services Provider

KSP K-Shortest Paths

LAN Local Area Network

LF Last-Fit

LRW Least Resistance Weight

MAN Metropolitan Area Network

MH Minimum Hop

MHK Min-Hop K-shortest

MSF Most Subcarriers First

MON Metropolitan Optical Network

NBP Network Blocking Probability

OA Office Area

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OLA Optical Line Amplifier

ONS Optical Network Simulator

OPGW Optical Ground Wires

OSNR Optical Signal-To-Noise Ratio

OSNR-R Optical Signal to Noise Ratio Routing

PoP Ponto de Presença

PSR Power Series Routing

QoT Quality of Transmission

QPSK Quadrature Phase Shift Keying

RA Residential Area

RMSA Routing, Modulation and Spectrum Allocation

RNP Rede Nacional de Ensino e Pesquisa

ROM Rede Óptica Metropolitana

RSA Routing and Spectrum Allocation

RWA Routing and Wavelength Assignment

SA Spectrum Allocation

SDH Synchronous Digital Hierarchy

SP Shortest Path

SWK occupied-Slots-as-Weight K-shortest

TDM Time-Division Multiplexing

WDM Wavelength Division Multiplexing

8QAM 8 Quadrature Amplitude Modulation

16QAM 16 Quadrature Amplitude Modulation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivo Geral	16
1.3	Objetivos Específicos	16
1.4	Contribuições	17
1.5	Estrutura do Trabalho	17
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	19
2.1	Redes Metropolitanas	19
2.2	Redes Ópticas Metropolitanas	20
2.3	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM)	21
2.3.1	Roteamento e alocação de comprimento de onda RWA	22
2.4	Redes Ópticas Elásticas (EON)	22
2.5	Problema do Roteamento e Alocação de Espectro (RSA)	23
2.5.1	Roteamento estático	24
2.5.2	Roteamento dinâmico	25
2.5.3	Roteamento adaptativo	26
2.6	Problema da Alocação de Espectro	27
2.7	Seleção de Modulação	28
2.8	Redes Ópticas Paraenses	29
2.9	Medidas de Desempenho	30
2.9.1	Medida de Probabilidade de Bloqueio (BP)	30
2.9.2	Medida de Taxa Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR)	31
2.9.3	Medida de Taxa de Fragmentação	31
2.9.4	Representação do Tráfego de Marés (Tidal-Traffic)	32
2.10	Resumo Conclusivo	34
3	TRABALHOS RELACIONADOS	35

3.1	Problema do Roteamento	35
3.2	Problema da Alocação de Espectro	37
3.3	Métricas de Desempenho Avaliadas	38
3.4	Resumo Conclusivo	38
4	ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM REDES ÓPTI- CAS METROPOLITANAS	39
4.1	RSA com Caminho Mínimo	39
4.2	RSA Ponderado pela Ocupação Espectral	39
4.3	Algoritmo MHK e SWK	39
4.4	Ferramentas Utilizadas	40
4.4.1	O Simulador de Rede	40
4.4.2	O Despachador de Simulações	41
4.4.3	Ferramentas de Tratamento de Arquivos	43
4.5	Ambiente de Simulação	44
4.6	Proposta Deste Trabalho	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1	Métricas de Desempenho nas Topologias Alemã e USA	49
5.1.1	Probabilidade de Bloqueio (BR)	49
5.1.2	Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR)	50
5.1.3	Número Total de Caminhos Ópticos	50
5.1.4	Tamanho dos Caminhos Ópticos Gerados	51
5.1.5	Taxa de Espectro Óptico Disponível	52
5.2	Métricas de Desempenho do Algoritmo SWK	53
5.2.1	Probabilidade de Bloqueio (BR) do SWK	53
5.2.2	Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BRR) do SWK	54
5.2.3	Número de Caminhos Ópticos Gerados com o SWK	54
5.3	Métricas de Desempenho do Algoritmo MHK	55
5.3.1	Probabilidade de Bloqueio (BR) do MHK	55
5.3.2	Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) do MHK	55

5.3.3	Número de Caminhos Ópticos Gerados com o MHK	56
5.4	Resumo Conclusivo	57
6	CONCLUSÃO	58
REFERÊN	NCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o tráfego na Internet tem crescido exponencialmente, e não existe nenhuma indicação de que esta tendência cessará no futuro. Estima-se que, nos próximos dez anos, a taxa de acesso do usuário final irá crescer de $100 \ Mb/s$ para $10 \ Gb/s$, como consequência das novas tecnologias de redes de acesso, em especial as redes 5G (OLIVEIRA; FONSECA, 2019).

As redes ópticas são uma tecnologia como qualquer outra que sofre mudanças contínuas, e seu campo de pesquisa está crescendo cada vez mais devido a alta demanda de tráfego de dados que são utilizados diariamente.

Redes ópticas são redes de comunicação que se utilizam de uma infraestrutura de fibra óptica como meio de transmissão. Isso faz com que as redes desfrutem de todas as vantagens que esse meio proporciona. Graças a este sistema de transmissão um grande volume de dados pode ser transmitido (LÓPEZ; VELASCO et al., 2016).

A tecnologia de transmissão de dados por meio de fibra óptica permite escalar a banda larga e reduzir a latência, necessárias para que possamos usufruir de várias soluções tecnológicas e aplicações atuais e futuras (VIANA, 2021).

Mesmo sendo uma tecnologia inovadora a rede óptica já passou por algumas mudanças desde a sua chegada, a primeira geração dela era usada pelas companhias de telecomunicações para comunicação ponto-a-ponto. A principal função da fibra óptica era prover alta capacidade de transmissão e substituir os tradicionais cabos metálicos nas redes de transporte (XAVIER, 2016).

Em seu segundo momento as redes ópticas roteadas pela multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*), buscou o aumento da capacidade de transmissão da fibra óptica utilizada pela combinação de vários fluxos em um (XAVIER, 2016).

Em seguida, foram incorporadas algumas funções de comutação e roteamento no domínio óptico, como o *bypass* óptico, que antes eram realizadas eletronicamente, chegando a um estado de retransmissão do sinal sem conversão (XAVIER, 2016).

Toda essa infraestrutura para acesso à *Internet* requer uma colaboração importante de componentes fundamentais para tal conexão. As redes de longa distância ou simplesmente *backbones* são literalmente a "espinha dorsal" da *Internet*. Esta rede realiza a conectividade entre máquinas separadas fisicamente permitindo a comunicação entre dispositivos separados por um oceano (ALOO, 2020). Com relação a rede óptica metropolitana (ROM), ou metro, a demanda pelo consumo de banda larga torna-se cada vez maior, à medida que as redes de comunicação aproximam-se cada vez mais do usuário final. Deve-se destacar também que com o avanço da tecnologia de Internet das coisas (IoT - *Internet*

of Things) a necessidade por banda larga eficiente torna-se mais necessária. Os usuários tendem a permanecer cada vez mais conectados principalmente com a mudança mundial a partir da pandemia da COVID-19. As organizações tiveram que mudar suas rotinas bruscamente quase que da noite para o dia. Os hábitos de consumo se transformaram, os usuários mantêm conectividade simultânea, o consumo de vídeos de alta resolução aumentou, e até os jogos online já exigem mais performance da rede. Quanto maior for esse consumo, maior será a demanda de capacidade da rede dos provedores, e para que não haja perda na eficiência é necessário investir cada vez mais na infraestrutura. A pandemia por si só tem sido um ponto chave para que haja novos investimentos para suportar essa mudança impremeditada de consumo de banda larga (SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a).

É a partir da metro que as centrais de provedores de *internet* conseguem se conectar a servidores externos, dentro e fora do país. A sua estrutura descentralizada permite que a *internet* seja flexível, apresente alta performance e extrapole obstáculos de tempo e de espaço (TELIUM, 2018).

O backbone já está implementado no Brasil há mais de 20 anos. A Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) foi a primeira rede nacional gerada em um ambiente acadêmico— um modelo linear que, aos poucos, foi evoluindo, com formatos de topologia em anéis e estrelas (ALOO, 2020). Esta rede é composta por cabos de fibra óptica terrestre, de longa distância e alta capacidade de transmissão de dados, interconectando as cidades. Estão excluídas as redes metropolitanas, que só podem ser tratadas na escala local (MOTTA, 2011).

No caso das redes ópticas metropolitanas a conexão é feita através de várias redes locais virtuais (LAN) por se tratar de uma rede de médio alcance é possível conectar redes locais de prédios que estão dentro dessa região (mesma cidade ou municípios bem próximos). Sua configuração abrange diversos dispositivos de comunicação e também é uma das responsáveis por viabilizar a conexão da *internet* com diversas redes LANs (ALOO, 2020).

Este trabalho assume como cenário uma rede óptica metropolitana que já recebe dados agregados da rede de acesso e suas LANs. A metro troca dados com a *internet* nos pontos de troca da Internet (IXP - *Internet Exchange Point*) e forma volumes de dados que são transferidos entre regiões geográficas daquela mesma rede. As áreas geográficas são áreas residenciais e comerciais nas metrópoles, que possuem concentração de atividade humana em diferentes horários. Assim, o cenário de rede precisa levar em consideração a distribuição desigual do tráfego dos nós dessa rede.

1.1 Motivação

Atualmente, as redes ópticas no Brasil demonstram grande fôlego no mercado tecnológico, porém ainda há muitos desafios pelo caminho. Nas grandes metrópoles, o problema se dá muitas vezes pela falta de espaço físico para alocação dos fios. Os custos são elevados e há dificuldades operacionais para instalação das fibras em grandes distâncias entre os centros urbanos e em cidades com menor densidade demográfica e, consequentemente, menores demandas. Seja no ambiente das empresas ou no dos usuários, esta tecnologia possui um objetivo de melhorar a velocidade na transmissão de informações. Isso traz muitos benefícios, especialmente uma maior produtividade e aproveitamento de seus recursos, seja em prol do trabalho ou do lazer (MIRANDA et al., 2019). Mesmo sendo uma tecnologia criada há quase meio século, ainda há desafios a serem superados dado ao seu grande crescimento exponencial. Desafios estes que levaram a motivação desta pesquisa especialmente na região metropolitana paraense. A rede óptica elástica (EON - Elastic Optical Networks) é uma forte tendência para ser adotada no futuro devido a sua elasticidade de recursos e maior quantidade de canais (YAN et al., 2020). Tomando isso como contrapartida é essencial que hajam pesquisas que colaborem para este cenário de mudanças. Mudanças essas que partem do princípio da utilização ciente dos recursos que são disponibilizados pela rede, para que não haja desperdícios e estes possam ser utilizados de maneira cada vez mais eficiente. Assim, este trabalho aponta alguns cenários de redes e quantidade de recursos em rede metropolitanas, sendo avaliados com dois algoritmos clássicos da literatura de redes ópticas. Estes algoritmos clássicos são baseados em roteamento e alocação de espectro (RSA - Routing and Spectrum Allocation), sendo denominados roteamento pelo caminhos de menor salto (MHK - Min-Hop K-Shortest Path Routing) e roteamento pelo caminho de menor peso ponderado pela ocupação de espectro (SWK - Occupied-Slots-as-Weight K-Shortest Path Routing) demonstrates em YAN et al., 2020; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a.

1.2 Objetivo Geral

Comparar o desempenho de algoritmos de roteamento e alocação de espectro com estratégias diferentes de seleção de rotas em um cenário de rede metro EON.

1.3 Objetivos Específicos

- Identificar as principais ROM paraenses na literatura, afim de destacar o atual estado dessas redes na literatura recente;
- Identificar topologias metro considerando a adoção do novo sistema de transmissão de Redes Ópticas Elásticas e implementar cenários de simulação;

- Testar algoritmo de roteamento da literatura para análise de desempenho com relação a taxa de bloqueio de requisições e de largura de banda;
- Realizar simulações computacionais para avaliar as soluções de roteamento;

1.4 Contribuições

O presente trabalho foi realizado durante dois períodos letivos, os quais são o período 2021.2 (de 13/09/2021 a 18/12/2021) e 2021.4 (de 07/03/2022 a 18/06/2022). Nesse tempo, as principais contribuições deste trabalho foram uma publicação de um resumo em evento regional (SILVA, 2021) e realização de monitoria geral sobre o tema da pesquisa, conforme mostrado abaixo:

- SILVA, Antônio Rodrigo da S., SOUSA, Léia Sousa de. Roteamento e Alocação de Espectro Aplicados à Infraestrutura das Redes Ópticas Metropolitanas Paraenses. Anais do IV Congresso de Tecnologia e Desenvolvimento da Amazônia (CTDA). Vol. 1, página 95-96. ISSN-2674-6204. UNIFESSPA, 2021.
- 2. Realização de monitoria da disciplina SI01049 Avaliação de Desempenho de Redes de Computadores (2021 .4 T2018).

1.5 Estrutura do Trabalho

Esta Seção discorre sobre a abordagem de rede óptica, mais especificamente sobre redes ópticas metropolitanas, que serão apresentados no Capítulo 2. Nesse Capítulo, inicialmente discorre-se sobre rede metropolitanas em geral na Seção 2.1, com delimitação para as rede ópticas metropolitanas na Seção 2.2.

Em seguida, na Seção 2.3, contextualiza-se sobre a tecnologia WDM (Wavelength Division Multiplexing). Na Seção 2.3.1 é apresentado o problema recorrente da tecnologia WDM. Na Seção 2.4 é apresentado o conceito de Redes Ópticas Elásticas (EON) bem como as características dos equipamentos que implementam esta nova tecnologia. O problema do roteamento em EON é apontado na Seção 2.5, assim como o problema de alocação de espectro que é destacado na Seção 2.6. A Seção 2.7 discorre sobre os níveis de modulação em RSA. Por fim, a Seção 2.8 dá espaço às abordagens sobre a rede óptica paraense. Em seguida na Seção 2.9 discuti-se sobre as medidas de desempenho necessárias para avaliar a rede, mostrado nas Seções 2.9.2, 2.9.3 e 2.9.4. Fechando este Capítulo temos a Seção 2.10.

No Capítulo 3 temos a descrição de alguns trabalhos importantes para o desenvolvimento deste. Bem como o que se diz respeito sobre problema de roteamento na Seção 3.1 e também na Seção 3.2. A próxima Seção 3.3 apresenta as métricas de desempenho avaliadas pelos autores. Em seguida, 3.4 conclui este Capítulo.

O desenvolvimento deste trabalho em si parte da elaboração do Capítulo 4, este, mostra a aplicação das diretrizes da rede óptica, bem como a abordagem de ferramentas para avaliação da rede, destacados na Seção 4.1 e 4.2, além de destacar as ferramentas utilizadas para tais avaliações na seção 4.4. A Seção seguinte 4.4.2 introduz um ambiente virtual para realizar simulação, além de também na Seção 4.4.3 mostra-se como tratar tais simulações da Seção anterior. Por fim este capítulo apresenta como é o ambiente de simulação na Seção 4.5 e como será o passo a passo para obter tais resultados na seção 4.6.

Entra em discussão no Capítulo 5, os resultados obtidos no decorrer deste trabalho. Na Seção 5.1 avalia-se as métricas de desempenho das topologias distintas. Bem como a probabilidade de bloqueio na seção 5.1.1. A probabilidade de bloqueio da largura de banda na Seção 5.1.2. O número total de caminhos ópticos criados na Seção 5.1.3 e na seção 5.1.4 é destacado sobre a taxa de espectro óptico disponível. A partir da Seção 5.2 é avaliada as métricas de desempenho relacionadas ao algoritmo em si, como mostrado na seção 5.2.1 sobre probabilidade de bloqueio de SWK. A probabilidade de bloqueio de largura de banda é citada na Seção 5.2.2. Enquanto na Seção 5.2.3 discorre sobre os caminhos ópticos criados. Na Seção 5.3, discute-se sobre as métricas de desempenho relacionada ao algoritmo MHK, bem como na Seção seguinte 5.3.1 sobre a probabilidade de bloqueio. Em seguida a Seção 5.3.2 fala-se sobre a probabilidade de bloqueio da largura de banda e em sequencia na Seção 5.3.3 sobre os caminhos ópticos gerados pelo algoritmo. A Seção 5.4 conclui este capítulo. O Capítulo 6 conclui toda a contextualização e proposta deste trabalho.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 Redes Metropolitanas

Uma rede metropolitana (*Metropolitan Area Network* - MAN), é uma rede que abrange a área geográfica de uma cidade (CHATTERJEE; OKI, 2020). A MAN interliga várias (*Local Area Network* - LAN) geograficamente próximas. Assim ela permite que dois pontos distantes se comuniquem como se fizessem parte de uma mesma rede local. Uma MAN é formada por comutadores ou roteadores conectados entre si com conexões que podem ser fios metálicos ou cabos de fibra óptica. A comunicação com fibra óptica é o objeto de estudo deste trabalho e será detalhado a seguir (LUCH et al., 2021; POLICARPO et al., 2010; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022b).

Na Figura 1, ilustra-se como é uma rede metropolitana, nota-se que existe uma área que abrange toda uma região, conectando várias LANs próximas, essas LANs são redes de menor porte, por exemplo, escritórios, shoppings, lojas e etc. São necessárias em conexões de dispositivos que estão relativamente pertos. Sendo assim uma MAN é uma rede de médio alcance permitindo que dispositivos que estejam em um maior raio de distância conectem entre si.

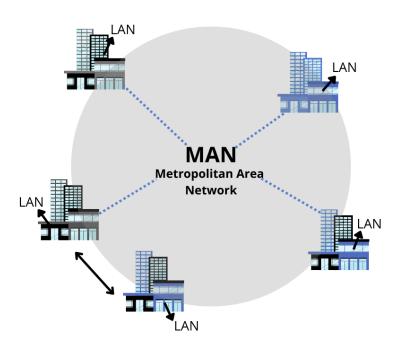


Figura 1 – Ilustração de uma rede metropolitana

Fonte: Elaborado pelo autor.

Geralmente, uma MAN é pequena o suficiente para que conexões de dados ponto a ponto dedicadas, ou *backbone*, sejam estabelecidas entre edifícios ou para um *data center*

de colocation centre. Um colocation centre é um data center independente que oferece hospedagem compartilhada para múltiplos servidores. Essas conexões de backbone podem usar uma variedade de tecnologias de enlace, incluindo Ethernet, fibra escura alugada ou fibra privada Wi-Fi ponto a ponto, fibra óptica com tecnologias de transporte específica, LAN sem fio (wireless LAN - WLAN) e enlaces privados redes 5G, por exemplo (GUSMÃO et al., 2014; JR, 2018). A comunicação por fibra óptica compreende o escopo deste trabalho.

2.2 Redes Ópticas Metropolitanas

As redes ópticas metropolitanas (*Metropolitan Optical Network* - MON), ou apenas metro, são o segmento de rede óptica que agregam o fluxo de dados vindo das redes ópticas de acesso e comutam esse fluxo agregado diretamente para as redes ópticas de núcleo (LÓPEZ; VELASCO et al., 2016). Esse segmento de rede possui numerosos nós, em maior quantidade do que nas redes de núcleo, e lidam com um maior volume de dados do que aquele que é gerado em redes de acesso.

Recentemente as MONs têm passado por grandes transformações para continuar sendo capazes de fornecer serviços que atendam aos requisitos das aplicações futuras. De olho nisso, a China (YAN et al., 2020) e Itália (TROIA et al., 2017), por exemplo, novas arquiteturas metro com infraestrutura baseada em novas tecnologias de baixo custo estão sendo implementadas com participação da academia e da indústria. A principal motivação é que a infraestrutura óptica possa servir como alicerce para aumentar a capilaridade de aplicações de computação em nuvem, nevoeiro e borda da rede, uma vez que este é o meio mais rápido de comunicação existente hoje, capaz de atingir a menores latências e maiores larguras de bandas (MUÑOZ et al., 2021). Entretanto, enquanto a velocidade máxima de comunicação já atingida em ROM recentemente foi de 800Gb/s (PAN et al., 2019), a velocidade média das ROMs paraenses é de cerca de 3Gb/s (IFPA, 2019).

Em cada MAN há um Ponto de Presença (*Point of presence* - PoP), que representa um ponto de acesso de determinado local para qualquer outro ponto, por meio da *Internet* (NASCIMENTO, 2017). Um provedor de *Internet* (*Internet Services Provider* – ISP) ou provedor de serviços online mantém um (ou vários) pontos de presença na rede (MIRANDA, 2019).

O protocolo de transmissão de sinais ópticos, isto é, as regras definidas para multiplexar e/ou agregar os dados é ditada pela tecnologia de transporte implantada nessas redes. A seguir será discutida a tecnologia atualmente implantada na maioria das redes ópticas metro, denominada Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (Wavelength Division Multiplexing - WDM).

2.3 Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM)

Com o propósito de tornar mais eficiente o uso de fibras ópticas, por volta de 1990, foi desenvolvido o protocolo WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), desenvolvido para estabelecer um número maior de conexões e realizá-las de maneira combinada (LÓPEZ; VELASCO et al., 2016; SHIRAKI et al., 2021).

A tecnologia WDM é uma técnica de transmissão por fibra óptica que utiliza vários comprimentos de onda de luz (ou cores), provenientes de várias fontes de lasers, para enviar dados através deste meio fotônico. Conforme afirma MORELLATO, 2019, no caso específico da fibra óptica, vários sinais de luz de cores diferentes (comprimentos de onda – lambdas) são concentrados para a transmissão. Esta tecnologia permite a transmissão simultânea de 2, 4, 8, 12 e 16 canais (PUHLMANN, 2015).

A Figura 2, faz referência a estes sinais de luzes. Nas extremidades direita e esquerda da figura estão os comprimentos de onda que serão agrupados através do multiplexador e então transportados pela fibra óptica, ilustrado pela linha horizontal da figura. No caminho inverso, isto é, quando o fluxo óptico chega ao destino, ele é desagrupado (de-multiplexado) para então ser convertido para o meio eletrônico.

DADO 2

DADO 2

DADO 3

DADO 3

DADO 4

DADO 5

DADO 6

DADO 6

DADO 7

DADO 7

DADO 8

Figura 2 – Transmissão e recepção WDM

Fonte: Elaborado pelo autor.

O WDM é uma tecnologia que começou a ser estabelecida na América Latina e no Brasil em 2013, quando a empresa de telecomunicações TIM implantou uma rota de transmissão de dados baseada em WDM com velocidade de 100G no trecho que vai de Belo Horizonte a Salvador. Ainda em 2013, a Telefônica do Chile implementou o protocolo WDM com velocidade de 400G (SANTOS, 2021).

Existem duas outras tecnologias que são um formato de variação da WDM, a

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) que possui 18 comprimentos de ondas uma quantidade de canais menor e mais limitada em relação à outra tecnologia a DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) que chega a 128 comprimentos de onda em um única fibra (POLICARPO et al., 2010).

A desvantagem destes sistemas são principalmente a limitação de escalabilidade dos canais e a rigidez dos comprimento de onda. Como se trata de uma grade espectral fixa de $50 \, \mathrm{GHz}$, e homogênea, as demandas só podem ser atendidas com taxas de até $400 \, \mathrm{GB/s}$ (LÓPEZ; VELASCO et al., 2016). Como é previsto o crescimento do tráfego sem precedentes, em breve essa tecnologia não será mais capaz de atender novas demandas das aplicações emergentes (SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022b).

2.3.1 Roteamento e alocação de comprimento de onda RWA

Nas redes WDM, uma conexão é estabelecida por um processo de duas etapas. Primeiro, um caminho óptico é implementado selecionando-se enlaces disponíveis entre pares de nós origem-destino. Em seguida, escolhe-se um comprimento de onda disponível para este caminho óptico (CANDIA, 2014). Esta tarefa de roteamento e atribuição denomina-se Problema de Roteamento e atribuição de Comprimento de Onda (Routing and Wavelength Assignment - RWA) (BENAYON et al., 2012). A falta de comprimento de onda disponível, em algum enlace do caminho escolhido, é um fator que interfere na solução do problema, pois causa o bloqueio da comunicação (CANDIA, 2014; BENAYON et al., 2012). O RWA pertence à categoria de problemas NP-completos cujo o tempo computacional aumentaria exponencialmente com o tamanho do problema (CANDIA, 2014; SHIRAKI et al., 2021).

2.4 Redes Ópticas Elásticas (EON)

Devido as limitações do sistema de transporte WDM, um novo sistema de transporte têm sido apresentado como alternativa de protocolo para substituir a tecnologia atualmente implantada. Trata-se das Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks* - EON) (MIRANDA et al., 2019; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022b). As EONs propõem uma transmissão heterogênea e flexível por apresentarem alta granularidade espectral em comparação com a WDM (SHARMA, 2018; OLIVEIRA; FONSECA, 2019). A EON utiliza subportadoras ortogonais entre si para transmissão do sinal através de uma técnica conhecida por Multiplexação de Frequências Ortogonais (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM) (SOUSA; DRUMMOND, 2017). A OFDM apresenta soluções viáveis para as principais desvantagens da tecnologia WDM, como por exemplo, sobreposição de canais sem interferência devido à sua propriedade ortogonal (CHATTERJEE; OKI, 2020).

Nas redes baseadas em EON, os recursos espectrais ópticos do enlace são fatiados na forma de slots de frequência (frequency slots - FS) ou canais medindo 12.5 GHz, que são

muito mais numerosos do que nas redes WDM, e muito mais finos também. As demandas cientes são transportadas através desses canais. O termo *elástico* é utilizado nesta rede porque é possível agrupar múltiplos FS, caso seja necessário, formando um supercanal de transmissão, assim como é possível alocar um único canal de menor largura de banda. Em WDM não é possível a alocação de múltiplos canais simultaneamente para atender uma mesma demanda (MIRANDA et al., 2019; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022b).

Para implementação de tal infraestrutura diferentes dispositivos são necessários. Tais como: transponders de largura de banda variável (Bandwidth-Variable Transponder - BVT) e comutadores ópticos de largura de banda variável (BV-OXC - Bandwidth Variable Optical Cross-Connects) (CHATTERJEE; OKI, 2020; LÓPEZ; VELASCO et al., 2016). Os BVTs convertem o fluxo de dados do domínio eletrônico para o domínio óptico (e vice-versa), enquanto os BV-OXCs são responsáveis por estabelecer o caminho óptico fim-a-fim que transportará a demanda (LÓPEZ; VELASCO et al., 2016).

Para atender uma demanda na rede EON é necessário resolver o problema da definição do caminho e determinação das fatias espectrais necessárias (FS), de forma análoga às redes WDM.

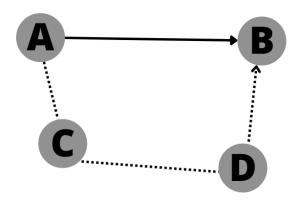
2.5 Problema do Roteamento e Alocação de Espectro (RSA)

O problema de roteamento e alocação de espectro (Routing and Spectrum Allocation - RSA) é o problema que precisa ser resolvido cada vez que ocorre uma chegada de requisição. A resolução desse problema requer o estabelecimento de um caminho óptico com a largura de banda solicitada. Para tanto, há três principais restrições a serem atendidas (MIRANDA et al., 2019; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022b):

- ullet Restrição de continuidade de espectro: os FS escolhidos pra atender a demanda devem ter o mesmo índice em todos os enlaces que compõem o caminho.
- ullet Restrição de contiguidade de espectro: os FS devem ser sequenciais consecutivos.
- Restrições de não sobreposição do espectro: um mesmo FS não pode simultaneamente atender duas demandas distintas.

Para o estabelecimento de uma conexão entre dois nós, A e B é necessário primeiramente escolher uma rota. Como mostra a Figura 3, em uma conexão pode existir diferentes rotas, neste exemplo observa-se que há duas possibilidades de conexão para o mesmo destino, existe a rota de conexão nó A e B e a rota do nó A e B com links em C e D.

Figura 3 – Exemplo de conexão entre nós da rede



Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha é feita através de algoritmos de roteamento, algum desses algoritmos utilizados na literatura são roteamento por menor caminho (SP - Shortest Path), roteamento por menor número de saltos (MH - Minimum Hop), o algoritmo de Yen, o roteamento por Least Resistance Weight - (LRW), o roteamento por caminho menos congestionado (CASP), o roteamento por série de potência (PSR - Power Series Routing) e o Roteamento por melhor relação sinal ruído óptico (OSNR-R - Optical Signal to Noise Ratio Routing) (XAVIER, 2016).

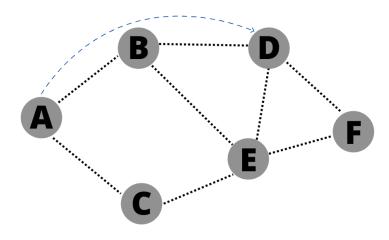
A tarefa do reteamento pode ser feita de forma estática, dinâmica ou adaptativa. A distinção entre estes tipos de roteamento é feita a seguir nas subseções 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3.

2.5.1 Roteamento estático

No roteamento estático as rotas são configuradas antecipadamente de acordo com as demandas que são conhecidas previamente. As rotas são caracterizadas como rotas permanentes, e ficam estabelecidas por meses (MIRANDA et al., 2019).

Neste exemplo ilustrado na Figura 4, a rota do nó A ao nó D, é uma rota fixa, neste caso a rota foi configurada antes manualmente pelo administrador de redes.

Figura 4 – Exemplo de roteamento estático

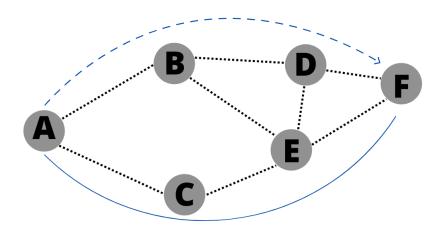


Fonte: Elaborada pelo autor.

2.5.2 Roteamento dinâmico

Neste tipo de roteamento as rotas variam de acordo com o tempo, com a demanda de requisições e com o estado da rede. Seu principal objetivo é evitar a existência de conflitos ou diminuir a probabilidade de bloqueio. As demandas de conexão não são conhecidas antecipadamente (HADI; PAKRAVAN; AGRELL, 2019). Este é o tipo de roteamento que será explorado no escopo deste trabalho.

Figura 5 – Exemplo de roteamento dinâmico



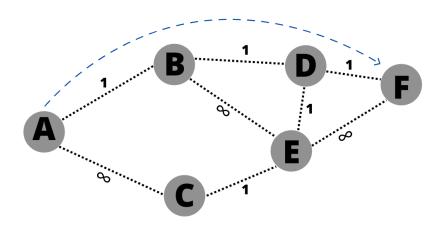
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5, mostra outro conceito de roteamento, neste caso a rota se ajusta conforme alguns fatores, por exemplo o tráfego da rede, este tipo de roteamento cria alternativas caso haja a necessidade de mudança de rota.

2.5.3 Roteamento adaptativo

No roteamento adaptativo, a escolha de uma rota, dentro de um conjunto de rotas que é definido previamente, é feita de acordo com o atual estado da rede (XAVIER, 2016; FONTINELE et al., 2018). Um exemplo deste roteamento é ilustrado na Figura 6, o mesmo se adapta ao atual estado da rede e qualquer rota entre os nós de origem e destino pode ser usada.

Figura 6 – Exemplo de roteamento adaptativo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Alguns dos algoritmos de roteamento utilizados em roteamentos estáticos ou alternativos, utilizam algoritmos de *Dijkstra* para encontrar o menor caminho, isto é, aquele com menor número de saltos em teremos de nós da rede e o de menor número de saltos (CORMEN et al., 2022; XAVIER, 2016).

Para buscar múltiplos menores caminhos utiliza-se o algoritmo dos k menores caminhos (K shortest paths - KSP) (YEN, 1971). Este algoritmo encontra k rotas de menor custo/tamanho entre um nó de origem e todos os demais nós da rede e o caminho preferencial entre esses nós. Quando o menor caminho entre dois nós não está disponível, o algoritmo determina o próximo menor caminho até encontrar um disponível (MIRANDA et al., 2019; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022b).

O KSP de Yen (YEN, 1971) é um algoritmo iterativo que encontra um caminho sem loop em cada uma das suas iterações. Esse algoritmo, assim como o algoritmo de Dijkstra, recebe como entrada um grafo G com peso nos arcos/enlaces, e devolve o (os) menor (K menores) caminho(s) (CORMEN et al., 2022).

2.6 Problema da Alocação de Espectro

Na EON não é suficiente encontrar uma rota adequada para atender uma demanda. É necessário garantir que nesta determinada rota exista recursos espectrais disponíveis. O espectro é visto como um recurso contínuo, sendo dividido em unidades FS, cuja capacidade de transmissão é menor que a de uma grade nas redes WDM comuns, conforme

já discutido na subseção 2.4. Diferentes políticas podem ser empregadas para a seleção dos FS (FONTINELE et al., 2018, 2018), tais como:

- First-Fit: seleciona os slots em ordem ascendente do espectro óptico, de acordo com os seus índices;
- Last-Fit: escolhe uma faixa de slots disponíveis com os maiores índices presentes na lista de slots disponíveis;
- Random-Fit: escolhe aleatoriamente uma faixa de slots disponíveis;
- Best-Fit: escolhe a faixa de slots disponíveis cuja quantidade de slots é a mais próxima da quantidade de slots requisitada.

2.7 Seleção de Modulação

Ao resolver o problema RSA, pode-se selecionar um nível de modulação fixo para todas as requisições. Uma derivação do problema RSA é o problema de roteamento, escolha de modulação e alocação de espectro (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation* - RMLSA). No RMLSA a modulação não é uma variável que aumenta a flexibilização do problema (COSTA; DRUMMOND, 2016; FONTINELE et al., 2018).

O formato de modulação determina a largura de banda e taxa de transmissão para atender uma demanda de acordo com a distância entre a origem e o destino. A escolha do nível de modulação deve levar em consideração a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT), e, consequentemente, a tolerância de relação sinal-ruído óptico (*Optical Signal-To-Noise Ratio* - OSNR) (COSTA; DRUMMOND, 2016; FONTINELE et al., 2018).

Os níveis de modulação do sistema OFDM são, principalmente, os seguintes:

- BPSK Binary Phase Shift Keying: codifica um bit por símbolo;
- QPSK Quadrature Phase Shift Keying: codifica dois bits por símbolo;
- 8QAM 8 Quadrature Amplitude Modulation: codifica três bits por símbolo;
- 16QAM 16 Quadrature Amplitude Modulation: codifica quatro bits por símbolo.

A escolha de um nível de modulação leva em conta a distância do caminho. Em geral, para caminhos maiores a modulação adequada é a de menor taxa de símbolos, BPSK. As modulações mais eficientes, que codificam muito mais bits por símbolo, são mais adequadas para distâncias bem menores de transmissão (COSTA; DRUMMOND, 2016; FONTINELE et al., 2018).

2.8 Redes Ópticas Paraenses

O segundo estado do Brasil de maior extensão territorial, o Pará, possui uma infraestrutura de comunicação Navega Pará, iniciado como um convênio de cooperação técnica entre a Eletronorte e o Governo do Pará há mais de uma década (ALMEIDA et al., 2011; IFPA, 2019). Este convênio tem como objetivo, incrementar a infraestrutura de telecomunicações do estado, mediante a infraestrutura de telecomunicações de fibra óptica da Eletronorte (ALMEIDA et al., 2011).

A telecomunicação óptica é feita explorando os cabos pára-raios de transmissão do sistema elétrico da Eletronorte. No interior desses cabos há fibras ópticas. Este tipo de cabo é denominado *Optical Fiber Ground Wire* (OPGW).

Algumas cidades interligadas pelo Navega Pará são mostradas na Tabela 1. Os pontos de presença (PoPs) são estações de telecomunicações estabelecidas junto ao *backbone*, responsável pela capilarização do tráfego demandado pelos municípios. Os sites são pontos de localização das instituições interligadas. No contexto de Marabá, a rede metro Marabá é dividida entre a rede acadêmica, administrada pelo Centro de Tecnologia da Informação e Comunicação (CTIC/UNIFESSPA) e a rede do Estado administrada pelo Governo do Estado.

Tabela 1 – Relação das principais metros paraenses e suas características

Rede Metro	Extenção Inicial	Extensão backbone	Extensão radial PoPs Site
Altamira	$14.600 { m m}$	$9.000 { m m}$	5.600m 28 40
Castanhal	28.100 m	26.100 m	2.100m 24 28
Marabá	$30.900 \mathrm{m}$	$22.200 {\rm m}$	8.700m 31 30
Santarém	$26.550 { m m}$	22.000m	4.550m 33 36

Fonte: NAVEGAPARÁ, 2014a; NAVEGAPARÁ, 2014b.

As fibras do cabo OPGW transportam os dados sem influências eletromagnéticas e sem qualquer limitação em função da relação sinal e ruído. As principais vantagens da rede OPGW (ELETRONORTE, 2021), são:

- Absorção de descargas atmosféricas e correntes de curto-circuito;
- Benefícios de instalação em relação a outros cabos;
- Vida útil prolongada;
- Maior largura de banda.

Em cada cidade há um equipamento de tecnologia DWDM conectando as fibras ópticas, possibilitando a interligação entre os principais órgãos do estado. Um mapa da infraestrutura do *backbone* óptico é mostrado na Figura 7.



Figura 7 – Backbone Óptico do NavegaPará.

Fonte: ALMEIDA et al.,(2011).

O backbone óptico implantado no Estado, ao longo das linhas de transmissão da Eletronorte abrange as cidades como mostrado na Figura 7. Estas localidades são interligadas através da rede óptica da Eletronorte para atender a demanda do Governo do Estado (ALMEIDA et al., 2011).

A implementação dessa rede de tecnologia DWDM, juntamente com equipamentos SDH, que é uma técnica de multiplexação TDM de banda larga, deve proporcionar uma capacidade de transportes suficientes para atender as demandas.

Esta integração entre cabo e linha de transmissão é baseada em dois conceitos, (ALMEIDA et al., 2011) que são:

- Preservar a função do cabo para-raio;
- Minimizar a intervenção na linha de transmissão existente.

2.9 Medidas de Desempenho

As principais métricas de avaliação de desempenho em uma rede óptica são: Probabilidade de Bloqueio (BP, *Blocking Probability*) apresentada na Subseção 2.9.1, Taxa de Bloqueio de Largura de Banda (BBR - *Bandwidth Blocking Ratio*) apresentada na Subseção 2.9.2 e Taxa de Fragmentação Espectral, discutida na Subseção 2.9.3.

2.9.1 Medida de Probabilidade de Bloqueio (BP)

Seja *RTotal* o número de chegadas de requisições consideradas em uma simulação. A probabilidade de bloqueio é obtida pela razão do número de requisições bloqueadas (não atendidas) pelo número total de requisições de conexão, mostrada na Equação 1. Essa métrica é uma medida de desempenho global da rede. Quanto mais elevado for o valor da probabilidade de bloqueio, menos usuários serão atendidos e, consequentemente, pior

será o desempenho da mesma. Para estimar a probabilidade de bloqueio, é comum simular um grande número de requisições de conexão à rede óptica e contabilizar a quantidade de requisições bloqueadas (XAVIER, 2016).

A probabilidade de bloqueio é definida pela Equação 1:

$$BP = \frac{RB loque a dos}{RT otal} \tag{1}$$

2.9.2 Medida de Taxa Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR)

Seja BWT otal o número de chegadas de requisições consideradas em uma simulação. A taxa BBR é o quociente da divisão da quantidade de largura de banda (BW - bandwidth) solicitada pelas requisições que foram bloqueadas, isto é, BWB oqueados, e a quantidade total de largura de banda solicitada por todas as requisições BWT otal, conforme mostra a Equação 2:

$$BBR = \frac{BWB loque a dos}{BWT ot al} \tag{2}$$

2.9.3 Medida de Taxa de Fragmentação

Outra importante métrica de desempenho é a taxa de fragmentação. Cada chegada de requisição na rede solicita uma certa quantidade não uniforme de recursos espectrais. Com várias demandas diferentes chegando e sendo atendidas, a banda espectral da rede vai sendo reservada de maneira desordenada, gerando 'buracos' de *slots* de frequência intercalados por pequenos fragmentos de espectro que podem não ser suficientes para atender uma nova requisição. Assim, a rede pode chegar a uma estado de bloqueio elevado de requisições, mesmo tendo bastante *slots* de frequência disponíveis.

A fragmentação do espectro não está diretamente relacionada com a utilização do espectro. A fragmentação é definida quando os recursos espectrais (*espectro livre*) estão divididos em várias partes pequenas, enquanto a utilização do espectro é definida como uma proporção do uso sobre os recursos espectrais totais (COSTA, 2021).

Para medir a taxa de fragmentação existe algumas métricas que podem ser utilizadas, por exemplo sobre: cálculo da fragmentação externa, *slots* requeridos pela requisição de tráfego e usando a entropia de Shannon (COSTA, 2021).

Conforme mostra a Equação 3 o maiorBlocoLivre representa o número de slots do maior espaço contíguo livre, o totalLivre é o número total de slots disponíveis. Se F_{ext} for próximo a um, significa que o espaço disponível no canal está totalmente fragmentado e divido em pedaços pequenos (COSTA, 2021).

$$F_{ext} = 1 - \frac{maiorBlocoLivre}{totalLivre} \tag{3}$$

Outra métrica de medida de fragmentação são as de slots requeridos pela requisição de tráfego. Na Equação 4, temos que a taxa de fragmentação é uma função que leva em consideração o número de slots requeridos no atendimento da demanda. Onde, c é o número de slots requisitados, Livre(c) é a função que retorna o número de requisições simultâneas com tamanho "c" que podem ser satisfeitas. Dessa forma, a taxa de fragmentação é relativa à demanda de tráfego requisitada (COSTA, 2021).

$$F_{req}(c) = 1 - \frac{cLivre(c)}{TotalLivre} \tag{4}$$

A entropia de *Shannon* pode ser usada para medir a fragmentação do espectro. A Equação 5 mostra como é esta função:

$$F_{es} = -\sum_{i=1}^{N} \frac{D_i}{D} ln \frac{D_i}{D}$$
 (5)

Nesta métrica da Equação 5, avaliam-se os blocos livres contíguos na rede em razão da capacidade total do enlace. Onde, N representa a quantidade de sub-blocos de subportadoras livres no espectro, Di representa o tamanho do sub-bloco i e D representa o total de subportadoras do espectro, sejam eles livres ou ocupados (COSTA, 2021).

2.9.4 Representação do Tráfego de Marés (Tidal-Traffic)

Em redes metro de comunicação estão presentes várias áreas e/ou distritos (ou zonas) nas quais as pessoas moram ou trabalham, e que apresentam picos de tráfego em horários muito distintos. Como exemplo, algumas regiões metropolitanas podem possuir trés outras áreas específicas:

- Área de Negócios (OA Office Area ou Business Area): referindo-se à área que abrange escritórios, onde a população trabalha;
- Área Residencial (RA Residential Area): refere-se à área residencial, onde a população mora;
- Áreas Compreensivas (CA *Comprehensive Area*): refere-se as áreas abrangentes, onde não são nem OA e nem RA.

O tráfego de marés é o nome dado para a representação do comportamento do tráfego de dados em uma rede de comunicação onde ocorrem mudanças do tráfego transportado em decorrência dos horários do dia e das áreas geográficas por onde esses tráfegos perpassam. Com isso o tráfego é distribuído de forma desigual ao longo de toda a rede. Por exemplo, em uma segunda-feira, o tráfego de dados às 15h tende a ser

extremamente elevado nas OA em comparação com as RA e CA, visto que é um horário no qual as pessoas estão nos seus locais de trabalho.

Um exemplo de modelo criado para representar a medida de distribuição de tráfego de mares é um modelo trigonométrico chamado *Multi-Step Trigonometric Model (MSTM)* proposto por (YAN et al., 2020).

De acordo com as atividades humanas, um dia das 0h às 24h poderia ser dividido em quatro períodos com quatro timestamps, ou seja, t_1 , t_2 , t_3 e t_4 (YAN et al., 2020), conforme listado:

- $(t_1, t_2]$: representa o período de tempo em que as pessoas estão indo trabalhar;
- $(t_2, t_3]$: boa parte das pessoas estão trabalhando neste período;
- $(t_3, t_4]$: as pessoas estão saindo de seus empregos e indo para suas áreas residenciais;
- \bullet $(t_4, 24h + t_1]$: neste período boa parte das pessoas estão dormindo

A ideia do modelo MSTM é usar métricas de geração do tráfego por cada área, resultando em uma distribuição desigual do tráfego nas áreas específicas separadamente, que pode ser maior em um determinado período. Assim é possível definir que no período após t_4 as pessoas estão em suas residencias e consequentemente gerando mais tráfego na rede naquele ponto do que o período de $(t_1, t_2]$ que é quando elas estão indo para a área OA (YAN et al., 2020).

O modelo MSTM é mostrado abaixo. A geração de tráfego na RA, OA e CA, é dada pelas Equações 6 7 e 8, respectivamente:

$$\rho R A^{(t)} = \begin{cases}
\alpha_1 \cdot \sin(\frac{t - t_2}{t_2 - t_1} \pi - \frac{\pi}{2}) + \alpha_1 + \beta, \\
t \in (t_1, t_2) \\
\alpha_2 \cdot \sin(\frac{t - t_2}{t_4 - t - 2} \pi - \frac{\pi}{2}) + 2\alpha_1 + \alpha_2 + \beta, \\
t \in (t_2, t_4) \\
(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \cos(\frac{t - t_4}{t_1 + 24 - t_4} \pi) + \alpha_1 + \alpha_2 + \beta, \\
t \in (t_4, 24 + t_1)
\end{cases}$$
(6)

$$\rho OA^{(t)} = \begin{cases}
\alpha'_1 + \alpha'_2 \cdot \sin(\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \pi - \frac{\pi}{2}) + \alpha'_1 + \alpha'_2 + \beta', \\
t \in (t_1, t_2) \\
2\alpha'_1 + 2\alpha'_2 + \beta', \\
t \in (t_2, t_3) \\
\alpha'_2 \cdot \cos(\frac{t - t_3}{t_4 - t_3} \pi) + 2\alpha'_1 + \alpha'_2 + \beta', \\
t \in (t_3, t_4) \\
\alpha'_1 \cdot \cos(\frac{t - t_3}{t_1 + 24 - t_4} \pi) + 2\alpha'_1 + \beta', \\
t \in (t_4, 24 + t_1)
\end{cases}$$
(7)

$$\rho C A^{(t)} = \begin{cases}
2\alpha'' + \beta'', \\
t \in (t_2, t_4) \\
\alpha'' \cdot \cos(\frac{t - t_4}{t_2 + 24 - t_4} \cdot 2\pi) + \alpha'' + \beta'', \\
t \in (t_4 + t_2)
\end{cases} \tag{8}$$

No modelo acima, as variáveis α , α' e α " são os valores de base de linha (ponto de partida) para representar a flutuação do tráfego em cada linha do tempo nas RA, OA e CA. Já as variáveis β , β' e β " representam os valores constantes de tráfego em cada período.

O MSTM é capaz de explicar a distribuição da expectativa de tráfego para RA e OA, e tem um desempenho relativamente baixo para CA. Isto ocorre porque a CA realmente inclui muitos tipos de áreas cujos padrões de tráfego são notavelmente diferentes. Para os finais de semana, feriados e dias com eventos súbitos, a distribuição do tráfego é difícil de analisar.

2.10 Resumo Conclusivo

Este capítulo abordou os principais conceitos sobre as redes ópticas, bem como as redes metropolitanas e sua infraestrutura, a tecnologia empregada nas redes ópticas WDM e suas características. Além da tecnologia que traz consigo flexibilidade da largura de banda para acomodação das conexões, as EONs.

Portanto, além do destaque sobre esses assuntos, é tratado também abordagens sobre a rede metropolitana paraense, sobre a qual eventualmente relata-se a respeito da infraestrutura de rede na região.

Tais conceitos são importantes para a compreensão dos próximos capítulos. O principal objetivo foi familiarizar o leitor com termos técnicos da área de redes ópticas e situar as principais tecnologias e protocolos de transmissão, além de apresentar as principais métricas de desempenho fundamentais para a metro.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta Seção serão descritos alguns trabalhos que envolvem o campo de pesquisa sobre EON e o problema RSA. Os principais critérios de seleção destes trabalhos são a relevância do assunto abordado para esta pesquisa, isto é, o quão próximo são os assuntos, bem como a atualidade do estudo, sob o qual são selecionados trabalhos recentes do estado-da-arte. A seguir a Seção 3.1 apresenta os trabalhos que investigam estratégias de resolução do problema de roteamento. A Seção 3.2 apresenta a estratégia de resolução do problema de alocação de espectro. A Seção 3.3 apresenta uma avaliação a partir dos trabalhos selecionados bem como uma comparação entre eles. Na Seção 3.4 conclui-se o estudo feito neste Capítulo 3.

3.1 Problema do Roteamento

O problema do roteamento é estudado de forma genérica, com a resolução do problema RSA (SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a; MIRANDA et al., 2019; SHARMA, 2018), bem como de forma mais específica com a abordagem do problema RMSA (FONTES et al., 2019; COSTA, 2021).

Uma solução de roteamento RSA é proposta em SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a voltado para redes metro. A solução, denominada Aware Link Weighted Area with Complete Sharing (ALWAcs), considera a distribuição desigual do tráfego de acordo com o modelo trigonométrico de YAN et al., 2020 O principal objetivo da proposta é a reduzir a taxa BR e BBR na rede metro como um todo, assim como em algumas áreas específicas.

Em MIRANDA et al., 2019 é apresentada uma solução RSA para o cenário de redes de núcleo. O algoritmo faz escolhas de rotas que sejam mais eficientes no consumo de energia elétrica pelos equipamentos da rede. Assim, sempre que possível os caminhos selecionados para atender uma demanda são aqueles que já estão estabelecidos, que é mais econômico do que criar um novo caminho. A criação de um novo caminho incorreto em ter que ligar equipamentos que estavam sem uso, enquanto que o aproveitamento do caminho já existente adiciona apenas um novo transponder ligado na rede.

Em SHARMA, 2018 estuda-se o problema da probabilidade de bloqueio, onde propõem-se uma nova forma de atribuição de espectro baseada em uma estratégia SA proposta pelos autores comparada a outras estratégias existentes. Os autores realizam simulações baseadas na carga da rede tomadas de 100 em 100 até 600 Erlangs, caminho fixo com granularidade de tamanho 4, 8 e 16 que é determinado pelo algoritmo SA proposto, e roteamento de múltiplos caminhos (Multipath Routing), assim poderão realizar comparações entre a estratégia First-fit, Random-fit e a estratégia SA proposta, e concluiu-se que a utilização da proposta SA é mais eficaz em relação a Random-fit e First-fit, e gera menos bloqueio em comparação às outras que foram avaliadas.

Para YAN et al., 2020 a distribuição de tráfego de dados em áreas de forma desordenada pode gerar uma grande probabilidade de bloqueio da rede, para isso os autores criaram um modelo de tráfego que identifica os maiores picos de utilização de dados em diferentes horários e também em diferentes locais, tais como área residencial (RA), área comercial (OA), onde as pessoas trabalham, e áreas compreensivas (CA) que são áreas que não são nem OA e nem RA. O modelo que os autores propõem para ser utilizado para descrever o comportamento do tráfego nestas áreas ao longo do dia é chamado modelo trigonométrico de tráfego de maré. E além deste modelo é proposto um algoritmo de roteamento de tráfego com foco em suas áreas específicas denominado Area-Aware RSA (A2-RSA), isto é, roteamento ciente da área. O mesmo é comparado a dois algoritmos de benchmarking Min-Hop K-shortest (MHK) e occupied-Slots-as-Weight K-shortest (SWK). Nesta comparação os autores demonstram que o algoritmo por eles proposto é mais eficiente e gera menos probabilidade de bloqueio (BP), o mesmo segundo o estudo se favorece das políticas de seleção de caminho e a ajusta para o horário e região específica, e considera as diferentes políticas de seleção de caminho para as solicitações de conexão.

Em FONTES et al., 2019 investiga-se o problema RMSA - Roteamento, modulação e alocação de espectro da rede. Os autores propõem a utilização de GA (algoritmo genético) com base nos critérios MSF. O GA é configurado para que os genes sejam codificados, os genes neste contexto são um índice de uma rota retornada pelo algoritmo de *Yen*, que são atribuídos aleatoriamente, como os genes do cromossomo foram codificados com possíveis soluções se alguma das possíveis soluções forem satisfatórias os genes geram descendentes.

Já COSTA, 2021 apresenta uma série de estudos e modelos de otimização para redes de núcleo, com algoritmos RSA e RMSA voltados para a eficiência energética. O altor considera vários cenários de tráfego, abordagens de agregação elétrica e óptica e modulação adaptativa na rede. Enquanto FONTES et al., 2019; COSTA, 2021; MIRANDA et al., 2019; SHARMA, 2018 focam seus estudos em redes de núcleo, YAN et al., 2020; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a abordam as redes metropolitanas, que são objeto de pesquisa deste trabalho.

O problema de roteamento, conforme destacado anteriormente na Seção 2.5 do Capítulo 2 , necessita de algoritmos de roteamento que encontrem o melhor caminho entre os nós de origem e de destino. Com relação aos trabalhos SHARMA, 2018; YAN et al., 2020; MIRANDA et al., 2019; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a o principal algoritmo escolhido é o algoritmo KSP de Yen. Essa estratégia possibilita encontrar os K menores caminhos possíveis sem loops na topologia. Outra política que pode ser citada é o algoritmo de Dijkstra (FONTES et al., 2019) que determina o único caminho de custo mínimo entre um nó fonte e todos os outros nós de uma rede – uma tabela de roteamento. Por outro lado, o algoritmo de Yen emprega Dijkstra para encontrar os K caminhos mais curtos entre um nó de origem e um nó de destino (FONTES et al., 2019). Em YAN et al., 2020; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a são utilizados valores para

K que pode ser qualquer valor do conjunto 2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12. É demonstrado que quando maior for o valor de K, maiores são as possibilidades de encontrar recursos na rede. Entretanto, um efeito colateral é que, quanto maior for o valor de K, maiores são os caminho ópticos selecionados, o que aumenta a latência de atendimento dos serviços. Em geral, fica demonstrando também que valores práticos para K acima de 5 geralmente não resultam em grandes melhoras de desempenho.

E também o *Multipath Routing* (SHARMA, 2018), oferece a vantagem de usar mais de um caminho, dividindo uma solicitação de conexão em várias solicitações menores e atribuindo *slots* em diferentes rotas a essas solicitações. Entretanto, esta estratégia não é muito adequada para cenários de tráfego sensível à latência visto que a transferência só é concluída depois que todas as parte da requisição chegam ao destino.

3.2 Problema da Alocação de Espectro

O problema de alocação de espectro já é um problema comumente resolvido de maneira reunida com o problema de roteamento. Por este motivo é denominado problema RSA. Tratados de forma separada, o problema é chamado de R + SA ou o inverso. Algumas estratégias citadas na literatura para resolver este problemas são First-Fit (FF), Last-Fit (FF) (YAN et al., 2020; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a; COSTA, 2021), Random-Fit (RF) e algoritmos genéticos (FONTES et al., 2019).

Em FONTES et al., 2019 tratado o problema RMSA e os autores propõem a utilização de GA (Genetic Algorithm) com base nos critérios MSF. O GA é configurado para que os genes sejam codificados, os genes neste contexto são um índice do espectro que é atribuídos aleatoriamente, como os genes do cromossomo foram codificados com possíveis soluções se alguma das possíveis soluções forem satisfatórias, os genes geram descendentes (FONTES et al., 2019).

Já SHARMA, 2018 faz comparações entre a estratégia First fit, Random-fit e a estratégia SA proposta pelos autores, e concluiu-se que a utilização da proposta SA é mais eficaz em relação a Random-fit e First-fit, e gera menor BP em comparação às outras que foram avaliadas. Os autores realizam simulações baseadas na carga da rede tomadas de 100 em 100 até 600 Erlangs, com caminho fixo, tendo requisições com granularidade de tamanho 4, 8 e 16 que é determinado pelo algoritmo SA proposto, e roteamento múltiplo (Multipath Routing).

Conforme demonstrado por COSTA, 2021 em geral estratégias como FF e LF tem comportamentos muito parecidos visto que LF pode ser visto como um FF ao contrário. Essas duas abordagens sempre geram melhores resultados do que a política RF, que resulta em uma maior fragmentação de espectros na rede.

Em YAN et al., 2020; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a é utilizada a

política First-Fit com KSP em todos os algoritmos, inclusive nos algoritmos benchmark. Nos cenários são utilizados valores para K que pode ser qualquer valor do conjunto 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12. É demonstrado que quanto maior for o valor de K, maior será o custo computacional para as buscas de slost disponíveis com o FF, uma vez que caminhos maiores possuem mais enlaces, e é preciso varrer todos os enlaces em busca da sequência contígua de espectro para atender a demanda.

3.3 Métricas de Desempenho Avaliadas

Na literatura avaliada, as principais métricas utilizadas para realizar a avaliação de desempenho dos algoritmos são as seguintes: BBR (SHARMA, 2018; YAN et al., 2020; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a; COSTA, 2021; MIRANDA et al., 2019), BR (YAN et al., 2020; SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022a; COSTA, 2021; MIRANDA et al., 2019), Taxa de Fragmentação (COSTA, 2021) e Taxa de espectro óptico disponível (COSTA, 2021).

Conforme demonstrado, os estudos focaram principalmente em medir a taxa de bloqueio de requisições e largura de banda dessas requisições para tentar minimizar as perdas de serviços de conexão. Essas duas taxas representam os principais desafios visto que essas perdas não podem exceder um determinado limite, definido nos acordos de nível de serviço. Resultados ruins de BR e BBR são facilmente perceptíveis pelos usuários da rede. Essas métricas ajudam a determinar o melhor esforço computacional e melhor estratégia algorítmica quando há um grande volume de dados trafegando na rede simultaneamente.

Já a Taxa de Fragmentação e a Taxa de espectro óptico disponível são métricas de interesse do provedor de rede para avaliar como suas estratégias estão explorando o recurso disponível. Estas são medidas que não afetam o usuário, mas determinam se os provedores estão utilizando abordagens eficientes para atribuir os seus recursos no atendimento dos serviços.

3.4 Resumo Conclusivo

Neste capítulo de revisão da literatura foram abordadas as pesquisas relacionadas às propostas de roteamento em EON (Seção 3.1), bem como a alocação de espectro (Seção 3.2). Dos estudos levantados ficou claro que a estratégia de roteamento KSP e a alocação de espectro com a política FF são as mais comuns e eficientes utilizadas nos algoritmos heurísticos. Também conclui-se que são suficiente os valores de 3 a 5 para a quantidade K no algoritmo KSP.

Além disso, foram destacadas as principais métricas de desempenho avaliadas na literatura de redes ópticas (Seção 3.3). Este levantamento é relevante para determinar como será avaliado o cenário metro que é objeto de estudo deste trabalho.

4 ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM REDES ÓPTICAS METRO-POLITANAS

Este capítulo apresenta a proposta de comparação de algoritmos RSA com duas principais abordagens: RSA com caminho mínimo ou *Min-Hop K-shortest path routing* (MHK), destacado na Seção 4.1 e RSA ponderado pela ocupação espectral em cada enlace ou *Occupied-Slots-as-Weight K-shortest path routing* (SWK), destacado na Seção 4.2.

4.1 RSA com Caminho Mínimo

O RSA com caminhos mínimos é denominado como Min- $Hop\ K$ -shortest path $routing\ (MHK)$ no trabalho de YAN et al., 2020. O MHK visa encontrar o caminho com a mínima quantidade de saltos, ou seja o caminho de menor rota. Este algoritmo determina o caminho mais curto, e também os próximos k caminhos mais curtos (YAN et al., 2020).

Este algoritmo assim como outros existentes na literatura, pode ser usado como algoritmo de referência ou de *benchmark*, afim de realizar medições para comparações. Assim como em YAN et al., 2020 e também em SOUSA; COSTA; DRUMMOND, 2022b utilizam este algoritmo, juntamente com o algoritmo SWK para fins de referência, com o o algoritmo A2-RSA proposto pelos autores.

4.2 RSA Ponderado pela Ocupação Espectral

O algoritmo de roteamento de caminhos ponderados pelo número de slots ocupados como peso ou Occupied-Slots-as-Weight K-shortest path routing (SWK), calcula a taxa de slots ocupados em cada enlace da rede e utiliza essa informação como peso para este enlace. O caminho é determinado pela soma dos pesos nos enlaces que compõem o caminho. O número do slots ocupados é considerado como o peso para indicar brevemente a carga de tráfego, que segue a estratégia do caminho menos carregado, visando minimizar o recurso de espectro ocupado em um caminho de roteamento (YAN et al., 2020).

4.3 Algoritmo MHK e SWK

Para avaliar a rede descrita neste capitulo, MHK e SWK são introduzidos a fim de medir o desempenho das redes ópticas descritas na seção 4.5. É apresentado um único pseudocódigo para os Algoritmos RSA (Algoritmo 1) mas que representa os dois algoritmos, sendo que a principal diferença entre eles é destacada na linha 9.

O Algoritmo 1 começa com a inicialização do grafo representando a topologia de rede G(V, E, S), onde V é o conjunto de vértices, E é o conjunto de enlaces e S é o conjunto de slots em cada enlace, atribuindo peso 1.0 a cada enlace, conforme mostra a linha 1. O laço das linhas 2 até 10 é executado para todas as requisições R que chegam na

Algoritmo 1 RSA-Benchmarks (MHK e SWK com k caminhos)

```
1: Inicializa G(V, E, S) com peso 1.0 nos enlaces
 2: for cada r(v_s, v_d, r, t_b, t_e) \in R do
       Calcula k rotas viáveis usando o KSP de Yen
 3:
       for cada i = 1, 2, ...., k do
 4:
           Verifica disponibilidade de slots usando FF
 5:
       end for
 6:
       if \exists r(k_i, slots) then
 7:
           Aloca recursos espectrais
 8:
 9:
           Atualiza os pesos nos enlaces da rede se for o SWK
10:
       else
           Bloqueia r
11:
       end if
12:
13: end for
```

rede. Cada requisição $r \in R$ possui uma origem (v_s) , um destino (v_d) , uma taxa de dados (r), um tempo de inicio e de finalização $(t_b, t_e, respectivamente)$.

Para cada requisição $r \in R$ são calculados k caminhos usando o algoritmo KSP de Yen (YEN, 1971), como mostra a linha 3. Para cada caminho é verificada a disponibilidade de espectro na ordem ascendente dos índices de slots, que é como funciona a política First-Fit (linha 5). Se houver recurso disponível a requisição r é aceita e a alocação é efetivada (linha 8). Caso contrário, a requisição r é bloqueada, como descreve a linha 11 do Algoritmo 1.

4.4 Ferramentas Utilizadas

4.4.1 O Simulador de Rede

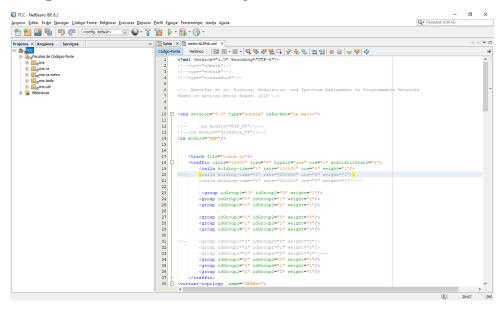
Como ambiente de simulação foi utilizado o Optical Network Simulator (ONS) ¹ para implementação do Algoritmo 1. O ONS é um simulador que foi desenvolvido em Java e utiliza eventos discretos para simular requisições de tráfego de uma rede óptica WDM ou EON. A ferramenta é capaz de incluir desenvolver e avaliar novas pesquisas relacionadas ao problema de roteamento e alocação de comprimento de onda RWA das redes WDM e ao problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa RMLSA das redes EON, ambos em cenários de tráfego dinâmico. O ONS foi projetado para tornar fácil a implementação do novos algoritmos (RWA/RSA/RMLSA) proporcionando uma implementação ágil e um desempenho satisfatório mesmo quando simulado em grandes topologias de rede.

Os algoritmos são implementados através de leitura de um arquivo XML, onde carregam-se informações configuráveis referentes a execução atual. Neste arquivo são definidos o algoritmo de roteamento e alocação desejado, como por exemplo, RSA, RMLSA,

¹O ONS está disponível em https://ons-simulator.com/>.

dados a respeito do tráfego e das chamadas executadas na rede, a topologia física do grafo, a qual representa a rede óptica. Na Figura 8 é demonstrado um arquivo xml no ambiente de simulação dentro da IDE *NetBeans*.

Figura 8 – Ambiente de simulação ONS utilizando IDE NetBeans



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste ambiente, o arquivo xml configurado com as especificações referente a sua simulação pode ser executado, nota-se que na lateral esquerda da janela da IDE temos varias pastas dentro do projeto no qual faz parte o simulador ONS. Estas pastas referem-se as classes de algoritmos que serão utilizadas em determinada simulação. O diretório do simulador organiza-se da seguinte forma:

- ONS: Código do simulador em si, utiliza o diretório utils para algumas funcionalidades;
- ONS.RA: Contêm os códigos dos algoritmos de roteamento e alocação;
- ONS.RA.METRO: Contêm os códigos dos algoritmos de roteamento e alocação voltados para redes metropolitanas;
- ONS.TOOLS: Contêm ferramentas para carregar e salvar objetos;
- ONS.UTILS: Contêm algoritmos úteis para o funcionamento geral do simulador.

4.4.2 O Despachador de Simulações

Devido aos requisitos computacionais das tarefas de simulação, que demandam recursos suficientes de processamento para cada um dos algoritmos e considerando os cenários de rede, utilizou-se um despachador de simulação, denominado *Dispatcher* ², para

²O despachador de simulações está disponível em http://45.171.101.46:8081.

realização das simulações em lote. Este sistema utiliza máquinas virtuais para distribuir as tarefas de simulação e concluir a simulação com otimização de tempo de processamento.

O *Dispatcher* é um gerenciador de sistema distribuído que despacha (de forma tolerante a falhas) tarefas de simulação de computação pesada para máquinas de trabalho que fazem o processamento. Este sistema levará a um ótimo tempo gasto configurando suas simulações em um sistema distribuído. Na Figura 9, demonstra-se como é a tela inicial ou Dashboard desta ferramenta.

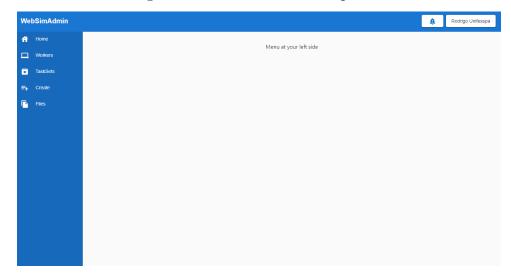


Figura 9 – Menu inicial do Dispatcher

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o ambiente inicial é composto apenas por algumas funcionalidades localizadas à esquerda do painel. Enquanto não é selecionado nenhuma opção o *Dispatcher* permanece nesta tela com uma mensagem de "Menu on your left". O menu lateral é organizado da seguinte forma:

- Home: uma funcionalidade que retorna para a tela inicial, demonstrada na Figura 9;
- Workers: são máquinas virtuais com recursos disponíveis que irão trabalhar na execução das simulações de maneira distribuída;
- Tasksets: é responsável por agrupar as tarefas que estão sendo ou foram executadas, canceladas e também é possível visualizar todas as tarefas de um modo geral. Seus estados são: executando, finalizado, cancelado e todas;
- Create: onde é gerado as simulações, é o ambiente de configuração que através dele é gerado os arquivos que ficarão alocados no Tasksets;
- Files: onde é submetido os arquivos xml (os cenários de simulação) e o simulador (com os algoritmos que serão utilizados).

4.4.3 Ferramentas de Tratamento de Arquivos

Para tratar os arquivos gerados na simulação foram utilizados dois softwares desenvolvidos em java, o $JsonReader^3$ e o $GnuplotONS^4$.

O *Jsonreader* faz o processamento dos arquivos *.json*, que são os arquivos baixados depois da simulação realizada no *Dispatcher*, bem como o cálculo das médias, desvio padrão e intervalos de confiança. Para obter os resultados deste tratamento é necessário passar um comando ou argumento para realizar este processamento. Abaixo na Tabela 2, é mostrado a linha de argumento para execução:

Tabela 2 – Linha de argumentos para executar o JsonReader.

Argumento para o JsonReader			
java -jar JsonReader.jar MHK SWH metroALEMA.xml			

É esperado como argumento para o *JsonReader* o diretório onde estão os arquivos, o nome do algoritmo em questão e o nome do arquivo xml.

O outro software também utilizado é o *GnuplotONS*, que recebe como entrada os arquivos .txt, esses arquivos são gerados como saída do software utilizado anteriormente, após receber os .txt como entrada, então, o *GnuplotONS* irá processá-los gerando script/arquivo gnuplot, que é executado e tem como saída final o gráfico com todos os resultados.

Para o *software* fazer a leitura dos arquivos é necessário passar também um comando. Abaixo na Tabela 3, segue o argumento para a execução:

Tabela 3 – Linha de argumentos para executar o GnuplotONS.

Argumento para o GnuplotONS			
java -jar GnuplotONS.jar MHK/M	IHK SWK/SWK		

Este comando segue basicamente a mesma lógica do anterior. É possível observar que existe uma duplicidade dentro do argumento (MHK/MHK SWK/SWK), isto ocorre porquê antes de ser utilizado o algoritmo *Jsonreader*, é necessário primeiramente organizar todos os dados que foram baixados do *Dispatcher*, tendo diretórios com os mesmos nomes dos algoritmos, e dentro desses diretórios as tabelas gerais com os cálculos das médias e intervalos de confiança, também com o mesmo nome do algoritmo, com como é mostrado na Figura 10 abaixo.

³O JsonReader está disponível em https://github.com/leiasousa/Jsonreader

⁴O GnuplotONS está disponível em https://github.com/leiasousa/GnuplotONS>.

> Este Computador > Downloads > Simulação3 >

MHK SWK

Figura 10 – Diretório de arquivos exportados do Dispatcher

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa organização é feita para que a simulação referente à cada algoritmo fique dentro de sua respectiva pasta. Quando utilizado o argumento, o *GnuplotONS* acessa o diretório da pasta e o arquivo .txt contido nela, ao executar o comando, todos os arquivos .txt são processados para a geração do script gnuplot, que será executado automaticamente para a geração do gráfico plotado.

4.5 Ambiente de Simulação

Foram realizadas simulações para avaliar o desempenho do MHK em comparação com o SWK. Em cada simulação foram geradas 10^5 requisições de conexão distribuídas uniformemente em 4 níveis de granularidade variando de 1 até 4 com passos de 12,5 Gb/s. O processo de chegada das chamadas segue a distribuição de *Poisson* com um tempo médio de retenção de 2 unidades de tempo e/ou *holding-time*, de acordo com uma distribuição exponencial negativa e uniformemente distribuída entre todos os pares de nós da rede metro ALEMÃ e rede USA, mostradas posteriormente.

As topologias consideradas nas simulações foram a USA Figura 11, apresentada em SOUSA; DRUMMOND, 2017 com 24 nós e 43 enlaces bidirecionais, e a topologia ALEMÃ (Figura 12) com 11 nós e 34 enlaces bidirecionais, (ABEDIFAR et al., 2018). As Figuras 11 e 12 apresentam a topologia bem como a distância entre cada nó dos enlaces em quilômetros. Essas topologias foram usadas para exemplificar dois cenários realistas, porém distintos, um representando dimensões continentais de tamanho (USA), com enlaces consideravelmente grandes, da ordem de 1000 KM, e nós com grau 4 em média, e outra com dimensões menores, de um país (ALEMÃ), possuindo nós altamente conectados. A largura de banda de cada slot considerada foi 12,5 GHz e foi assumido que cada enlace possui a capacidade de 320 slots. Assume-se uma banda de guarda de 2 slots. Cada nó na topologia é equipado com 32 transmissores e receptores sendo cada transmissor capaz de transmitir até 10 slots. A modulação considerada foi QPSK 2 bits por símbolo, o que significa que cada slot de 12,5 GHz tem capacidade de 25 Gbits.

Figura 11 – Topologia da rede USA

Fonte: Elaborado pelo autor.

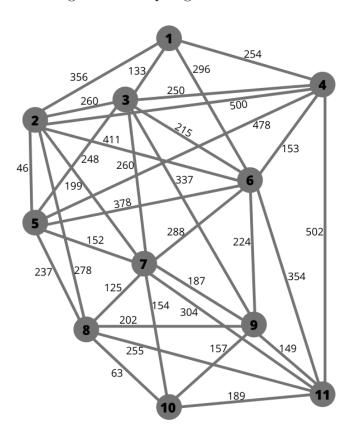


Figura 12 – Topologia da rede ALEM \tilde{A}

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Proposta Deste Trabalho

A principal proposta deste trabalho é a realização de simulações computacionais para avaliação de desempenho de redes ópticas metropolitanas baseadas em tecnologia de transporte EON. Para tanto foram realizados os seguintes passos:

Passo 1: levantamento da literatura do estado da arte. O principal objetivo foi reunir algumas soluções alternativas para o problema de engenharia de tráfego de alocação de recursos para as requisições, de modo a entender as principais estratégias de solução candidatas para serem adotadas como *benchmarks*. Nesta etapa do trabalho foram selecionados os algoritmos MHK e SWK, apresentados na Seção 4.1 e 4.2.

Passo 2: modelagem e implementação do cenário das ROM. Foram selecionadas as principais topologias de redes metro utilizadas na literatura científica para modelagem e implementação no ambiente de simulação computacional, garantindo a correlação das localizações dos nós e distâncias dos enlaces. As ferramentas de simulação permitem representar o mundo real de maneira lógica e realizar inúmeros experimentos a um baixo custo, principalmente se tratando de redes de comunicação que são ambientes sensíveis a erros e podem ser comprometidas facilmente com alguma mínima falha de manipulação em hardware (os equipamentos implementados na rede). Nesta fase do trabalho foi realizado um estudo para compreensão dos principais elementos de redes ópticas, seus funcionamentos, configurações de unidades de medida e correspondência em termos de capacidade espectral. As topologias escolhidas para implementação foram a topologia USA e Alemã, representadas na Figura 11 e 12, respectivamente.

Como se trata de uma rede metropolitana, os cenários precisaram representar a distribuição de tráfego de acordo com o modelo MSTM apresentado na Seção 2.9.4 do Capítulo 2. O modelo fornece os seguintes valores de carga para cada área, conforme mostrado na Tabela 4, com valores definidos por YAN et al., 2020

Tabela 4 – Percentual de excedente de carga por área.

\mathcal{T}	$\rho(CA)$	$\rho(RA)$	$\rho(OA)$
06h	0.4	0.3	0.1

Tais distribuições de tráfego obedeceu as seguintes segmentações de áreas nas topologias de rede:

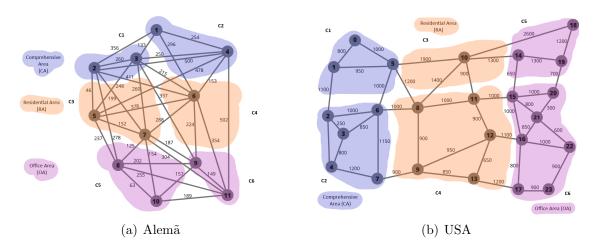


Figura 13 – Secção de áreas nas topologia (a) Alemã e na (b) USA.

A Tabela 4 apresenta os percentuais de excedentes de carga de tráfego por cada área seccionada na Figura 13(a) e 13(b), definidos adicionalmente ao tráfego geral. Isto significa que, em um dado momento onde a carga geral na rede é x, às 06h o carga será de 1.4x em CA, 1.3x em RA e 1.1x em OA. Além disso, ambas as topologias correspondem às características topológicas apresentadas em YAN et al., 2020 contendo 3 áreas, tendo cada uma delas 2 clusters por área.

Passo 3: Testes de cenários. Após implementados, os cenários de redes foram testados para ajuste no simulador. Os testes consistiram em verificação da ativação de cada nó e cada enlace, carregamento da topologia lógica ou caminhos ópticos na camada elétrica. Esta etapa do trabalho foi realizada com o Ferramenta ONS, apresentada na Seção 4.4.1.

Passo 4: Seleção das métricas e soluções algorítmicas. As soluções algorítmicas da literatura juntamente com as topologias de rede consideradas foram selecionadas e testadas localmente. Nesta etapa do trabalho verificou-se os possíveis ganhos que poderiam ser obtidos nas topologias atualmente implantadas e largamente utilizadas na literatura. As métricas de interesse desta pesquisa são:

- Taxa de bloqueio de requisições (BR)
- Taxa de bloqueio de largura de banda das requisições(BBR)
- Número de caminhos ópticos criados durante a simulação
- Número médio de saltos físicos por requisição

O BR e o BBR mostram o quão eficiente é a alocação de recursos para manter o sucesso das aplicações em ambiente com banda escassa. Já o número de caminhos ópticos criados, identificam a quantidade de caminhos totais que a rede possui. A média de saltos

físicos aos *links* percorridos(saltos) entre o nó origem e destino. Os resultados deste Passo 4 são apresentados no próximo capítulo.

Passo 5: Simulação computacional em lote e análise dos resultados. Os algoritmos testados através de simulação computacional local foram designados para a seleção em lote no despachador de simulações. Cada simulação será realizada 5 vezes utilizando o método de replicações independentes. Para a análise dos resultados será considerado o cálculo de 95% de confiabilidade. Pretende-se realizar 100.000 chamadas com origens e destinos distribuídos uniformemente dentro do subconjunto de localizações dos nós, dado que tem sido praticado na literatura mais recente. As ferramentas utilizadas nesta etapa foram descritas nas Subseções 4.4.2 e 4.4.3.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

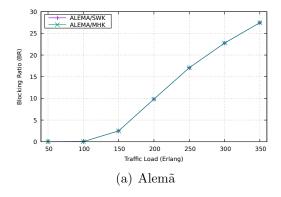
Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com a execução das simulações desenvolvidas com os algoritmos SWK e MHK. Diferentes métricas de desempenho de todas as políticas são mostradas com respeito à topologia USA, Figura 11 e Alemã, Figura 12. Além disso, os mesmos algoritmos são comparados em topologias diferentes, e os resultados das métricas de desempenho são mostrados na sequência.

5.1 Métricas de Desempenho nas Topologias Alemã e USA

Considerando os algoritmos MHK (Seção 4.1) e SWK (Seção 4.2) foram testados com os dois cenários de topologias definidos e os resultados são mostrados a seguir.

5.1.1 Probabilidade de Bloqueio (BR)

A Figura 14(a) e a Figura 14(b) demonstram o resultado de ambas as simulações das topologias distintas comparando a probabilidade de bloqueio das requisições (BR). Nota-se que há uma diferença na inicialização das cargas em cada gráfico apresentado. O BR na rede Alemã com cargas baixas inicia-se sem bloqueio, mostrado no Gráfico 14(a). Conforme a carga da rede aumenta o nível de bloqueio começa a crescer de forma mais ingrime, em comparação com o bloqueio na USA, Gráfico 14(b). Isso ocorre porquê as solicitações de requisições da rede aumentam e consequentemente os recursos disponíveis na rede diminuem (slots), penalizando as topologias que são mais conectadas, com alto grau de conectividade dos nós. Outra importante questão observada é que, em ambas as topologias de rede, o comportamento do MHK e SWK são semelhantes com respeito às configurações de cenários propostos, e por este motivo ocorre a sobreposição dos algoritmos no gráfico de resultados. Este comportamento será similar em outras métricas avaliadas, conforme será mostrado a seguir.



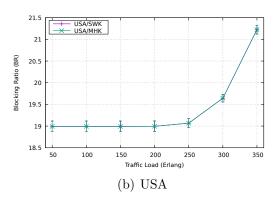


Figura 14 – Probabilidade de Bloqueio (BR) de requisições na topologia (a) Alemã e na (b) USA.

350

5.1.2 Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR)

Nesta próxima verificação, tem-se a probabilidade de bloqueio de largura de banda (BBR) das topologias Alemã e USA para os algoritmos MHK e SWK. As Figuras 15(a) e 15(b) demostram o resultados de ambas.

A Figura 15 apresenta a probabilidade de bloqueio da largura de banda da rede (BBR) das requisições que foram bloqueadas, mostradas anteriormente na Seção 5.1.1. Nesta análise o BBR desta simulação, com comportamento similar ao da taxa de BR, o BBR na topologia Alemã se mantém próximo de zero enquanto a carga na rede é menor ou igual a 100 *Erlangs*. Com esta mesma medida, na topologia USA o BBR é igual a 19%, demonstrando um índice de bloqueio elevado. Entretanto, com a carga máxima considerada, de 350 *Erlangs*, os algoritmos são muito piores na topologia Alemã do que na USA, com uma diferença de cerca de 5% de diferença percentual.

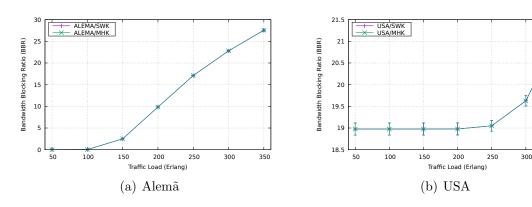


Figura 15 – Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) na na topologia (a) Alemã e na (b) USA.

5.1.3 Número Total de Caminhos Ópticos

A quantidade de caminhos ópticos ou *lightpath* criados para todas as requisições atendidas mostram a dimensão da topologia lógica gerada, isto é, a camada elétrica, gerada com a simulação. Este é o próximo passo de análise, e que apresenta medidas de importante relevância para o provedor de rede. Um algoritmo que consegue criar mais caminhos ópticos, consequentemente atende mais requisições. As topologias com mais nós admitem mais caminhos ópticos distintos. Em topologias com alto grau de nós, muitos caminhos são criados entre o mesmo par de origem e destino, mas a quantidade é limitada pelo número de receptores e transmissores disponíveis.

O resultado da comparação do número de caminhos ópticos é comparado e mostrado nos gráficos da Figura 16(a) e da Figura 16(b). São apresentados os gráficos dos caminhos ópticos ou *lightpaths* criados. Inicialmente são criados 10⁵ caminhos (esta quantidade foi definida no arquivo xml que é configurado inicialmente). Observa-se que, quando a carga da rede está em seu estado inicial, temos a disponibilidade de todos os

caminhos ópticos, a medida que a carga aumenta essa disponibilidade começa a diminuir. Essa tendência de diminuição ocorre devido ao aumento graduado na carga da rede, quanto maior for o tráfego, mais demandas, e devido a isso menos caminhos ópticos disponíveis. Em resumo, nos gráficos é possível perceber que, com 100% de disponibilidade de recursos, isto é, quando inicia a simulação, é possível criar tantos caminhos quanto forem as requisições que chegam na rede, como é o caso da topologia Alemã. Já na topologia USA, com uma carga de 50 *Erlangs*, a simulação atinge um número de 810.000 caminhos ópticos, o que indica a ocorrência de quase 2.000 caminhos ópticos bloqueados.

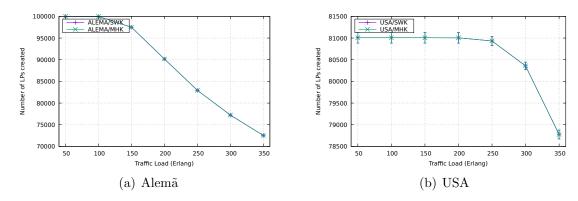


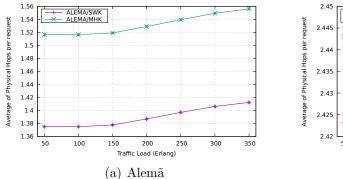
Figura 16 – Número de caminhos ópticos criados na topologia (a) Alemã e na (b) USA.

5.1.4 Tamanho dos Caminhos Ópticos Gerados

Sabendo que foi possível iniciar a simulação com o máximo de recurso disponível, é importante observar o tamanho médio dos caminhos ópticos gerados. Quanto maior o caminho, menor é a latência de atendimento das requisições. Quanto menor o caminho, maior a probabilidade deste caminho ter sido um dos menores selecionados e com recursos disponíveis, o que indica que a estratégia escolhida soube ponderar tamanho e disponibilidade de recursos.

Foi verificado o número médio de saltos nos caminhos selecionados para cada requisição, conforme mostra a Figura 17.

Quando uma requisição percorre um determinado número N de enlaces na rede até chegar ao nó de destino, defini-se que a requisição teve determinado número de saltos, conforme contabilizado na Figura 17. Tem-se os algoritmos MHK e SWK sendo avaliados, com resultados que mostram que o MHK teve média maior em relação a SWK. Mesmo sendo um algoritmo para encontrar a menor rota, o SWK encontra rotas com mais disponibilidade de recursos do que o MHK, que não olha para o número de slots disponíveis, mas apenas para o tamanho e/ou número de enlaces. O SWK usa de sua política de rota menos carregada e por sua vez nessa representação as rotas selecionadas também haviam menos saltos em cada nó de origem e destino.



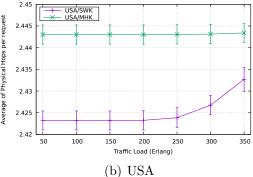


Figura 17 – Média de saltos físicos dos caminhos ópticos por requisição na topologia (a) Alemã e na (b) USA.

A média de saltos na topologia virtual indica quantos caminhos ópticos foram utilizados para atender às demandas de tráfego. Isto está diretamente relacionado ao número de SBVTs utilizados na solução. Logo o algoritmo SWK utiliza menos SBVTs em relação a MHK.

5.1.5 Taxa de Espectro Óptico Disponível

Cada enlace da topologia física da rede foi configurado com o número de 320 slots de frequência, os quais são selecionados para atender as demandas de requisição. Além disso, um número muito limitado de 32 transmissores e receptores foi configurado em cada nó da rede. O gráfico da Figura 18 mostra o resultado da disponibilidade de espectro ao final da simulação. O resultado indica que ao inicio da simulação a disponibilidade de slot ainda é total e conforme aproxima-se do fim do tráfego da rede essa disponibilidade diminui gradativamente. Isso ocorre devido ao aumento da taxa de tráfego da rede, logo a demanda de requisição (slot) aumenta também. Na topologia Alemã os algoritmos têm comportamento potencialmente diferentes em comparação com a topologia USA. Com a carga mais alta testada, o algoritmo MHK é cerca de 1% mais eficiente do que o SWK na topologia Alemã. Ambos os algoritmos tem desempenho similar na topologia USA com queda acentuada e uniforme na disponibilidade de espectro.

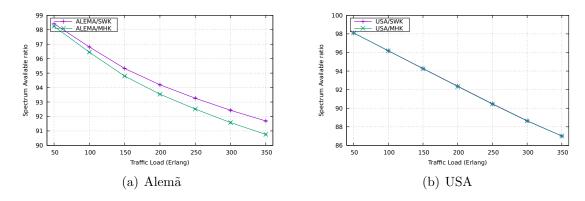


Figura 18 – Taxa de espectro óptico disponível na topologia (a) Alemã e na (b) USA.

Em geral ambos os algoritmos obtiveram resultados similares, dessa maneira, optou-se por comparar o mesmo algoritmo em topologias diferentes. Assim, o SWK é destacado na Seção 5.2, enquanto o MHK é abordado na Seção 5.3 a seguir.

5.2 Métricas de Desempenho do Algoritmo SWK

A partir desta seção é avaliado o comportamento do algoritmo SWK separadamente, baseado nas duas topologias distintas, isto é, topologia Alemã e USA, (ABEDIFAR et al., 2018; SOUSA; DRUMMOND, 2017).

5.2.1 Probabilidade de Bloqueio (BR) do SWK

A Figura 19 destaca a avaliação da probabilidade de bloqueio das duas topologias, porém desta vez a avaliação é referente a apenas um algoritmo de roteamento. A Figura 19 refere-se à probabilidade de bloqueio do algoritmo SWK em comparação as topologias Alemã e USA. Nesta relação temos que a margem de bloqueio na rede Alemã chega a um nível elevando de acordo com a carga da rede cresce e a torna cada vez menos eficiente conforme os recursos (slot) diminuem. Em contrapartida a rede USA tem bloqueio de requisições logo em seu início e levando-a quase que linearmente até o fim do tráfego, isso mostra que a política do algoritmo SWK é ineficaz para a rede USA com a quantidade de recurso (slot) atual. É necessário expandir para atender tais requisições, e diminuir o nível de bloqueio em ambas as redes. Este resultado indica que as políticas de alocação de recurso precisam ser pensadas considerando as particularidades dessas topologias. Não é possível considerar uma única heurística para qualquer tipo de topologia metro.

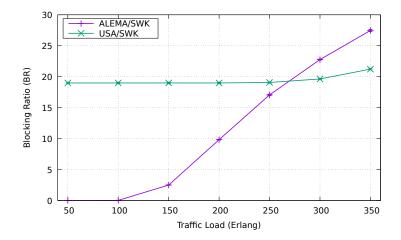


Figura 19 – Probabilidade de Bloqueio (BR) do SWK em duas topologias distintas.

5.2.2 Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BRR) do SWK

Na Figura 20 temos resultados similares ao gráfico anterior. Como esperado, poucos recursos geram muitos bloqueios disponíveis para atender mais requisições. É necessário diminuir a taxa de bloqueio, bem como é necessário aumentar os recursos da rede para alocar mais *slots*.

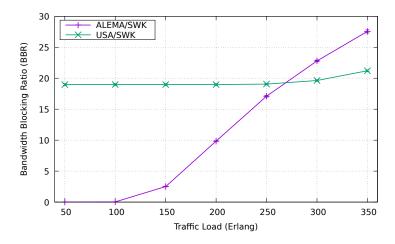


Figura 20 – Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) do SWK em duas topologias distintas.

5.2.3 Número de Caminhos Ópticos Gerados com o SWK

Os números de caminhos ópticos (*lightpaths*) mostrado no gráfico da Figura 21 mostra que a rede Alemã ao iniciar a simulação, possui todos os caminhos criados disponíveis, e conforme há o aumento na carga da rede, essa disponibilidade diminui, o que já não acontece na rede USA. Há um considerável número de caminhos que deixam de ser criados na USA, o que contribui drasticamente com a taxa de bloqueio geral, conforme a carga na rede vai aumentando, até que se chegue ao fim da simulação na rede.

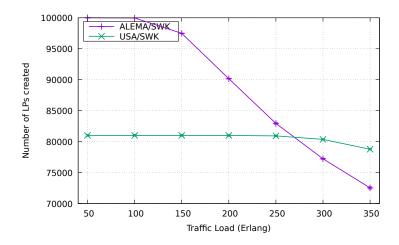


Figura 21 – Número de caminhos ópticos criados pelo SWK em duas topologias distintas.

5.3 Métricas de Desempenho do Algoritmo MHK

As avaliações do algoritmo MHK separadamente, baseado nas duas topologias distintas, isto é, topologia Alemã e USA, (ABEDIFAR et al., 2018; SOUSA; DRUMMOND, 2017), são apresentados os resultados a seguir.

5.3.1 Probabilidade de Bloqueio (BR) do MHK

Como na Seção 5.1.1 foi percebido que o algoritmo SWK e MHK tinham os mesmos comportamentos, é esperado que nesta seção os resultados sejam similares aos apresentado na Seção 5.2.

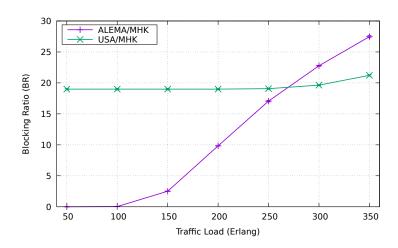


Figura 22 – Probabilidade de Bloqueio (BR) do MHK em duas topologias distintas.

5.3.2 Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) do MHK

A próxima medição de desempenho é sobre a taxa de bloqueio da largura de banda (BBR). O gráfico da Figura 23, mostra que tanto na taxa de bloqueio de requisição (BR) quanto na taxa de bloqueio da largura de banda (BBR), os níveis de bloqueio são os

mesmos, e para melhorar essas estatísticas o ideal é alocar mais recursos. Em ambas as topologias a configuração é de que o total de *slots* seja de 320, e cada nó da rede possui 32 BVTs com capacidade de 10 *slots*, gerando assim uma inconsistência na quantidade de necessária que a rede deveria possuir. Assim, as medidas indicam que, aumentar o número de BVTs disponíveis irá levar aos melhores resultados para a melhoria de desempenho.

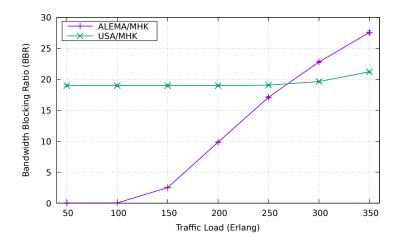


Figura 23 – Probabilidade de Bloqueio de Largura de Banda (BBR) do MHK em duas topologias distintas.

5.3.3 Número de Caminhos Ópticos Gerados com o MHK

A Figura 24 apresenta a comparação do número de caminhos ópticos (*lightpaths*) criados em ambas as topologias.

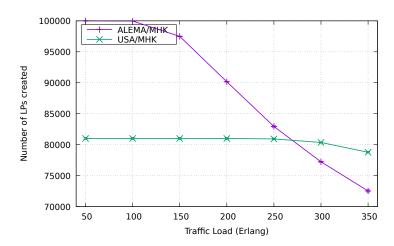


Figura 24 – Número de caminhos ópticos criados pelo MHK em duas topologias distintas.

Nesta simulação, os caminhos ópticos (*lightpaths*) criados na rede Alemã pelo algoritmo MHK sofre uma grande diminuição conforme aproxima-se do fim do limite de carga de trafego atribuído na rede, ao comparar com a rede USA, pode-se observar que esta, quase não sofre alteração, porem a quantidade de caminhos criados é inferior e permanece boa parte do tráfego sem alteração.

5.4 Resumo Conclusivo

Este Capítulo 5 apresentou os principais resultados e achados dos experimentos realizados. Foram comparados dois algoritmos RSA básicos, denominados SWK e MHK, com duas topologias distintas, sendo elas a Alemã e a USA, contundentes na literatura de rede ópticas.

Para redes metropolitas de extensões elevadas, como a rede USA, é necessário que tenha um valor elevado de recursos disponíveis na rede, em boa parte das simulações esta definição ficou clara, pois a quantidade de recursos para esta topologia se mostrou insuficiente gerando bloqueio.

Na rede Alemã, os resultados obtiveram melhor desempenho em relação a rede USA. Ambas têm as mesmas quantidades de recursos, porém, por ser tratar de uma rede de menor porte, ela se dispõe de uma vantagem por possuir nós mais conectados na rede, logo a uma distribuição de recursos mais eficiente.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma abordagem de algoritmos RSA distintos, abordando diferentes políticas de seleção de enlaces, para atender as demandas de requisições. O trabalho focou na implementação de cenários clássicos de rede pra a realização de testes com os algoritmos MHK e SWK. Os cenários de rede implementados considerados levam em conta a distribuição desigual do tráfego em cada área da rede metropolitana. Assim, o modelo de tráfego de marés denominado *MultiStep Trigonometric Model* (MSTM) para redes ópticas metro-elásticas é aproveitado para definir a quantidade de tréfego em cada área e em um determinado horário distinto. O MSTM divide a cidade em três tipos de áreas (área comercial/de escritórios, área residencial e área compreensiva/abrangente) e define as tendências de tráfego para diferentes períodos de tempo.

A partir deste estudo, as principais contribuições são:

- Até o presente estudo, não haviam sido identificadas na literatura nenhum estudo com as topologias de referência, Alemã e USA, considerando o modelo MSTM.
- O presente estudo possibilitou um levantamento do atual estado das redes metro paraenses públicas, ajudando a identificar a falta de fontes bibliográficas para a realização de estudos como este.

Desta maneira, as principais conclusões são:

- Redes mais conectadas, isto é, com nós de maior grau, em geral performam melhor do que as topologias com menor conectividade de nós. Este é um bom resultado que indica que os nós na rede metro podem realizar muito mais conexões.
- Os RSAs testados são diferentes apenas na política que elegem para ordenar os
 K caminhos selecionado. Como os resultados obtidos são muito similares em cada
 topologia, isto abre espaço para a proposição de muitas outras soluções mais bem
 elaboradas.

Com essas considerações, ficam destacados como trabalhos futuros as seguintes questões:

- O presente trabalho considerou requisições de tráfego genérico. É necessário, no futuro, investigar o comportamento da distribuição do tráfego para aplicações de vídeo e/ou de sincronização de dados. Olhar para aplicações específicas ajudam a entender como é o comportamento dos algoritmos para cada aplicação específica.
- As topologias simuladas consideraram três áreas e dois *clusters*, por área. Entretanto, cada área metropolitana possui características únicas. Assim, é necessário investigar

outros valores de combinação de clusters e quantidade de áreas. Essas questões são fundamentais para determinar como será a distribuição do tráfego em cada região e/ou nó da rede, em horários específicos.

REFERÊNCIAS

- ABEDIFAR, V. et al. Routing, modulation, and spectrum assignment in programmable networks based on optical white boxes. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 10, n. 9, p. 723–735, 2018.
- ALMEIDA, G. S. d. et al. Expansão da capacidade de transmissão de sistemas ópticos através da tecnologia wdm: um estudo de caso sobre o sistema da eletronorte. Universidade Federal do Pará, 2011.
- ALOO. Afinal, o que é backbone e quais as vantagens para a sua empresa? **Tendências**, 2020. Disponível em: https://blog.aloo.com.br/o-que-e-backbone/>.
- BENAYON, E. R. et al. Roteamento e alocação de comprimento de onda em redes wdm segundo algoritmo baseado em regras da natureza. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2012.
- CANDIA, M. P. L. de. Heurística para alocação de espectro em redes ópticas elásticas baseada em medidas de fragmentação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2014.
- CHATTERJEE, B. C.; OKI, E. Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design, Control, and Management: Fundamentals, Design, Control, and Management. [S.l.]: CRC Press, 2020.
- CORMEN, T. H. et al. Introduction to algorithms. [S.l.]: MIT press, 2022.
- COSTA, L. R. Eficiência energética em redes óticas elásticas. **Universidade de Brasília**, 2021.
- COSTA, L. R.; DRUMMOND, A. C. Novo algoritmo rmlsa com roteamento multihop em redes ópticas elásticas. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2016.
- ELETRONORTE. Vantagens do cabo opgw. **Artigos e Notícias**, 2021. Disponível em: https://www.eletronet.com/vantagens-do-cabo-opgw/>.
- FONTES, M. F. et al. Roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas via algoritmo genético. In: FERNANDES, B. J. T.; {Pereira Júnior}, A. (Ed.). **Anais do 14 Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional**. Curitiba, PR: ABRICOM, 2019. p. 1–8. ISBN 978-856997201-3.
- FONTINELE, A. et al. Alocação de espectro com redução de interferências entre circuitos em redes ópticas elásticas. In: SBC. Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. [S.l.], 2018. p. 561–574.
- GUSMÃO, R. P. d. et al. O uso de metaheurísticas aplicadas ao problema de alocação de espectro e rota em redes ópticas elásticas. Universidade Federal da Paraíba, 2014.
- HADI, M.; PAKRAVAN, M. R.; AGRELL, E. Dynamic resource allocation in metro elastic optical networks using lyapunov drift optimization. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 11, n. 6, p. 250–259, 2019.

- IFPA, I. F. d. P. Assinatura de act garante expansão da rede de fibra no estado. **Notícias IFPa**, 2019. Disponível em: https://dti.ifpa.edu.br/component/content/article?id=324.
- JR, A. C. S. Redes celulares 5g e desenvolvimento nacional. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, v. 8, n. 2, p. 35–42, 2018.
- LÓPEZ, V.; VELASCO, L. et al. Elastic optical networks. Architectures, Technologies, and Control, Switzerland: Springer Int. Publishing, Springer, 2016.
- LUCH, I. D. et al. Vibration sensing for deployed metropolitan fiber infrastructure. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 39, n. 4, p. 1204–1211, 2021.
- MIRANDA, M. et al. Transferências de dados em massa sensíveis ao consumo energético em redes Ópticas elásticas. In: **Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 501–514. ISSN 2177-9384. Disponível em: https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7382.
- MIRANDA, M. H. R. Transferências de dados em massa sensíveis ao consumo energético em redes ópticas elásticas. 2019.
- MORELLATO, F. Filtro WDM (Wavelength Division Multiplexing). 2019. Disponível em: https://www.blog.ipv7.com.br/tecnica/filtro-wdm-wavelength-division-multiplexing/.
- MOTTA, M. Topologia dos backbones de internet no brasil. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- MUÑOZ, R. et al. Experimental demonstration of dynamic optical beamforming for beyond 5g spatially multiplexed fronthaul networks. **IEEE Journal of Selected Topics** in **Quantum Electronics**, IEEE, v. 27, n. 6, p. 1–16, 2021.
- NASCIMENTO, J. C. d. Projeto integrado de redes ópticas de longa distância e Metropolitanas usando algoritmos de inteligência computacional: estudo de caso para o estado de Pernambuco. Dissertação (B.S. thesis) Brasil, 2017.
- OLIVEIRA, H.; FONSECA, N. Proteção em redes Ópticas elásticas com multiplexação espacial. In: **Anais Estendidos do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 161–168. ISSN 2177-9384. Disponível em: https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc_estendido/article/view/7783.
- PAN, B. et al. Performance assessment of a fast optical add-drop multiplexer-based metro access network with edge computing. **Journal of Optical Communications and Networking**, Optical Society of America, v. 11, n. 12, p. 636–646, 2019.
- POLICARPO, D. et al. **Tecnologias de multiplexações ópticas-WDM**. [S.l.]: Artigo, 2010.
- PUHLMANN, H. **Multiplexação DWDM em fibras ópticas**. 2015. Disponível em: https://www.embarcados.com.br/multiplexacao-dwdm-em-fibras-opticas/#Multiplexacao-WDM.

- SANTOS, **WDM** ela Μ. 0 que é \mathbf{a} tecnologia \mathbf{e} como transmissão pode otimizar de \mathbf{um} provedor. 2021. Disponível https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/ em: o-que-e-a-tecnologia-wdm-e-como-ela-pode-otimizar-a-transmissao-de-um-provedor/
- SHARMA, S. K. D. Network blocking probability based evaluation of spectrum fragmentation in elastic optical networks. **International Journal of Computer Sciences and Engineering**, v. 6, p. 1353–1362, 7 2018. ISSN 2347-2693. Disponível em: https://www.ijcseonline.org/full_paper_view.php?paper_id=2612>.
- SHIRAKI, R. et al. Design and control of highly spectrally efficient photonic networks enabled by fiber-granular routing on overlaid ring-shaped topologies. **Journal of Optical Communications and Networking**, Optical Society of America, v. 13, n. 11, p. 233–243, 2021.
- SILVA, L. S. d. S. Antônio Rodrigo da Silva e. Roteamento e alocação de espectro aplicados à infraestrutura das redes Ópticas metropolitanas paraenses. **IV Congresso de Tecnologia e Desenvolvimento da Amazônia (CTDA)**, v. 1, n. 1, p. 95–96, 2021.
- SOUSA, L. de; COSTA, L. R.; DRUMMOND, A. Solução ciente da Área para alocação de recursos em redes Ópticas metropolitanas. In: **SBRC 2022 ()**. [S.l.: s.n.], 2022.
- SOUSA, L. de; COSTA, L. R.; DRUMMOND, A. Solução ciente da Área para alocação de recursos em redes Ópticas metropolitanas. In: **SBRC 2022** (). [s.n.], 2022. Disponível em: http://XXXXX/222330.pdf.
- SOUSA, L. S. de; DRUMMOND, A. C. Provendo múltiplas transferências de dados em massa com roteamento e alocação de espectro ciente da aplicação em redes ópticas elásticas. In: SBC. **Anais do XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. [S.l.], 2017.
- TELIUM. Afinal, o que é backbone em ti? **Artigos e Notícias**, 2018. Disponível em: https://www.telium.com.br/blog/afinal-o-que-e-backbone-em-ti.
- TROIA, S. et al. Identification of tidal-traffic patterns in metro-area mobile networks via matrix factorization based model. In: IEEE. **2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)**. [S.l.], 2017. p. 297–301.
- VIANA, M. Redes Ópticas favorece crescimento exponencial da banda larga. **Artigos e Notícias**, 2021. Disponível em: https://www.eletronet.com/vantagens-do-cabo-opgw/>.
- XAVIER, A. V. S. Roteamento e proteção dedicada em redes ópticas usando inteligência computacional. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- YAN, B. et al. Area-aware routing and spectrum allocation for the tidal traffic pattern in metro optical networks. **IEEE Access**, v. 8, p. 56501–56509, 2020.
- YEN, J. Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. **management Science**, Informs, v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971.