



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

IALLEN GÁBIO DE SOUSA SANTOS

Soluções para Alocação de Recursos e Planejamento em Redes Ópticas Elásticas

Recife
2021

IALLEN GÁBIO DE SOUSA SANTOS

Soluções para Alocação de Recursos e Planejamento em Redes Ópticas Elásticas

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências da Computação.

Área de Concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Orientador: José Augusto Suruagy Monteiro

Coorientador: André Castelo Branco Soares

Recife
2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da S. Portes, CRB4-1217

S237s Santos, Iallen Gábio de Sousa
Soluções para alocação de recursos e planejamento em redes ópticas elásticas / Iallen Gábio de Sousa Santos. – 2021.
112 f.: il., fig., tab.

Orientador: José Augusto Suruagy Monteiro.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2021.

Inclui referências e apêndices.

1. Redes de computadores. 2. Sistemas distribuídos. 3. Redes ópticas. I. Monteiro, José Augusto Suruagy (orientador). II. Título.

004.6 CDD (23. ed.) UFPE - CCEN 2022-31

Iallen Gábio de Sousa Santos

“Soluções para Alocação de Recursos e Planejamento em Redes Ópticas Elásticas”

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciência da Computação. Área de Concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Aprovado em: 19/11/2021.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto Suruagy Monteiro

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Djamel Fawzi Hadj Sadok
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Paulo Romero Martins Maciel
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. André Costa Drummond
Departamento de Ciência da Computação / UnB

Prof. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior
Departamento de Eletrônica e Sistemas / UFPE

Prof. Dr. William Ferreira Giozza
Departamento de Engenharia Elétrica / UnB

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo meu propósito de vida, não faço isto por mera tradição ou ato religioso mas por reconhecer a sua eternidade e benignidade. Agradeço minha amada esposa Raíla por estar ao meu lado em todos os momentos desta e de outras jornadas. Agradeço a meus pais (Gesiel e Gislene) e demais familiares por me apoiarem e incentivarem durante todas as etapas percorridas. Agradeço aos meus colegas de trabalho do IFPI, especialmente os professores do eixo de informática dos campi São Raimundo Nonato e Piripiri que me deram suporte durante o período que passei de licença para capacitação. Agradeço aos amigos do Piauí que sempre torceram por mim desde que parti para iniciar esta formação e aos novos amigos que fiz em Pernambuco que me acolheram durante este período, vocês certamente serão sempre lembrados. Também agradeço aos colegas de pesquisa Alexandre e Jurandir com os quais tive o prazer de desenvolver diversos trabalhos em parceria, além das programações extras durante as viagens para congressos. Não poderia deixar de agradecer ao meu coorientador, professor André Soares pelos ensinamentos e a parceria que vem desde a iniciação científica. Por fim, agradeço ao meu orientador, professor Suruagy pela excelente supervisão e orientação durante todo o curso.

RESUMO

As *Elastic Optical Networks* (EONs) utilizam a fibra óptica como meio de transmissão de dados e dividem o espectro óptico em porções denominadas *slots* que por sua vez podem ser combinados para a criação de circuitos ópticos com diferentes larguras de banda. Esta flexibilidade permite melhor aproveitamento dos recursos espectrais quando comparadas com as redes ópticas com grade fixa. A implementação das EONs traz alguns desafios como: o dimensionamento e distribuição de *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs), soluções para o problema *Routing, Modulation and Spectrum Allocation* (RMSA) e soluções para agregação de tráfego. O objetivo deste trabalho é propor soluções para estes desafios com foco na redução do Bloqueio de Banda (BB) e o consumo de recursos na rede. Neste contexto, foram propostas as seguintes soluções: *Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization* (FNBN), *K Balanced Paths* (KBP), *Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph* (MTGAG), *Weight Adjustment with Multilayer Perceptron Network* (WAMPLP), *Weight Adjustment with Simulated Annealing* (WASA) e *Spectrum Spacing for Traffic Grooming* (SSTG). O FNBN ataca o problema de dimensionamento e distribuição de BVTs, o KBP é uma solução para roteamento, portanto ataca o problema RMSA, as soluções MTGAG, WAMPLP, WASA e SSTG atacam o problema de agregação de tráfego. As soluções propostas foram comparadas à propostas encontradas na literatura. De maneira geral, os experimentos mostram que as soluções propostas promovem redução no BB o que por sua vez significa maior capacidade de atendimento às demandas dos clientes. Além disso, as propostas também apresentam melhor desempenho que as demais soluções sob outras métricas de avaliação de desempenho como: Taxa de requisições atendidas Por Circuito (RPC), Eficiência Energética (EE), Número de BVTs Implantados (NBI) e Fragmentação Externa (FE).

Palavras-chaves: redes ópticas elásticas; EON; RMSA; agregação de tráfego; planejamento de redes.

ABSTRACT

Elastic Optical Networks (EONs) are pointed out as a promising technology to replace the current optical networks based on *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) in the backbones of transport networks. Compared to traditional fixed-grid optical networks, EONs allow better use of spectral resources. The implementation of EONs brings new challenges and updates some that already exist in fixed-grid optical networks, including the adjustment of the quantity and location of the *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs), solutions to the *Routing, Modulation and Spectrum Allocation* (RMSA) problem, and solutions for traffic grooming. In this work, these problems were investigated and the following solutions were proposed: *Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization* (FNBN), *K Balanced Paths* (KBP), *Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph* (MTGAG), *Weight Adjustment with Multilayer Perceptron Network* (WAMPLP), *Weight Adjustment with Simulated Annealing* (WASA), and *Spectrum Spacing for Traffic Grooming* (SSTG). The proposed solutions were compared to proposals found in the literature. In general, the experiments show that the proposed solutions promote a reduction in Bandwidth Blocking Ratio, which in turn means greater capacity to meet customer demands. In addition, the proposals also perform better than other solutions under other performance evaluation metrics such as Request-Lightpath Ratio, Energy Efficiency, Deployed BVTs, and Spectrum Fragmentation.

Keywords: elastic optical networks; EON; RMSA; traffic grooming; network planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença da alocação de espectro em uma rede WDM com grade fixa e em uma EON.	18
Figura 2 – Problemas de alocação de recursos e planejamento em EONs abordados neste trabalho.	19
Figura 3 – Modelo de BV-WXC e BVTs.	23
Figura 4 – Representação do plano de controle e interação entre algoritmos de alocação de recursos e gerência de rede.	25
Figura 5 – Possível rota entre os nós A e B.	29
Figura 6 – Slots de espectro contínuos e contíguos.	31
Figura 7 – Possibilidade de expansão do circuito C1.	31
Figura 8 – BB alcançada com o KBP-Firstfit em cada iteração do KBP tuning. . .	38
Figura 9 – Topologia de rede com circuitos estabelecidos e grafo auxiliar correspondente.	45
Figura 10 – Passos do WAMLP.	47
Figura 11 – Circuitos alocados de duas formas diferentes.	53
Figura 12 – Representação gráfica das iterações do algoritmo guloso para ajuste do σ	56
Figura 13 – Modelagem de EON utilizada no simulador de eventos discretos do SNetS. .	59
Figura 14 – Densidade populacional dos Estados Unidos e topologia NSFNet. . . .	69
Figura 15 – Topologias Pacific Bell e R6TNet.	73
Figura 16 – Bloqueio de banda alcançado com o KBP, KSP_d e KSP_h	75
Figura 17 – Decomposição do bloqueio de banda com o KBP, KSP_d e KSP_h sob carga 248 Erlangs.	76
Figura 18 – Nível de injustiça no atendimento à requisições com diferentes taxas de transmissão obtido com o KBP, KSP_d e KSP_h	76
Figura 19 – Nível de injustiça no atendimento à requisições com diferentes origens e destinos obtido com o KBP, KSP_d e KSP_h	77
Figura 20 – Potência de consumo energética obtida com o KBP, KSP_d e KSP_h . . .	77
Figura 21 – Bloqueio de banda atingido com o FNBN e o BED sem a utilização de agregação de tráfego em função no número total de BVTs distribuídos na rede.	79
Figura 22 – Bloqueio de banda atingido com o FNBN e o BED com agregação de tráfego em função no número total de BVTs distribuídos na rede. . . .	80
Figura 23 – Quantidade de BVTs necessários para atingir os limiares de tolerância para a BB_{ab} sem agregação de tráfego.	80
Figura 24 – Quantidade de BVTs necessários para atingir os limiares de tolerância para BB_{ab} com agregação de tráfego.	81

Figura 25 – Potência de consumo energético alcançada com o FNBN e o BED res- peitando o limiar de $BB_{ab} L = 0,0025$	81
Figura 26 – Bloqueio de banda atingido pelas políticas de agregação de tráfego em função da carga na rede.	84
Figura 27 – Potência de consumo energético alcançada pelas políticas de agregação de tráfego em função da carga na rede.	85
Figura 28 – Fragmentação externa alcançada pelas políticas de agregação de tráfego em função da carga na rede.	86
Figura 29 – Média de requisições atendidas por circuito alcançada pelas políticas de agregação de tráfego em função da carga na rede.	87
Figura 30 – Decomposição do bloqueio de banda em função do σ na topologia NSF- Net com a política MS e carga 1820 Erlangs.	88
Figura 31 – Média de requisições atendidas por circuito alcançada pelos mecanis- mos de potencialização de agregação de tráfego em cada um dos cenários estudados.	89
Figura 32 – Bloqueio de banda atingido pelos mecanismos de potencialização de agregação de tráfego em cada um dos cenários estudados.	90
Figura 33 – Eficiência energética alcançada pelos mecanismos de potencialização de agregação de tráfego em cada um dos cenários estudados.	91
Figura 34 – Número necessário de BVTs implantados alcançado pelos mecanismos de potencialização de agregação de tráfego em cada um dos cenários estudados.	92
Figura 35 – Topologia NSFNet.	107
Figura 36 – Blocking probability values to simulations with SNetS and the model proposed in (WAN; HUA; ZHENG, 2012).	108
Figura 37 – Exemplo de configuração do arquivo <i>network</i>	109
Figura 38 – Exemplo de configuração do arquivo <i>traffic</i>	110
Figura 39 – Exemplo de configuração do arquivo <i>physicalLayer</i>	111
Figura 40 – Exemplo de configuração do arquivo <i>others</i>	111
Figura 41 – Exemplo de configuração do arquivo <i>simulation</i>	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algoritmos de roteamento utilizados em trabalhos da literatura para <i>Elastic Optical Networks</i> (EONs)	35
Tabela 2 – Pesos associados aos enlaces para criação das K rotas nos algoritmos KSP_h , KSP_d e KBP	36
Tabela 3 – Disponibilidade de BVTs por nó considerada em trabalhos que abordam EON com tráfego dinâmico.	39
Tabela 4 – Comparação de ferramentas de simulação em termos de implementação e usabilidade.	60
Tabela 5 – Modelos implementados nas ferramentas de simulação.	61
Tabela 6 – Métricas de avaliação de desempenho disponíveis nas ferramentas de simulação.	61
Tabela 7 – Limiar de <i>Signal to Noise Ratio</i> (SNR) aceitável para cada formato de modulação.	63
Tabela 8 – Potência de consumo e eficiência energética de um único <i>Bandwidth Variable Transponder</i> (BVT) por slot utilizado com diferentes formatos de modulação.	64
Tabela 9 – Modelo de tráfego adotado em trabalhos da literatura.	67
Tabela 10 – Soluções, topologias e distribuição de tráfego consideradas em cada estudo de avaliação de desempenho.	72
Tabela 11 – Parâmetros de camada física utilizados em todos os experimentos . . .	74
Tabela 12 – Cenários avaliados no estudo de avaliação de desempenho 3.	82
Tabela 13 – Soluções do MTGAG <i>tuning</i> encontradas pelas políticas WMLP e WASA.	82
Tabela 14 – Parâmetros configurados nas soluções WASA e WMLP	83
Tabela 15 – Especificações da máquina utilizada para realizar as simulações. . . .	86
Tabela 16 – Valores de σ ajustados para cada cenário	89
Tabela 17 – Problemas abordados e soluções propostas.	95
Tabela 18 – Redução no BB promovida pelo KBP em relação ao melhor entre KSP_h e KSP_d em cada solução RMSA.	96
Tabela 19 – Redução no número de BVTs implantados (NBI) promovida pelo FNBN em relação ao BED de acordo com a carga e o limiar de BB_{ab}	97
Tabela 20 – Redução no BB promovida pelas políticas adaptativas em relação às demais políticas avaliadas em cada um dos cenários abordados.	97
Tabela 21 – Redução na BB promovida pelo mecanismo SSTG em relação aos mecanismos SRLP, SRNP e o GRMSA tradicional.	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BB	Bloqueio de Banda
BB_{ab}	Bloqueio de Banda devido à Ausência de BVTs
BB_{ars}	Bloqueio de Banda devido à Ausência de Recursos Espectrais
BB_f	Bloqueio de Banda devido à Fragmentação
BB_{got}	Bloqueio de Banda devido à baixa QoT
BED	<i>BVTs Evenly Distributed</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BR	Bloqueio de Requisições
BV-SSS	<i>Bandwidth Variable Spectrum Selective Switch</i>
BV-OXC	<i>Bandwidth Variable Optical Cross Connect</i>
BVT	<i>Bandwidth Variable Transponder</i>
CapEx	<i>Capital Expenditure</i>
CEONS	<i>Complex Elastic Optical Network Simulator</i>
EC	Energia Consumida
EE	Eficiência Energética
EON	<i>Elastic Optical Network</i>
EONS	<i>Elastic Optical Network Simulator</i>
FE	Fragmentação Externa
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FNBN	<i>Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization</i>
FWDM	<i>Flexible Optical Wavelength Division Multiplexing</i>
GR	Gerador de Requisições
IJ_{OD}	Injustiça no atendimento a requisições com diferentes Origens e Destinos
IJ_{Tr}	Injustiça no atendimento a requisições com diferentes Taxas de transmissão
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
KBP	<i>K Balanced Paths</i>
KSP	<i>K-Shortest Paths</i>

KSP-RQoTO	<i>K-Shortest Path with Reduction of QoTO</i>
KSP-PP	<i>K-shortest path routing with path-priority</i>
KSP_d	<i>KSP distance</i>
KSP_h	<i>KSP hops</i>
MLP	<i>Multilayer Perceptron Network</i>
MPH	<i>Minimizing the number of Physical Hops</i>
MS	<i>Minimal Spectrum consumption</i>
MTGAG	<i>Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph</i>
MVH	<i>Minimizing the number of Virtual Hops</i>
NB	Número de BV-SSSs
NBI	Número de BVTs Implantados
NF	<i>Noise Figure</i>
NMTP	Número Máximo de Transceivers em Potencial
NNIT	Distribuição Não uniforme entre os Nós e Inversamente proporcional entre as Taxas de transmissão
NS	Número de Splitters
NSFNet	<i>National Science Foundation Network</i>
OEO	Óptico-Eletro-Óptico
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
ONS	<i>Optical Network Simulator</i>
OpEx	<i>Operational Expenditure</i>
PCE	Potência de Consumo Energético
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QoT	<i>Quality of Transmission</i>
RMSA	<i>Routing, Modulation and Spectrum Allocation</i>
RPC	Taxa de requisições atendidas Por Circuito
RSA	<i>Routing and Spectrum Allocation</i>
SAT	Solução de Agregação de Tráfego
SBVT	<i>Sliceable Bandwidth-Variable Transponder</i>
SCI	<i>Self-Channel Interference</i>
SDEON	<i>Software-Defined Elastic Optical Networks</i>
SimEON	<i>Simulator for Elastic Optical Networks</i>

SLA	<i>Service-Level Agreement</i>
SLICE	<i>Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network</i>
SNetS	<i>Slice Network Simulator</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SPF	<i>Shortest Path First</i>
SR	<i>Spectrum Reservation</i>
SRLP	<i>Spectrum Reservation for each Light Path</i>
SRNP	<i>Spectrum Reservation for each Node Pair</i>
SSTG	<i>Spectrum Spacing for Traffic Grooming</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
UB	Utilização de BVTs
UE	Utilização do Espectro
UNIT	Distribuição Uniforme entre os Nós e Inversamente proporcional entre as Taxas de transmissão
WAMPLP	<i>Weight Adjustment with Multilayer Perceptron Network</i>
WASA	<i>Weight Adjustment with Simulated Annealing</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
Wh	Watts-hora
XCI	<i>Cross-Channel Interference</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

∞	Valor potencialmente infinito
α	Atenuação de potência na fibra
β	Coefficiente de dispersão
γ	Coefficiente não linear
Δ_f	Amplitude espectral de um circuito
ϕ	Taxa de resfriamento no <i>simulated annealing</i>
λ	Intervalo médio entre chegadas de requisições
μ	Inverso do tempo médio de duração das requisições
σ	Nível pretendido de espaçamento no SSTG
A	Quantidade máxima de iterações
B	Número de valores discretos considerados na busca por força bruta
D	Nó de destino
E	Quantidade de épocas da MLP
G	Ganho de desempenho
I	Densidade de potência por espectro
L	Limiar aceitável para BB_{ab}
N	Quantidade de neurônios da MLP
N_l	Número de <i>spans</i> do link l
P	Quantidade máxima de perturbações por iteração no <i>simulated annealing</i>
P_{TX}	Potência do sinal
R	Quantidade de reaquecimentos no <i>simulated annealing</i>
S	Nó de origem
Sl	Solução atual no <i>simulated annealing</i>
Sl_p	Solução após perturbação no <i>simulated annealing</i>

T	Temperatura no <i>simulated annealing</i>
Tr	Taxa de transmissão requisitada
U	Tamanho do conjunto de treinamento da MLP

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	MOTIVAÇÃO E PROBLEMAS	17
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	19
1.3	ROTEIRO	20
2	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	21
2.1	ABORDAGENS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE EONS	21
2.2	PLANO DE CONTROLE	24
2.3	PLANEJAMENTO DE EONS	25
2.4	ALOCAÇÃO DE RECURSOS	27
2.4.1	Agregação de tráfego	27
2.4.2	RMSA	28
2.5	IMPERFEIÇÕES DA CAMADA FÍSICA	32
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	32
3	SOLUÇÕES PARA ROTEAMENTO E DIMENSIONAMENTO/ DISTRIBUIÇÃO DE BVTS	34
3.1	PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA ROTEAMENTO	34
3.1.1	Trabalhos relacionados	34
3.1.2	K Balanced Paths	36
3.2	PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA DIMENSIONAMENTO/DISTRIBUIÇÃO DE BVTS	38
3.2.1	Trabalhos relacionados	39
3.2.2	Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization	40
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	41
4	SOLUÇÕES PARA AGREGAÇÃO DE TRÁFEGO	43
4.1	PROPOSTA DE ALGORITMO PARA AGREGAÇÃO DE TRÁFEGO E PO- LÍTICAS ADAPTATIVAS	43
4.1.1	Trabalhos relacionados	44
4.1.2	Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph	44
4.1.3	WAMLP	46
4.1.4	WASA	48
4.2	PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA POTENCIALIZAÇÃO DA AGREGA- ÇÃO DE TRÁFEGO	51
4.2.1	Trabalhos relacionados	51
4.2.2	SSTG	52
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	57

5	MODELAGEM DA EON E MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	58
5.1	TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	58
5.2	SNETS	58
5.3	MODELOS DE CAMADA FÍSICA E CONSUMO ENERGÉTICO	61
5.3.1	Modelo de camada física	61
5.3.2	Modelo de consumo energético	63
5.4	MÉTRICAS DE DESEMPENHO DAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	64
5.5	DISTRIBUIÇÃO DE TRÁFEGO POR PARES DE NÓS E TAXAS DE TRANSMISSÃO	67
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	70
6	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS	71
6.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	71
6.2	ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AD1 - SOLUÇÕES RMSA	74
6.3	ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AD2 - DIMENSIONAMENTO/DISTRIBUIÇÃO DE BVTS	78
6.4	ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO 3 (AD3)	81
6.5	ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO 4 (AD4)	87
6.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	92
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	94
7.1	CONCLUSÕES	94
7.2	PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	98
7.3	TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIAS	100
	APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DO SNETS	107
	APÊNDICE B – ENTRADA DE PARÂMETROS E SISTEMAS NO SNETS	109

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho de doutorado, são abordados os problemas de planejamento e alocação de recursos em *Elastic Optical Networks* (EONs). O principal diferencial deste tipo de rede é a capacidade de alocação dos recursos em canais com largura de banda variável para permitir melhor adaptação às demandas da rede. Este capítulo introduz o tema deste trabalho e aponta para os problemas abordados e soluções propostas. O restante deste capítulo está organizado da seguinte maneira: a Seção 1.1 apresenta a motivação e problemas abordados; a Seção 1.2 apresenta os objetivos e contribuições deste trabalho; por fim, a Seção 1.3 apresenta a organização dos capítulos posteriores.

1.1 MOTIVAÇÃO E PROBLEMAS

A utilização da fibra óptica como meio de transmissão apresenta uma série de benefícios. Entre eles, altas taxas de transmissão, imunidade a interferências eletromagnéticas e a multiplexação óptica. Tendo isto em vista, as redes ópticas têm potencial para permanecer como a melhor alternativa para compor os *backbones* das redes de transporte.

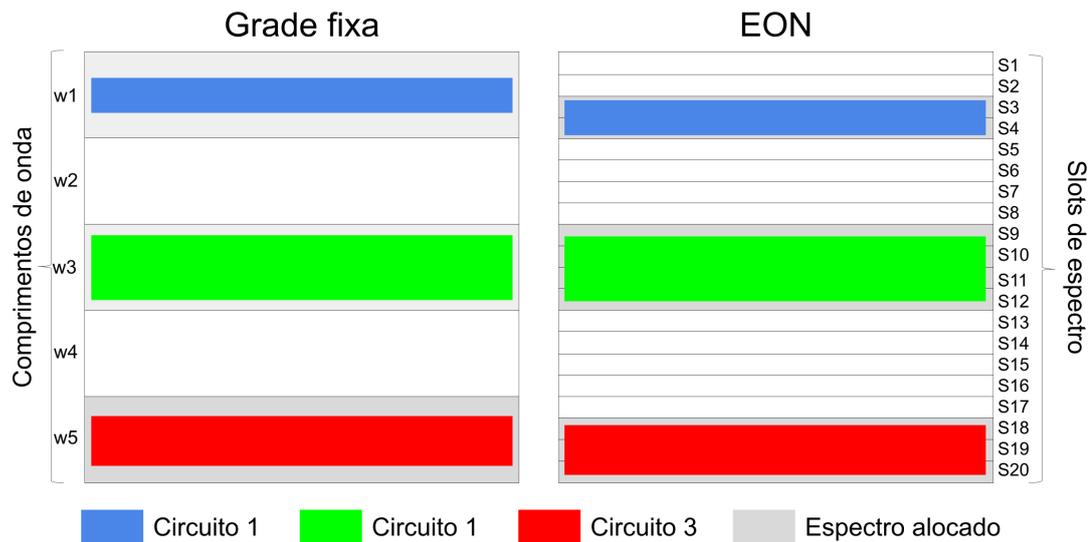
As atuais redes ópticas multiplexam o espectro óptico de duas maneiras distintas: com grade fixa, a exemplo das redes ópticas com *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) e de maneira elásticas, a exemplo das EONs. Nas redes ópticas com grade fixa, o espectro óptico é dividido em comprimentos de onda que por sua vez, podem ser alocados para diferentes circuitos ópticos. Entretanto, a amplitude espectral dos comprimentos de onda não pode ser alterada sob demanda para ajustar a rede às requisições dos clientes. Já nas EONs, o espectro óptico é dividido em porções denominadas *slots* de espectro que por sua vez são combinados para formar circuitos ópticos com diferentes amplitudes espectrais.

Nas redes ópticas com grade fixa, os transmissores, receptores e comutadores operam com amplitude espectral fixa, já nas EONs estes equipamentos precisam estar aptos a ajustar a frequência central e a quantidade de *slots* de espectro utilizados na transmissão. Os transmissores e receptores com esta capacidade são denominados *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs), já os *Bandwidth Variable Optical Cross Connects* (BV-OXCs) permitem comutar os canais ópticos flexíveis ao longo dos nós intermediários (WANG et al., 2012).

As EONs permitem a alocação do espectro para circuitos ópticos de forma flexível, reduzindo os desperdícios e facilitando a adaptação aos requisitos das redes clientes. A Figura 1 ilustra a alocação do espectro óptico em uma rede com grade fixa e em uma EON para acomodar três circuitos ópticos. Observa-se que a diferença entre a largura de banda demandada e a capacidade total de cada comprimento de onda provoca um desperdício de espectro óptico. Já a EON permite combinar *slots* de espectro para criar circuitos

ópticos com capacidade ajustada de acordo com a demanda. No exemplo da Figura 1, na WDM com grade fixa, foram alocados 3 comprimentos de onda, isto corresponde a 60% do espectro óptico ilustrado. Por outro lado, na EON foram alocados 9 *slots* que correspondem a 45% do espectro óptico ilustrado.

Figura 1 – Diferença da alocação de espectro em uma rede WDM com grade fixa e em uma EON.



Fonte: SANTOS (2015)

As requisições dos clientes da rede são representadas pela tupla (S, D, Tr) onde onde S é o nó de origem, D é o nó de destino e Tr é a taxa de transmissão requisitada. Para atender as requisições, são estabelecidos circuitos ópticos entre pares de nós da rede. O planejamento de uma EON consiste em determinar os investimentos em dispositivos, implantação da rede, e soluções para alocação de recursos. Durante a fase de planejamento, as decisões são tomadas de forma a reduzir os desperdícios, evitar gargalos e adequar a capacidade da rede à demanda estimada.

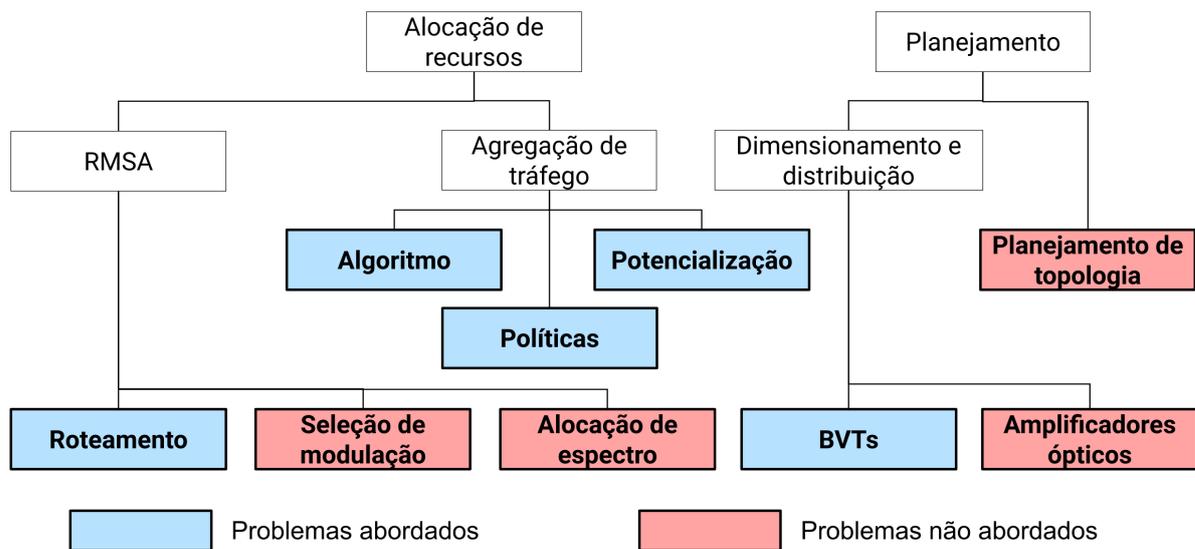
Nas EONs, os dados são transferidos através de circuitos ópticos, o estabelecimento de um circuito óptico na rede exige a alocação prévia de recursos. Primeiramente é verificada a disponibilidade de BVTs na origem e destino do circuito óptico, em seguida são acionadas as soluções *Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA)*. As soluções RMSA são algoritmos responsáveis por determinar a rota, o formato de modulação e a faixa de espectro que serão alocados para um novo circuito na rede. Finalmente, as soluções de agregação de tráfego devem determinar como atender uma nova requisição, utilizando circuitos existentes ou criando novos circuitos na rede.

Os maiores desafios para as EONs são: i) o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos que suportam a EON (ex: BVTs e BV-OXCs), ii) A adaptação de algoritmos existentes e a criação de novos algoritmos para alocação de recursos em EONs, iii) Técnicas para o planejamento de EONs visando a otimização dos investimentos em equipamentos.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo geral deste trabalho é propor e avaliar soluções de alocação de recursos e dimensionamento/posicionamento de BVTs para redes ópticas elásticas. A avaliação é feita de forma integrada para considerar a influência entre as soluções para diferentes problemas da rede. A Figura 2 apresenta os principais problemas de alocação de recursos e planejamento em EONs e destaca os problemas abordados no contexto deste trabalho.

Figura 2 – Problemas de alocação de recursos e planejamento em EONs abordados neste trabalho.



Fonte: o autor (2021)

Conforme destacado na Figura 2, neste trabalho, são abordados os seguintes problemas em EONs: i) roteamento, ii) algoritmo de agregação de tráfego, iii) políticas de agregação de tráfego, iv) mecanismos para potencialização de agregação de tráfego e v) dimensionamento e distribuição de BVTs. As soluções para estes problemas influenciam diretamente na capacidade de atendimento, consumo energético e custo de implantação da rede.

Dentro das soluções para alocação de recursos, este trabalho se concentrou nas soluções para agregação de tráfego. No entanto, foi observado que muitas das soluções RMSA adotadas na literatura utilizavam o algoritmo *K-Shortest Paths* (KSP) (YEN, 1971) como base para a escolha de rotas candidatas. Neste sentido, foi proposto o algoritmo *K Balanced Paths* (KBP) como alternativa ao KSP. O KBP faz um ajuste *offline* de pesos nos enlaces da topologia proporcionando maior balanceamento de carga na rede. No contexto deste trabalho não foram propostas soluções para escolha do formato de modulação e alocação de espectro.

Para o problema de agregação de tráfego foi proposto o algoritmo *Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph* (MTGAG). O MTGAG permite a utilização de diferentes políticas de agregação de tráfego através do ajustes dos pesos em uma

função de custo preestabelecida. Dentre os fatores considerados pelo MTGAG, estão a qualidade do sinal óptico dos circuitos e o impacto de novos circuitos na rede. Desta forma é possível utilizar políticas de agregação de tráfego cientes de camada física. Também foram propostas as políticas *Weight Adjustment with Simulated Annealing* (WASA) e *Weight Adjustment with Multilayer Perceptron Network* (WAMLN). Estas políticas utilizam técnicas de inteligência artificial para ajustar os pesos do MTGAG de acordo com o cenário em que são aplicadas. Também foi proposto o algoritmo *Spectrum Spacing for Traffic Grooming* (SSTG). O SSTG influencia a solução RMSA provocando espaçamento entre o espectro alocado para cada circuito óptico. Por sua vez, este espaçamento potencializa a agregação de tráfego em futuras requisições. Os subproblemas de agregação de tráfego e planejamento de EONs abordados possuem em comum o objetivo de aumentar o aproveitamento dos BVTs, isto por sua vez viabiliza redução no número de BVTs implantados o que se reflete no custo de implantação da rede e no consumo energético.

Em geral, o planejamento de topologias de rede deve levar em consideração aspectos geográficos, econômicos e políticos. Por exemplo a localização de cidades com maior quantidade de usuários, acordos governamentais, disponibilidade de abastecimento elétrico, etc. Estes temas fogem ao escopo deste trabalho. Por outro lado, é possível determinar a quantidade e a localização dos dispositivos de rede dentro de uma topologia predeterminada. A quantidade e localização dos BV-OXCs coincide com os nós da topologia. Neste trabalho é proposta a solução *Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization* (FNBN) para distribuição e dimensionamento de BVTs.

1.3 ROTEIRO

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos das EONs incluindo os problemas de alocação de recursos, dimensionamento e posicionamento de BVTs, métricas de avaliação de desempenho e custos de implantação e operação. O Capítulo 3 apresenta as propostas de algoritmos para roteamento (KBP) e dimensionamento/distribuição de BVTs (FNBN). O Capítulo 4 apresenta as propostas para agregação de tráfego (MTGAG, WASA, WAMLN e SSTG). O Capítulo 5 apresenta a modelagem de EON implementada na ferramenta *Slice Network Simulator* (SNetS), utilizada nos experimentos realizados neste trabalho. O Capítulo 6 apresenta um estudo de avaliação de desempenho das soluções propostas neste trabalho e soluções encontradas na literatura. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas e os trabalhos futuros.

2 REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Este capítulo aborda os principais conceitos das *Elastic Optical Networks* (EONs). Tais conceitos são fundamentais para a compreensão das soluções propostas no contexto desta tese de doutorado. Ainda neste capítulo, são apresentados os problemas de planejamento e alocação de recursos em EONs e as principais métricas de avaliação de desempenho utilizadas na literatura e neste trabalho.

A Seção 2.1 apresenta as principais abordagens de implementação de EONs encontradas na literatura. A Seção 2.2 aborda os planos de controle e dados das EON. A Seção 2.3 apresenta os problemas da fase de planejamento da EON. Na Seção 2.4 são discutidos os algoritmos de alocação de recursos em EON, com ênfase em agregação de tráfego e *Routing, Modulation and Spectrum Allocation* (RMSA). A Seção 2.5 aborda a camada física das EONs. Por fim, a Seção 2.6 apresenta as considerações finais do Capítulo.

2.1 ABORDAGENS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE EONS

As redes ópticas *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) com grade fixa dividem o espectro óptico em porções denominadas comprimentos de onda. As frequências centrais dos comprimentos de onda são fixas e o espaçamento entre elas é de 50GHz ou 100GHz de acordo com a *International Telecommunication Union* (ITU). Em virtude disto, os circuitos ópticos estabelecidos nas redes ópticas WDM com grade fixa possuem largura de banda pré determinada. Isto dificulta a adaptação dos circuitos ópticos à demanda das redes cliente o que provoca desperdícios (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

As EONs permitem o estabelecimento de circuitos ópticos com largura de banda adaptável às requisições das redes clientes. São encontradas na literatura três abordagens para implementação de EONs: i) As redes ópticas *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), também chamadas *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network* (SLICE) (JINNO et al., 2009). ii) As redes ópticas *Flexible Optical Wavelength Division Multiplexing* (FWDM) (PATEL et al., 2010) e iii) As redes ópticas WDM com taxa de dados variável (RIVAL; MOREA, 2010).

As redes ópticas WDM com taxa de dados variável utilizam alocação de espectro fixa, entretanto, possuem canais com diferentes larguras de banda para suportar diferentes tipos de demanda de tráfego. Já as redes ópticas FWDM permitem a alocação flexível dos recursos espectrais a partir de uma evolução da arquitetura das redes WDM.

As redes SLICE por sua vez, utilizam a OFDM. Neste tipo de rede, o espectro óptico é dividido em slots que podem ser combinados para a criação de canais ópticos com largura de banda ajustada sob demanda. Neste trabalho serão abordadas apenas as redes SLICE. Nos capítulos seguintes, as terminologias EON bem como redes ópticas OFDM

serão utilizadas para se referir a este tipo específico de rede.

Nas redes ópticas, os transponders são responsáveis pela conversão dos dados do meio eletrônico para o meio óptico e vice-versa. Eles são utilizados nos nós de origem e destino para transmitir e receber os dados. Uma vez convertidos para o domínio óptico, os dados são transmitidos por meio das fibras ópticas e comutados nos nós intermediários em comutadores ópticos. Em algumas circunstâncias, os transponders também podem ser utilizados para conversão Óptico-Eletr-Óptico (OEO) dos dados em nós intermediários, isto viabiliza a regeneração do sinal e a comutação eletrônica, conforme discutido na Seção 2.4.

Nas EONs, são utilizados os *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs) e *Bandwidth Variable Optical Cross Connects* (BV-OXCs). Estes transponders e comutadores ópticos permitem a configuração da frequência central e amplitude espectral. Ou seja, em um instante, um BVT pode estar transmitindo em 5 slots de espectro e posteriormente, este mesmo BVT pode ser configurado para usar 10 slots, inclusive com frequência central diferente da anterior. Esta capacidade elástica, associada à utilização de diferentes formatos de modulação, promove uma flexibilidade na criação de circuitos ópticos com diferentes capacidades de taxa de transmissão (WANG et al., 2012). Na prática, uma quantidade inteira de *slots* de espectro é utilizada para estabelecer um circuito óptico, desta forma, a granularidade em termo de taxa de transmissão fica delimitada pela amplitude espectral do *slot* e a eficiência espectral das modulações utilizadas.

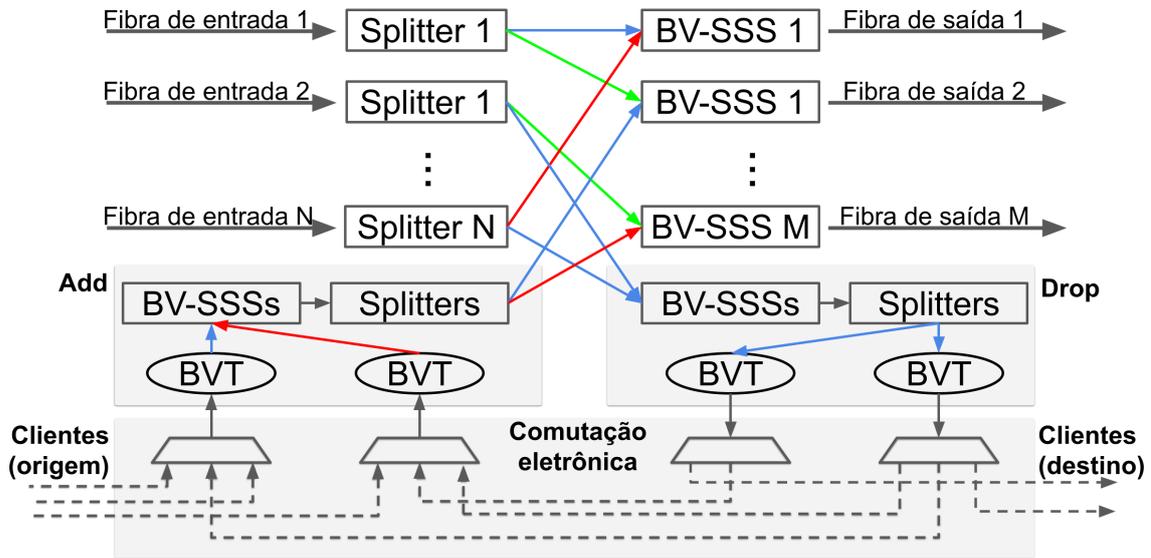
De maneira geral, a literatura considera dois tipos de *transponders*, os BVTs e os *Sliceable Bandwidth-Variable Transponders* (SBVTs) (ZHANG et al., 2015a). Os SBVTs possuem *subtransponders* utilizados para transmitir fluxos de tráfego independentes em *slots* de espectro adjacentes sem banda de guarda entre eles. Isto é chamado na literatura de agregação óptica.

Os BVTs não permitem a agregação óptica, entretanto, a agregação de tráfego pode ser feita no domínio eletrônico conforme é apresentado na Seção 2.4. Mesmo que um circuito óptico não possua largura de banda disponível, para agregar novas requisições, os BVTs podem ser reconfigurados para utilizar mais slots de espectro de acordo com a demanda.

A Figura 3 apresenta os modelos de BV-OXC e BVT considerados neste trabalho. A modelagem de BV-OXCs está de acordo com (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015) e a modelagem de BVTs com camada de agregação de tráfego e comutação eletrônica está de acordo com (ZHANG et al., 2015a). Na Figura 3, os *splitters* agem como demultiplexadores, estes dispositivos separam faixas do espectro óptico através da replicação e filtro do sinal óptico de entrada. Os *Bandwidth Variable Spectrum Selective Switches* (BV-SSSSs) agem como multiplexadores combinando diferentes faixas de espectro em um sinal óptico de saída.

No modelo de BV-OXC adotado, é utilizado um *splitter* para cada enlace de entrada e um BV-SSS para cada enlace de saída. Além disso, também são utilizados para fazer

Figura 3 – Modelo de BV-WXC e BVTs.



Fonte: CHATTERJEE; SARMA; OKI (2015)

add e *drop* na rede, ou seja, inserção e recebimento do sinal óptico nos nós de origem e destino ou comutação eletrônica em nós intermediários (agregação de tráfego *multihop*).

Utilizando apenas um BV-SSS e um *splitter* para fazer *drop* na rede, não é possível fazer *drop* de dois sinais ópticos com mesma faixa de espectro, mesmo oriundos de enlaces diferentes, o mesmo raciocínio se aplica para fazer *add*. Para evitar esta restrição, a quantidade de BV-SSSs e *splitters* necessária para *drop* é igual à quantidade de enlaces de entrada. De maneira análoga, a quantidade de BV-SSSs e *splitters* necessários para *add* é igual à quantidade de enlaces de saída. As Equações 2.1 e 2.2 apresentam o Número de BV-SSSs (NB) e o Número de Splitters (NS) necessários em um nó com N enlaces de entrada e M enlaces de saída. Ao considerar enlaces *full duplex* para cada par de nós na rede, temos N e M iguais.

$$NB = 2 \cdot M + N \quad (2.1)$$

$$NS = 2 \cdot N + M \quad (2.2)$$

Cada BVT é acoplado a um *switch* eletrônico. Os *switches* eletrônicos utilizam o circuito óptico para atender diferentes clientes, ou, comutar fluxos de dados eletronicamente, viabilizando a agregação de tráfego *multihop*. Isto pode ser feito por *Time Division Multiplexing* (TDM) por exemplo. Entretanto, as técnicas de multiplexação eletrônica dos circuitos fogem ao escopo deste trabalho, esta etapa é abstraída em todos os experimentos realizados. A comutação eletrônica permite o aproveitamento de circuitos ativos, a

redução de interferências na camada física devido à utilização de circuitos com menor comprimento e conseqüentemente a utilização de formatos de modulação mais eficientes. Em contrapartida, os dados precisam passar por uma ou mais conversões OEO, o que por sua vez poderá inserir atrasos de processamento.

2.2 PLANO DE CONTROLE

Em geral, as EONs fazem a separação dos planos de dados e controle. Isto quer dizer que as informações sobre origem, destino, rota e recursos da rede utilizados não trafegam juntamente com o *payload*. Antes da transmissão dos dados, o plano de controle configura e reserva um conjunto de recursos da rede, desta forma, pode ser oferecida garantia de *Quality of Service* (QoS) (SÓCRATES-DANTAS et al., 2014).

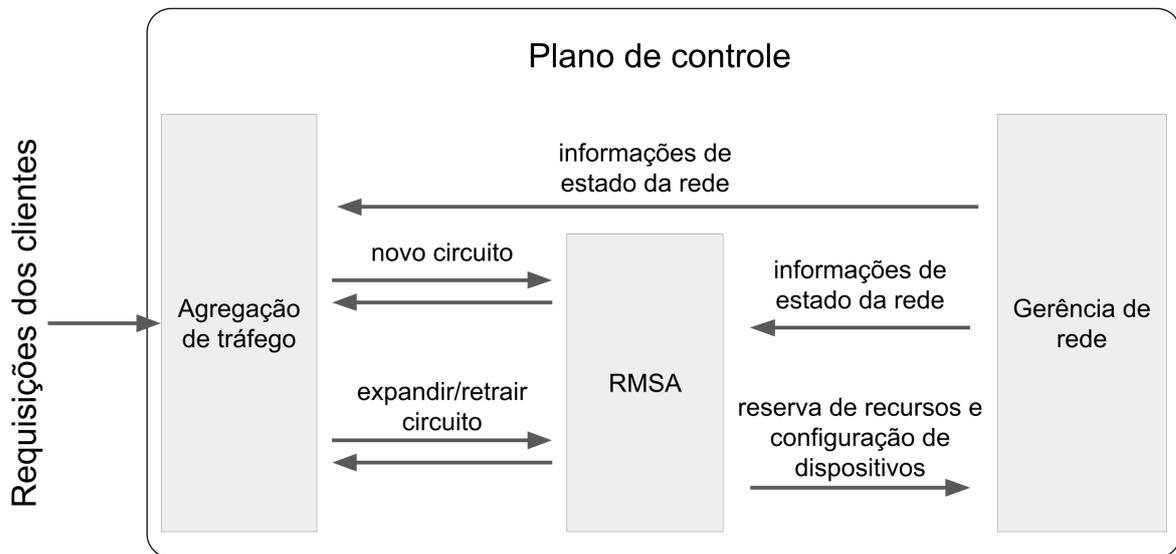
O plano de controle da EON é responsável por toda a logística necessária para reservar os recursos da rede a fim de atender às requisições dos clientes. É nele onde ficam os algoritmos para agregação de tráfego e RMSA. O plano de controle também mantém informações sobre o estado da rede e disponibilidade de recursos, estas informações podem ser utilizadas durante as tomadas de decisão dos algoritmos RMSA. Entre as informações armazenadas pelo plano de controle estão as capacidades excedentes de circuitos ativos, estas informações são utilizadas pelos algoritmos de agregação de tráfego para o reaproveitamento dos circuitos em novas requisições. Quando não há agregação de tráfego na rede, para cada nova requisição será criado um novo circuito.

A Figura 4 ilustra o plano de controle de uma EON e as interações entre seus principais componentes. Os algoritmos de alocação de recursos bem como as interações apresentadas na Figura 4 são explanados com maior profundidade na Seção 2.4. A gerência de rede, também ilustrada na Figura 4, é responsável por fornecer as informações necessárias aos algoritmos de alocação de recursos e interagir com a EON para configurar e reservar os dispositivos. Vale destacar que o plano de controle também possui outras funções como a detecção e recuperação de falhas, mapeamento da topologia e monitoramento da rede. Entretanto, estes aspectos não são considerados neste trabalho.

Em uma EON, uma requisição de cliente pode ser representada pela tupla (S, D, Tr) , onde S é o nó de origem, D é o nó de destino e Tr é a taxa de transmissão requisitada. As requisições são atendidas através de circuitos ópticos, estes por sua vez podem ser representados pela tupla (S', D', Tr') , onde S' é o nó de origem do circuito, D' é o nó de destino do circuito e Tr' é a capacidade de taxa de transmissão do circuito. O plano de controle permite a criação e a finalização de circuitos ópticos na rede. Além disso, estes circuitos podem ter sua amplitude espectral expandida ou retraída.

Quando uma nova requisição chega à rede, primeiramente, o algoritmo de agregação de tráfego irá determinar quais entre os circuitos ativos na rede serão reaproveitados para atender a esta requisição, caso seja necessário, os algoritmos RMSA são acionados

Figura 4 – Representação do plano de controle e interação entre algoritmos de alocação de recursos e gerência de rede.



Fonte: o autor (2021)

para criar um novo circuito ou expandir um circuito existente. A expansão de circuitos ativos pode ser feita desde que existam *slots* de espectro livres adjacentes ao circuito em questão. De acordo com o algoritmo de agregação de tráfego, o plano de controle também pode fazer a retração de circuitos, ou seja, a redução da faixa de espectro utilizada por um circuito ativo, ou até mesmo o desligamento completo de um circuito para liberar recursos. Quando o atendimento à uma requisição exige a criação ou expansão de um circuito e por sua vez, isto não pode ser feito por ausência de recursos ou baixa qualidade do sinal óptico, a requisição é bloqueada.

2.3 PLANEJAMENTO DE EONS

Antes da implantação da EON, a operadora de rede deve estimar os investimentos com dispositivos de acordo com a demanda esperada. Entretanto, não existe uma relação linear entre o investimento financeiro e a capacidade da rede. Além da quantidade e distribuição dos equipamentos, a capacidade de atendimento da rede também é influenciada pelas estratégias de alocação de recursos adotadas. Todos estes aspectos são determinados pela operadora durante a etapa de planejamento da EON.

O planejamento da topologia é um subconjunto dos problemas do planejamento da EON que consiste em determinar a quantidade e o posicionamento de nós e enlaces. O planejamento da topologia deve levar em consideração fatores geográficos, políticos e econômicos. Além disso, os enlaces de redes WDM podem ser reaproveitados para EONs, desta forma em alguns casos a EON estará herdando a topologia de uma rede existente.

Outros problemas a serem resolvidos no planejamento da EON são o dimensionamento/distribuição de BVTs e amplificadores ópticos. A maioria dos trabalhos determina a quantidade de amplificadores por enlace em função do seu comprimento. Em geral os amplificadores são distribuídos com distância uniforme ao longo de cada enlace. Segundo nosso conhecimento, ainda não existem propostas alternativas para o dimensionamento/distribuição de amplificadores ópticos. Já o dimensionamento e a distribuição de BVTs são feitos de maneira empírica na maioria dos trabalhos da literatura.

Durante a fase de implantação de uma EON, a quantidade de BV-OXCs, BVTs e enlaces bem como outros dispositivos associados à estes como amplificadores, multiplexadores e demultiplexadores, representam um custo para a operadora de rede. Este custo será referenciado neste trabalho como *Capital Expenditure* (CapEx). Além disso, estes equipamentos geralmente consomem energia elétrica, desta forma também há um impacto no *Operational Expenditure* (OpEx).

Considerando o cenário hipotético onde é estabelecida a quantidade máxima de circuitos em uma rede, o número de *transceivers* necessários é dado pela Equação 2.3. Onde NL é o número de enlaces (unidirecionais) e $maxNC$ é a quantidade máxima de circuitos que podem ser estabelecidos em um enlace. Neste trabalho este valor será referenciado como Número Máximo de Transceivers em Potencial (NMTP).

$$NMTP = NL \cdot maxNC \quad (2.3)$$

Considerando a utilização de 400 *slots* de espectro e 1 *slot* para banda de guarda, teríamos $maxNC = 200$. Em topologias hipotéticas com 20, 30, 40 e 50 enlaces, os NMTPs seriam 4000, 6000, 8000 e 10000, respectivamente. A utilização destas quantidades de BVTs é inviável uma vez que causaria altos CapEx e OpEx para dar suporte a um cenário com baixa probabilidade de acontecer.

Mesmo nas redes ópticas WDM com grade fixa, onde o NMTP é relativamente menor (a quantidade de comprimentos de onda representa menor valor de $maxNC$), trabalhos da literatura consideram a utilização de uma quantidade menor de *transceivers* para reduzir o CapEx. Em (SHEN et al., 2000) é investigado o impacto da limitação na quantidade de *transceivers* no bloqueio de circuitos em redes ópticas WDM. Entretanto, conforme apresentado no Capítulo 3, a maioria dos trabalhos abordando EONs determinam empiricamente uma quantidade fixa de BVTs que por sua vez são distribuídos uniformemente entre os nós da rede.

Conforme é discutido na Seção 2.4, a utilização de agregação de tráfego *multihop* pode utilizar circuitos ópticos encadeados para atender às requisições, nesse cenário, os BVTs também são utilizados em nós intermediários (diferentes da origem e destino da requisição). Desta forma, de acordo com as políticas de agregação de tráfego e características topológicas, alguns nós irão necessitar de maior ou menor quantidade de BVTs. Isto se

intensifica quando o tráfego não é distribuído de maneira uniforme entre os nós da rede. Desta forma, apesar de ser a estratégia mais comum nos trabalhos da literatura, distribuir um número igual de BVTs em cada nó da rede pode provocar desperdício ou insuficiência de BVTs na rede.

2.4 ALOCAÇÃO DE RECURSOS

Em EONs, para atender a uma requisição, são reservados os recursos necessários na rede, desta forma, é possível garantir QoS. Os algoritmos de alocação de recursos são responsáveis por determinar quais recursos serão reservados para atender cada requisição. Chamamos tráfego estático quando o instante de chegada, o término e a taxa de transmissão de todas as requisições são conhecidos previamente, e tráfego dinâmico quando estas informações se tornam disponíveis apenas no momento de chegada de cada requisição. Com tráfego estático, os algoritmos de alocação de recursos são executados durante a etapa de planejamento da rede (HALDER et al., 2021; WU et al., 2014; ZHANG et al., 2015b). Em contrapartida, com tráfego dinâmico os algoritmos de alocação de recursos devem tomar as decisões durante a fase de operação da rede. Neste trabalho foram abordadas apenas as EONs com tráfego dinâmico.

2.4.1 Agregação de tráfego

Alguns trabalhos da literatura que abordam EONs, consideram a utilização de um circuito para cada requisição (KOZICKI et al., 2011; CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011; SONE et al., 2011; WANG; MUKHERJEE, 2014). Isto causa desperdício de recursos espectrais com bandas de guarda além de dificultar o aproveitamento total da capacidade dos BVTs, especialmente quando há requisições que demandam baixas taxas de transmissão. Para aumentar a eficiência espectral e reduzir a utilização de BVTs, alguns trabalhos na literatura têm proposto estratégias onde diversas requisições são atendidas pelo mesmo circuito óptico (ZHANG et al., 2015a). Estas estratégias são referenciadas na literatura como agregação de tráfego.

A agregação de tráfego permite o compartilhamento dos circuitos entre requisições, isto reduz o desperdício de espectro e aumenta a eficiência na utilização de BVTs (SATO, 2011). Os algoritmos de agregação de tráfego são guiados por diferentes políticas. Estas, podem priorizar a economia de recursos, caminhos menores, reaproveitamento de circuitos ativos, etc. O objetivo do algoritmo de agregação de tráfego é determinar quais circuitos serão utilizados para atender cada requisição.

Estes circuitos não precisam necessariamente possuir mesma origem e destino das requisições, eles podem ser organizados de maneira encadeada, isto é chamado de agregação

de tráfego *multihop* e cada circuito é chamado salto virtual. Entre cada salto virtual, os dados passam por uma conversão OEO, isto exige a utilização de BVTs adicionais. Em contrapartida, o sinal óptico é regenerado, isto permite a utilização de formatos de modulação mais eficientes e evita bloqueios por baixa qualidade do sinal (FONTINELE et al., 2017). Um conjunto de circuitos encadeados para o atendimento de uma requisição corresponde a uma Solução de Agregação de Tráfego (SAT).

A literatura apresenta duas formas de fazer agregação de tráfego: i) agregação eletrônica (WU; NING; GUO, 2017) e ii) agregação óptica (ZHANG et al., 2015a; COSTA; DRUMMOND, 2016). A agregação eletrônica exige a utilização de um *switch* para fazer a multiplexação dos BVTs. Por outro lado, a agregação óptica exige a utilização de BVTs mais sofisticados, capazes de transmitir simultaneamente os dados de diferentes clientes em porções do espectro óptico distintas sem separação por banda de guarda.

Os BVTs com capacidade para agregação óptica são referenciados na literatura como SBVTs (ZHANG et al., 2015a). O SBVT é capaz de fazer a agregação de fluxos de dados distintos no domínio óptico sem banda de guarda entre eles. Apesar dos benefícios da agregação óptica, a literatura é escassa em propostas de modelos de SBVT bem como a modelagem das imperfeições de camada física e consumo energético destes dispositivos. A agregação óptica também exige a utilização de BV-OXCs capazes de fazer a separação dos fluxos de dados no domínio óptico.

Neste trabalho são considerados BVTs e BV-OXCs menos sofisticados, sem capacidade para agregação óptica. Desta forma, a rede óptica elástica estudada está habilitada apenas para agregação de tráfego eletrônica. Os BVTs considerados possuem a capacidade de alterar a frequência central e a amplitude espectral utilizada na transmissão. Desta maneira, os circuitos ópticos podem ser estabelecidos e ajustados de acordo com a demanda na rede.

No instante de chegada de uma nova requisição, o algoritmo de agregação de tráfego irá verificar quais circuitos atualmente ativos possuem capacidade remanescente para atender à nova requisição, além disso, também pode ser requisitada a criação de novos circuitos ou a expansão de circuitos existentes. A expansão de um circuito existente consiste na reconfiguração da frequência central e amplitude espectral dos BVTs de um circuito ativo, isto permite aumentar a taxa de transmissão total do circuito (MAJUMDAR; PAL; DE, 2016), entretanto, devem ser respeitadas as mesmas restrições para a criação de um novo circuito conforme será discutido na Subseção 2.4.2. A interação entre os algoritmos de agregação de tráfego e RMSA é ilustrada na Figura 4.

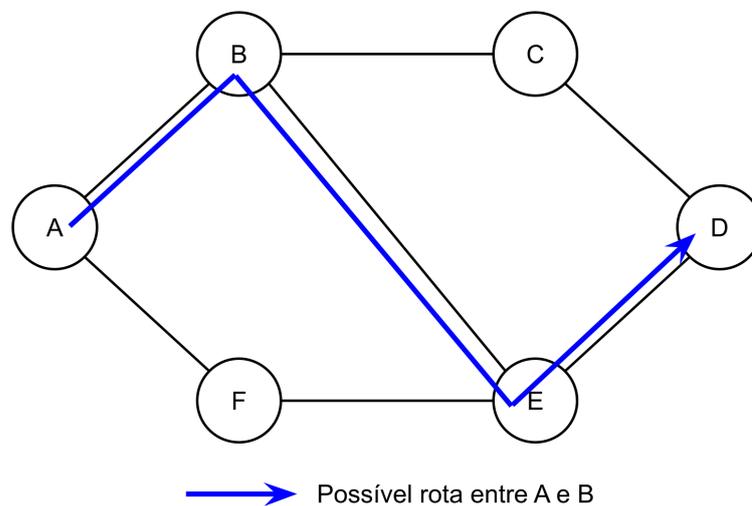
2.4.2 RMSA

O problema RMSA é uma variante mais sofisticada do problema *Routing and Spectrum Allocation* (RSA). O problema RMSA consiste em: i) Escolher uma rota na rede que

conecte o nó de origem S ao nó de destino D ; *ii*) Escolher o formato de modulação que será utilizado pela nova conexão; e *iii*) Escolher o conjunto de *slots* de frequência que será usado pelo novo circuito óptico (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; ABKENAR; RAHBAR, 2017).

Quando o algoritmo de agregação de tráfego solicita a criação de um novo circuito (S', D', Tr') , estas informações são passadas para os algoritmos RMSA. Caso haja BVTs disponíveis em S' e D' , o algoritmo RMSA inicia a sua execução. Primeiramente é buscada uma rota para o novo circuito. A rota consiste no conjunto de nós e enlaces que serão utilizados. A Figura 5 ilustra uma das possíveis rotas entre os nós A e D. A rota apresentada na Figura 5 passa pelos nós A, B, E e D.

Figura 5 – Possível rota entre os nós A e B.



Fonte: o autor (2021)

A escolha do formato de modulação deve levar em consideração a qualidade do sinal óptico e a eficiência espectral. A qualidade do sinal óptico depende de fatores como a distância percorrida pelo sinal em todos os enlaces, a quantidade de dispositivos (multiplexadores, demultiplexadores, amplificadores, etc) e os circuitos já estabelecidos que compartilham recursos com o novo circuito. Normalmente, modulações com maior eficiência espectral como a 16QAM e 32QAM, ou seja, que atingem maiores taxas de transmissão por *slot* de espectro óptico, também requerem um sinal óptico com maior qualidade no receptor. Após a escolha do formato de modulação, é possível determinar quantos *slots* de espectro serão necessários, isto engloba os slots que serão utilizados efetivamente para a transmissão de dados e os slots utilizados para banda de guarda, estes servem para evitar interferências entre circuitos que compartilham enlaces e utilizam slots de espectro próximos.

Para escolher um conjunto de *slots* de frequência para o novo circuito, o algoritmo de alocação espectral deve obedecer a duas restrições (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015): *i*) restrição de contiguidade espectral, na qual os *slots* usados por um circuito óptico devem ser adjacentes; e *ii*) restrição de continuidade espectral, na qual o conjunto de *slots* de frequência devem ser os mesmos em todos os enlaces da rota. Devido à natureza dinâmica da rede, o espectro óptico pode tornar-se fragmentado. A fragmentação do espectro ocasiona o bloqueio de um novo circuito caso não exista a disponibilidade de um conjunto de *slots* livres, contíguos e contínuos. Tais restrições devem ser consideradas no momento da alocação de espectro. A alocação espectral pode ser feita através de algoritmos clássicos, como o *Firstfit* (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015), que escolhe o conjunto de *slots* de frequência mais próximo do início do espectro. Ou através de outras soluções mais sofisticadas propostas na literatura (WANG; MUKHERJEE, 2014), (FONTINELE et al., 2017). Este tipo de solução mais sofisticada para alocação de espectro pode levar em consideração: imperfeições da camada física (*impairment-aware*), fragmentação do espectro (*fragmentation-aware*), justiça no atendimento à diferentes requisições (*fairness-aware*), dentre outros fatores.

Danto continuidade ao exemplo ilustrado na Figura 5, a Figura 6 apresenta os *slots* de espectro que podem ser utilizados para a criação de um novo circuito entre os nós A e D respeitando as restrições de continuidade e contiguidade de espectro. Se analisados individualmente, cada enlace possui mais de 10 *slots* disponíveis. Entretanto, para estabelecer um circuito passando pelos 3 enlaces ilustrados, devemos encontrar slots disponíveis nos 3 enlaces simultaneamente.

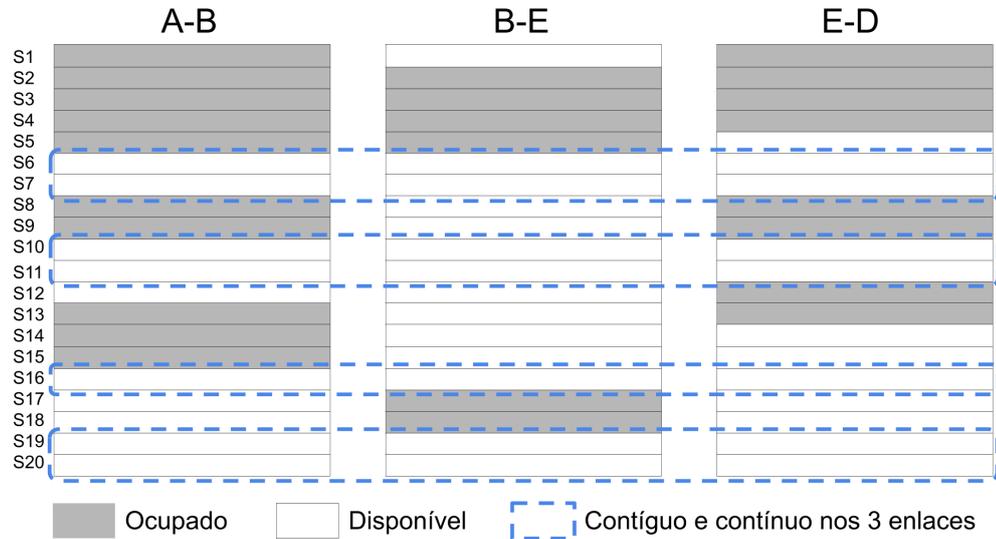
Conforme pode ser observado na Figura 6, estão disponíveis simultaneamente nos 3 enlaces os *slots* 6,7,10,11,16,19 e 20. A maior amplitude espectral que pode ser utilizada respeitando a restrição de contiguidade de espectro é portanto 2 *slots* (6-7, 10-11 ou 19-20).

Cada formato de modulação possui um nível de tolerância a ruídos no sinal óptico. Neste sentido, além de respeitar as restrições de contiguidade e continuidade de espectro, o estabelecimento de um novo circuito está sujeito à restrição de qualidade do sinal óptico. Na Seção 2.5, são apresentados em mais detalhes, as imperfeições da camada física e o bloqueio de circuitos gerado pela restrição de qualidade do sinal óptico.

Como discutido na Subseção 2.4.1, em algumas situações é necessário aumentar a capacidade de um circuito óptico ativo para acomodar novas demandas. Isto pode ser feito através da expansão do circuito utilizando as capacidades elásticas dos BVTs e BV-OXCs (MAJUMDAR; PAL; DE, 2016). Neste caso, a rota e o formato de modulação são mantidos e uma nova alocação de espectro é realizada. Com isso, o circuito irá incorporar *slots* adjacentes aos *slots* já alocados.

A Figura 7 ilustra um cenário hipotético com o circuito C1, já ativo na rede e os *slots* disponíveis para expansão do circuito. Conforme ilustrado, os *slots* utilizados na expansão precisam respeitar as restrições de continuidade e contiguidade de espectro, além disso,

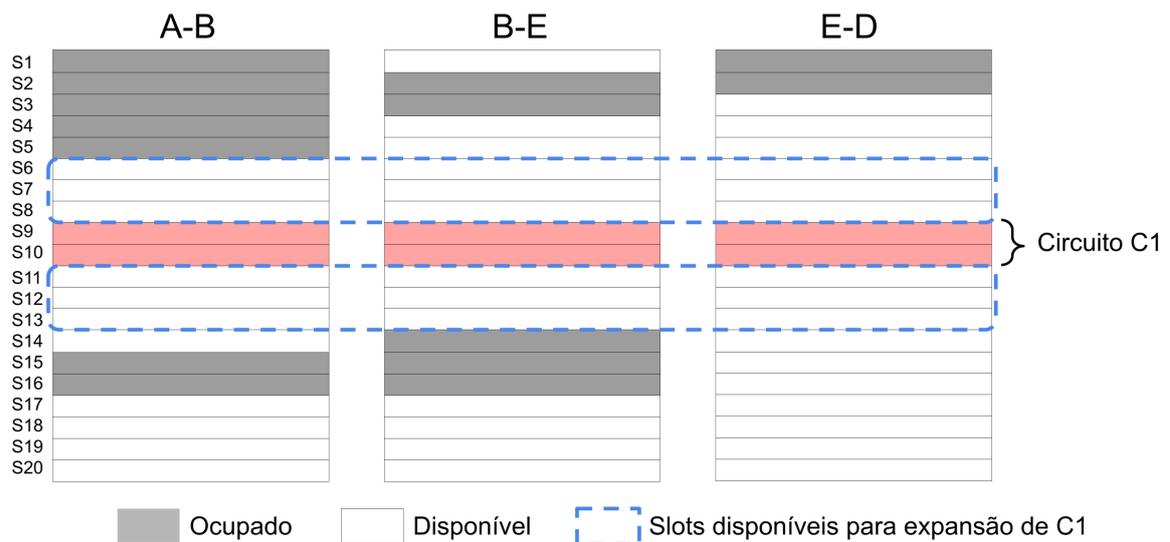
Figura 6 – Slots de espectro contínuos e contíguos.



Fonte: o autor (2021)

só podem ser utilizados *slots* adjacentes aos já alocados para o circuito. No exemplo da Figura 7, o circuito C1 que usa 2 *slots* (9 e 10) poderia ser expandido para usar até 8 *slots* (de 6 a 13), desde que fossem respeitadas também as mesmas restrições de camada física.

Figura 7 – Possibilidade de expansão do circuito C1.



Fonte: o autor (2021)

2.5 IMPERFEIÇÕES DA CAMADA FÍSICA

Quando o sinal óptico é transmitido ao longo da EON, ele perde qualidade devido às imperfeições da camada física. Estas imperfeições geram diferentes tipos de interferências que podem inviabilizar a comunicação. Durante a transmissão do sinal óptico, quanto maior a distância percorrida na fibra, maior será a atenuação da potência de sinal. Isso gera a necessidade de amplificar o sinal óptico para reestabelecer sua potência e viabilizar sua detecção no destino. Entretanto, ao amplificar o sinal óptico, os ruídos do sinal também são amplificados. Além disso, os circuitos interferem entre si, provocando outros ruídos, especialmente circuitos que utilizam frequências próximas (FONTINELE et al., 2017).

A qualidade do sinal óptico de um circuito é determinada pela *Signal to Noise Ratio* (SNR) medida no receptor. Cada formato de modulação possui um limiar de SNR aceitável, ou seja, dependendo do formato de modulação, podem ser aceitos circuitos com SNR maior ou menor. De maneira geral, quanto menor é o limiar de SNR aceitável, menor é a eficiência espectral da modulação (IVES; BAYVEL; SAVORY, 2015).

Durante a criação de um novo circuito ou a expansão de um circuito ativo, além das restrições de continuidade e contiguidade discutidas na Subseção 2.4.2, também é necessário atender às seguintes restrições impostas pela camada física: i) A SNR do novo circuito não pode ser inferior ao limiar aceito pela modulação escolhida. ii) Mesmo com SNR aceitável, caso o estabelecimento do novo circuito provoque interferência em algum dos circuitos ativos, a ponto de tornar a SNR deste circuito inaceitável, o novo circuito será bloqueado.

Informações como a SNR de um novo circuito e o impacto na SNR de circuitos ativos podem ser utilizadas por algoritmos de alocação de recursos nas tomadas de decisão. Estes algoritmos são chamados na literatura de algoritmos de alocação de recursos cientes de camada física (FONTINELE et al., 2017; HABIBI; BEYRANVAND, 2019; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A flexibilidade na alocação de recursos em EONs permite a criação de circuitos ópticos com largura de banda e taxa de transmissão configuradas durante a fase de operação da rede. Por sua vez, isto permite atender às requisições dos clientes de maneira mais eficiente. A operadora de rede realiza o planejamento da EON para determinar a quantidade e a distribuição dos dispositivos de rede, para isto, leva em consideração o investimento necessário, a demanda de tráfego esperada, a capacidade de atendimento da rede, entre outros fatores.

Além disso, os algoritmos para agregação de tráfego e RMSA devem determinar durante a fase de operação da rede quais recursos serão utilizados para atender cada requisi-

ção feita pelos clientes da EON. Os algoritmos de agregação de tráfego determinam quais circuitos serão utilizados para atender cada requisição. Quando necessário, os algoritmos RMSA são acionados para a criação de novos circuitos ou a expansão de circuitos ativos. Para isto os algoritmos RMSA devem reservar recursos da rede respeitando as restrições de continuidade e contiguidade de espectro bem como as restrições impostas pela camada física.

Vale destacar que, neste capítulo foram abordados apenas os aspectos de EONs necessários para a contextualização e compreensão dos problemas abordados e soluções propostas no contexto deste trabalho de doutorado. Desta forma, não foram detalhados outros temas relevantes para as EONs como: *Software-Defined Elastic Optical Networks* (SDEON) (WU; NING; GUO, 2017), EONs multicore (TANG et al., 2020a), sobrevivência em EONs (ZHU et al., 2021), etc.

3 SOLUÇÕES PARA ROTEAMENTO E DIMENSIONAMENTO/DISTRIBUIÇÃO DE BVTS

Este capítulo apresenta as soluções *K Balanced Paths* (KBP) e *Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization* (FNBN) para os problemas de roteamento e dimensionamento/distribuição de *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs), respectivamente. Como estes problemas foram discutidos com maior profundidade no Capítulo 2, este Capítulo enfatiza as soluções propostas e os trabalhos relacionados da literatura. A Seção 3.1 apresenta o KBP, a Seção 3.2 apresenta o FNBN e, por fim, a Seção 3.3 apresenta as considerações finais do Capítulo.

3.1 PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA ROTEAMENTO

Nos últimos anos, muitos trabalhos têm estudado o problema *Routing, Modulation and Spectrum Allocation* (RMSA) e suas variantes em *Elastic Optical Networks* (EONs). Tais estudos buscam realizar a alocação dos recursos de forma eficiente, garantindo que a rede consiga atender a maior quantidade de requisições possível. Usualmente, os trabalhos que estudam o problema RMSA realizam o roteamento através de algoritmos de menor caminho, seja o clássico algoritmo de menor caminho *Shortest Path First* (SPF) (DIJKSTRA, 1959), ou o algoritmo *K-Shortest Paths* (KSP) (YEN, 1971). A depender do trabalho, o KSP pode considerar como menor caminho aquele com menor número de saltos (*KSP hops* (KSP_h)). Outra abordagem é considerar o comprimento de cada enlace (*KSP distance* (KSP_d)), usando a distância física na definição de menor caminho.

A adoção do princípio de roteamento de menor caminho desconsidera as diferenças de tráfego em uma rede real, podendo sobrecarregar alguns enlaces. Além de prejudicar a obtenção de rotas contínuas (restrição de continuidade espectral), isto também intensifica interferências provenientes dos efeitos não lineares da camada física da rede. Neste trabalho, é proposta uma alternativa ao KSP, que seleciona um conjunto K de rotas alternativas considerando não apenas a distância entre os nós da rede, mas também a utilização de cada enlace. A proposta, nomeada de KBP, pode ser usada em conjunto com os demais algoritmos da literatura substituindo o KSP para precomputar rotas.

3.1.1 Trabalhos relacionados

Em (IZQUIERDO-ZARAGOZA; PAVON-MARINO; BUENO-DELGADO, 2014), os autores propõem um algoritmo *Routing and Spectrum Allocation* (RSA) chamado *K-shortest path routing with path-priority* (KSP-PP). Esta solução utiliza originalmente o KSP_h para precomputar as rotas e durante a criação do circuito, a rota com menor utilização de espectro

é priorizada, por fim, o espectro é alocado de acordo com a política *Firstfit*. A estratégia de escolha da rota alternativa do KSP-PP favorece o balanceamento de carga na rede.

Em (FONTINELE et al., 2017) os autores propõem um algoritmo para reduzir a probabilidade de bloqueio causado pela degradação da qualidade de transmissão que é gerada pelo estabelecimento de um novo circuito óptico nos demais circuitos já estabelecidos na rede. A proposta, denominada de *K-Shortest Path with Reduction of QoTO* (KSP-RQoTO) evita o uso de rotas que degradam a qualidade do sinal dos circuitos ópticos mais frágeis.

Em (BEHERA; DAS, 2020) é proposta uma nova estrutura de RSA em EONs que emprega interrupção controlada para cenários de tráfego dinâmico para a desfragmentação da rede. Para isso, são propostos um modelo de programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Program* - MILP), além de um algoritmo heurístico.

Além destes trabalhos citados, diversos outros têm estudado o problema RMSA (WANG; MUKHERJEE, 2014; PEDERZOLLI et al., 2019; ZHANG et al., 2015a; KLINKOWSKI; ZALEWSKI, 2019; LACERDA et al., 2020). A Tabela 1 compila informações destes trabalhos com ênfase em como o roteamento é realizado.

Tabela 1 – Algoritmos de roteamento utilizados em trabalhos da literatura para EONs

Referência	Roteamento
(WANG; MUKHERJEE, 2014)	KSP
(IZQUIERDO-ZARAGOZA; PAVON-MARINO; BUENO-DELGADO, 2014)	KSP_h
(ZHANG et al., 2015a)	KSP_h
(FONTINELE et al., 2017)	KSP_d
(PEDERZOLLI et al., 2019)	KSP_h
(KLINKOWSKI; ZALEWSKI, 2019)	KSP_d
(BEHERA; DAS, 2020)	KSP_d
(LACERDA et al., 2020)	Dijkstra

Fonte: o autor (2021)

Conforme apresentado na Tabela 1, diversos trabalhos da literatura utilizam o KSP. De maneira geral, o KSP fornece um conjunto de rotas alternativas e posteriormente a escolha dentre uma destas rotas é influenciada por uma política de acordo com o propósito de cada trabalho. Assim como o KSP, o KBP proposto neste trabalho também pode ser usado para fornecer as rotas alternativas. Entretanto, o KBP busca evitar a formação de gargalos nos enlaces da rede fornecendo rotas que favorecem o balanceamento de carga. A Seção 6.2, apresentará um estudo de avaliação de desempenho onde o KBP é comparado aos algoritmos KSP_h e KSP_d , combinados às diferentes estratégias para alocação de espectro disponíveis na literatura.

3.1.2 K Balanced Paths

O objetivo do KBP é fornecer rotas alternativas para os algoritmos RMSA evitando a formação de gargalos nos enlaces da rede. Neste sentido, o KBP pode ser usado como substituto para o tradicional KSP nas diversas soluções RMSA já propostas na literatura e também em soluções futuras. Assim como o KSP, o KBP computa previamente um conjunto de k rotas para cada par (S, D) na rede. Durante o estabelecimento de um circuito, uma das rotas alternativas é escolhida de acordo com a política da solução RMSA adotada. Por exemplo, a solução KBP-Firstfit utiliza a primeira rota que possua espectro disponível (neste caso respeitando a ordem definida pelo peso das rotas definido pelo KBP), já a solução KBP-RQoTO (baseada no KSP-RQoTO (FONTINELE et al., 2017)) escolhe a rota com menor impacto na *Quality of Transmission* (QoT) dos circuitos já estabelecidos na rede.

O KBP é semelhante às duas variações do KSP tradicional, o KSP_d e o KSP_h . Os três algoritmos calculam as K rotas de maneira similar, entretanto, cada algoritmo utiliza pesos diferentes para cada enlace. Os pesos utilizados estão de acordo com a Tabela 2, onde $LD_{i,j}$ e $KBPW_{i,j}$ correspondem, respectivamente, ao comprimento do enlace que interliga os nós i e j e um peso auxiliar específico para este mesmo enlace. Desta forma, o que diferencia o KBP dos demais algoritmos é a utilização de um peso auxiliar para cada enlace, isto por sua vez influencia na escolha das K rotas para cada par (S, D) . O *KBP Tuning* consiste em encontrar os pesos auxiliares para o KBP visando a minimização do Bloqueio de Banda (BB) na rede.

Tabela 2 – Pesos associados aos enlaces para criação das K rotas nos algoritmos KSP_h , KSP_d e KBP .

Algoritmo	Peso para o enlace interligando os nós n_i e n_j
KSP_h	1
KSP_d	$LD_{i,j}$
KBP	$LD_{i,j} + KBPW_{i,j}$

Fonte: o autor (2021)

O Algoritmo 1 apresenta a solução proposta neste trabalho para solucionar o *KBP Tuning*. Nesta solução é aplicada uma abordagem iterativa que utiliza resultados de Utilização do Espectro (UE) por enlace obtidos através de simulação. Os pesos auxiliares do KBP são incrementados passo a passo, desestimulando a utilização dos enlaces com maior UE a cada iteração. Nas linhas 2-6 é feita a inicialização do algoritmo. As linhas 9-20 apresentam os passos de cada iteração. Na linha 9, o procedimento ‘simulação(KBPW)’ corresponde a uma simulação usando o KBP e os pesos auxiliares gravados em KBPW, RS é o resultado da simulação. Na prática, RS irá receber a média dos resultados obtidos através de 10 replicações do experimento. Nas linhas 11-15, é verificado se houve redução

Algoritmo 1: *KBP Tuning* iterativo.

```

Entrada: TB, A
Saída: KBPW
1 início
   // Inicialização
2 para cada  $L_{i,j}$  faça
   | // Para cada enlace interligando i e j
3   |  $KBPW_{i,j} = 0$ 
4 fim
5  $i = 0$ 
6  $BB_{min} = \infty$ 
7
   // Iterações
8 enquanto  $i \leq A$  faça
   | // Realizar uma simulação para obter o bloqueio de banda e a
   | // utilização de espectro por enlace
9   |  $RS = \text{simulação}(KBPW)$ 
10
   | // Verificar se foi alcançado um resultado com menor bloqueio de banda.
11  |  $BB = \text{bloqueioBanda}(RS)$ 
12  | se  $BB \leq BB_{min}$  então
13  | |  $BB_{min} = BB$ 
14  | |  $KBPW_{fin} = \text{copia}(KBPW)$ 
15  | fim
16
   |  $UEE = \text{utilizacaoEspectroPorEnlace}(RS)$ 
17  | para cada  $E_{i,j}$  faça
   | | // Para cada enlace interligando i e j
18  | |  $KBPW_{i,j} = KBPW_{i,j} + \left( \frac{UEE_{L_{i,j}}}{UEE_{max}} \cdot TB \right)$ 
19  | | fim
20  | fim
21 fim
22 retorna  $KBPW_{fin}$ 
23 fim

```

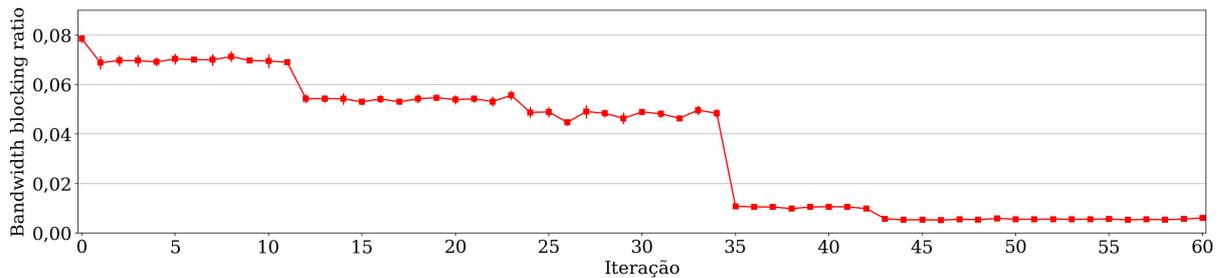
no bloqueio de banda, em caso positivo, os pesos auxiliares atuais ($KBPW$) são guardados em $KBPW_{fin}$. Por fim, nas linhas 18-20, os pesos auxiliares são atualizados de acordo com a UE de cada enlace e a taxa de balanceamento (TB).

O Algoritmo 1 possui dois parâmetros: A taxa de balanceamento (TB) e a quantidade de iterações (A). A TB corresponde ao incremento máximo nos pesos auxiliares por iteração. Utilizar valores maiores para TB viabiliza um ajuste mais rápido e exige menos iterações, entretanto, há uma perda na precisão. Por outro lado, valores menores para TB provocam uma evolução mais gradual dos pesos auxiliares dando maior precisão ao algoritmo e conseqüentemente, exige um número maior de iterações.

A Figura 8 exemplifica como o BB é afetada a cada iteração do KBP. Os resultados apresentados na Figura 8 consideram a topologia NSFNet sob mesmos parâmetros e condições do estudo de avaliação de desempenho que será apresentado na Seção 6.2. Na

iteração 0, os pesos auxiliares do KBP são todos iguais a 0, desta forma, nesta iteração o KBP-Firstfit é equivalente ao KSP_d-Firstfit. Em algumas iterações consecutivas, por exemplo entre as iterações 1 e 11, observa-se que o bloqueio de banda permanece inalterado. Isto ocorre pois ao fim das iterações 1 a 10, a atualização dos pesos auxiliares (KBPW) não foi suficiente para provocar uma alteração no conjunto de rotas alternativas para cada par(S, D).

Figura 8 – BB alcançada com o KBP-Firstfit em cada iteração do KBP tuning.



Fonte: o autor (2021)

Vale ressaltar que os pesos são ajustados com o KBP *tuning* durante a fase de planejamento da rede. O Algoritmo 1 mostra como esses pesos podem ser ajustados de forma automática, entretanto, o valor final destes depende da topologia, característica de tráfego e até mesmo soluções de agregação de tráfego escolhidas. Na fase de operação da rede, o KBP atua exatamente como o KSP tradicional, entretanto, considera os pesos auxiliares na construção das rotas auxiliares.

3.2 PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA DIMENSIONAMENTO/DISTRIBUIÇÃO DE BVTs

Conforme discutido na Seção 2.3, o problema de dimensionamento/distribuição de BVTs consiste na definição da quantidade de BVTs a serem implantados em cada nó da rede. Assim como outros problemas de planejamento, o dimensionamento e distribuição de BVTs impacta diretamente no desempenho dos algoritmos de alocação de recursos. Por exemplo, um determinado algoritmo de agregação de tráfego pode ser melhor que outro em uma EON com alta disponibilidade de BVTs em todos os nós, mas isto pode ser invertido em uma rede com baixa disponibilidade de BVTs.

A literatura dispõe de diversas soluções para alocação de recursos (MINA; AKBAR; ALIZADEH, 2020; HABIBI; BEYRANVAND, 2019; FONTINELE et al., 2017; YAN et al., 2015). Entretanto, sob o nosso conhecimento, não há propostas de soluções específicas para o problema de dimensionamento e distribuição de BVTs. A maioria dos trabalhos da literatura utiliza uma distribuição uniforme de BVTs entre os nós e um dimensionamento empírico. Esta estratégia de distribuição uniforme de BVTs entre os nós da rede será referenciada neste trabalho como *BVTs Evenly Distributed* (BED). Este trabalho propõe

uma solução para o dimensionamento e distribuição de BVTs na rede com o objetivo de reduzir o *Capital Expenditure* (CapEx) e a Potência de Consumo Energético (PCE) sem comprometer o atendimento das requisições. Com o algoritmo proposto, o número de BVTs por nó é variável, isto se torna mais importante considerando um tráfego distribuído de maneira não uniforme entre os pares de nós da rede, o que é consistente com um cenário mais realista.

3.2.1 Trabalhos relacionados

Alguns trabalhos na literatura abordam EONs com tráfego estático (TANG et al., 2020b; HABIBI; BEYRANVAND, 2019; MAJUMDAR; PAL; DE, 2016; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015). Neste cenário, os instantes de chegada e a duração das requisições são previamente conhecidos, desta forma, é possível determinar precisamente quantos BVTs serão necessários em cada nó da rede. Nas EONs com tráfego dinâmico, estas informações não são conhecidas previamente. Nesta situação, as operadoras de rede possuem no máximo uma estimativa da carga a que a rede será submetida, isto torna mais relevante o problema de dimensionamento e distribuição de BVTs na rede.

A Tabela 3 apresenta o número de BVTs por nó utilizado por um conjunto de trabalhos que abordam EONs com tráfego dinâmico. Os trabalhos apresentados na Tabela 3 são focados nos problemas de alocação de recursos em EONs. Dentre eles, apenas (ZHANG et al., 2018) examinou o comportamento da rede sob diferentes condições de disponibilidade de BVTs. Os trabalhos (MINA; AKBAR; ALIZADEH, 2020; ZHANG et al., 2015a) consideraram 15 BVTs por nó na rede, os autores não mencionam como este número foi determinado. Já os trabalhos (FONTINELE et al., 2017; FAN; QIU; CHAN, 2015; LEE; KIM, 2019; PATEL et al., 2020) não consideram uma limitação na quantidade de BVTs disponíveis, nestes trabalhos, não há bloqueios de requisição por falta de BVT.

Tabela 3 – Disponibilidade de BVTs por nó considerada em trabalhos que abordam EON com tráfego dinâmico.

Trabalho	Quantidade de BVTs por nó
(MINA; AKBAR; ALIZADEH, 2020)	15
(ZHANG et al., 2018)	4-60
(FONTINELE et al., 2017)	Ilimitado
(ZHANG et al., 2015a)	15
(FAN; QIU; CHAN, 2015)	Ilimitado
(LEE; KIM, 2019)	Ilimitado
(PATEL et al., 2020)	Ilimitado

Fonte: o autor (2021)

A quantidade de BVTs implantados na rede reflete diretamente no CapEx, além disso, durante a fase de operação da rede também irá impactar na PCE e consequentemente no *Operational Expenditure* (OpEx). Dependendo do algoritmo de agregação de tráfego e da distribuição de tráfego na rede, alguns nós da rede podem necessitar de mais BVTs que outros. Este trabalho propõe um algoritmo para dimensionamento e distribuição de BVTs chamado FNBN. De acordo com nosso levantamento bibliográfico, não existem estratégias específicas para dimensionamento e distribuição de BVTs em EONs com tráfego dinâmico na literatura. A Seção 6.3 apresentará um estudo de avaliação de desempenho comparando o FNBN à estratégia BED que consiste na distribuição uniforme de BVTs entre os nós da rede. A BED condiz com o que foi aplicado nos trabalhos apresentados na Tabela 3.

3.2.2 Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization

O FNBN utiliza simulação computacional para obter a utilização média de BVTs por nó em um cenário com disponibilidade potencialmente infinita, na sequência, utiliza estes dados para calcular a proporção de BVTs por nó, com isto, é resolvido o problema de distribuição. Em seguida o problema de dimensionamento é resolvido aumentando gradualmente a disponibilidade de BVTs na rede até que seja atingido um limiar aceitável de Bloqueio de Banda devido à Ausência de BVTs (BB_{ab}) definido previamente.

O problema de distribuição de BVTs consiste em determinar a proporção de BVTs para cada nó (PBN), o FNBN ataca primeiramente este problema utilizando o Algoritmo 2. Nas linhas 2-4, a quantidade de BVTs por nó (NBN) é inicializada como potencialmente infinita para todos os nós da rede. Logo a seguir, na linha 5 o procedimento ‘simulação(PS,NBN)’ consiste em uma simulação computacional considerando os parâmetros de simulação (topologia, solução de agregação de tráfego, solução RMSA e carga na rede) e o NBN . Na prática, RS irá receber a média dos resultados obtidos através de 10 replicações do experimento. Em seguida na linha 6 é extraída a utilização média de BVTs por nó UBN . Na linha 7 é calculada a quantidade total de BVTs utilizados (UT). Nas linhas 8-10 a proporção de BVTs por nó (PBN) é calculada dividindo a utilização média de BVTs de cada nó pela quantidade total de BVTs utilizados na rede.

Após o solucionamento do problema de distribuição de BVTs através do Algoritmo 2, o FNBN determina a quantidade de BVTs a serem implantados em cada nó de acordo com o Algoritmo 3. Além dos parâmetros de simulação (PS) e da proporção de BVTs por nó (PBN), o Algoritmo 3 também recebe como entrada um limiar aceitável (L) para o BB_{ab} . Na linha 2 é inicializada a quantidade total de BVTs na rede ($NBVTs$), o Algoritmo 3 parte de um valor correspondente a 8 vezes a quantidade de nós da rede, valores abaixo disto provocam BB acima de 10% o que está fora dos limiares aceitáveis. A seguir, na linha 3 é definido o incremento que será feito no $NBVTs$ a cada iteração (ST), este valor foi definido no Algoritmo 3 como 2 vezes a quantidade de nós. Quanto menor o valor de ST ,

Algoritmo 2: FNBN - Cálculo da distribuição de BVTs

Entrada: PS (Pâmetros de Simulação)
Saída: PBN

```

1 início
2   para cada  $n \in \{Nós\ da\ rede\}$  faça
3     |  $NBN_n = \infty$ 
4   fim
5   RS = simulação(PS,NBN)
6    $UBN = utilizacaoBVTsPorNo(RS)$ 
7    $UT = \sum_n UBN_n \mid n \in \{Nós\ da\ rede\}$ 
8   para cada  $n \in \{Nós\ da\ rede\}$  faça
9     |  $PBN_n = \frac{UBN_n}{UT}$ 
10  fim
11  retorna  $PBN$ 
12 fim
```

mais refinada será a busca pela quantidade ideal de BVTs. Nas linhas 5-7 é calculado o número de BVTs por nó de acordo com o $NBVTs$ e a PBN , na sequência uma simulação é feita para ver se o $NBVTs$ é suficiente para atingir BB_{ab} inferior ao L . Caso contrário, o $NBVTs$ é incrementado e o processo se repete.

Algoritmo 3: FNBN - Cálculo do número de BVTs por nó

Entrada: PS (Pâmetros de simulação), L (Limiar aceitável para BB_{ab}), PBN
 (Proporção de BVTs por nó)
Saída: NBN (Número de BVTs por nó)

```

1 início
2    $NTBVTs = 8 \cdot quantidadeNos(PS)$ 
3    $ST = 2 \cdot quantidadeNos(PS)$ 
4   repita
5     | para cada  $n \in \{Nós\ da\ rede\}$  faça
6       |  $NBN_n = NTBVTs \cdot PBN_n$ 
7     fim
8     RS = simulação(PS,NBN)
9      $BBAB = bloqueioBandaAusênciaBVTs(RS)$ 
10    |  $NTBVTs = NTBVTs + ST$ 
11  até  $BBAB < L$ 
12  retorna  $NBN$ 
13 fim
```

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O KSP é um algoritmo de roteamento amplamente utilizado pelos trabalhos da literatura para prover um conjunto de rotas alternativas, a escolha final da rota que irá ser utilizada para um novo circuito é feita por ordem de tamanho, ordem aleatória ou de acordo com alguma política proposta no contexto da solução RMSA. O KBP é uma

solução de roteamento proposta neste trabalho capaz de substituir o KSP nas soluções RMSA já propostas na literatura e em soluções futuras. O principal diferencial do KBP é o oferecimento de rotas alternativas que promovem maior balanceamento de carga, para isto, é feito um ajuste durante a fase de planejamento da EON.

O FNBN é uma solução para dimensionamento/distribuição de BVTs em EON. Sob o nosso conhecimento, ainda não existem outras propostas para o dimensionamento/distribuição de BVTs na literatura. De acordo com o levantamento bibliográfico realizado, alguns trabalhos determinam a quantidade de BVTs por nó de maneira empírica e outros não consideram uma restrição na quantidade de BVTs. Entretanto, tal estratégia é importante para a redução do CapEx e do OpEx conforme foi discutido no Capítulo 2, Seção 2.3.

O KBP e o FNBN são soluções para problemas diferentes em EON, entretanto, possuem algumas características em comum: são executadas durante a fase de planejamento (o KBP também é usado na fase de operação) e impactam no BB e no PCE. Além disso, os algoritmos de alocação de recursos, incluindo o KBP, influenciam o dimensionamento/distribuição de BVTs determinado pelo FNBN.

4 SOLUÇÕES PARA AGREGAÇÃO DE TRÁFEGO

Este capítulo apresenta as seguintes soluções para o problema de agregação de tráfego em *Elastic Optical Networks* (EONs): Algoritmo de agregação de tráfego *Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph* (MTGAG), as políticas de agregação de tráfego adaptativas e cientes de camada física *Weight Adjustment with Multilayer Perceptron Network* (WAMLP) e *Weight Adjustment with Simulated Annealing* (WASA). Além destas soluções, também é apresentado o mecanismo de potencialização da agregação de tráfego *Spectrum Spacing for Traffic Grooming* (SSTG). Todas estas soluções são propostas no contexto desta tese de doutorado. De maneira análoga ao Capítulo 3, aqui são enfatizadas as soluções propostas e os trabalhos relacionados uma vez que os respectivos problemas são abordados no Capítulo 2. A Seção 4.1 apresenta o MTGAG e as políticas adaptativas, a Seção 4.2 apresenta os mecanismos para potencialização da agregação de tráfego e a proposta SSTG, por fim, a Seção 4.3 apresenta as considerações finais do Capítulo.

4.1 PROPOSTA DE ALGORITMO PARA AGREGAÇÃO DE TRÁFEGO E POLÍTICAS ADAPTATIVAS

Uma Solução de Agregação de Tráfego (SAT) consiste num conjunto de circuitos que podem ser utilizados para atender a uma determinada requisição de um cliente. A função dos algoritmos de agregação de tráfego é determinar uma SAT para cada requisição que chega à EON. Alguns algoritmos de agregação de tráfego utilizam uma política predefinida e indissociável do próprio algoritmo, outros permitem a adoção de diferentes políticas de agregação de tráfego.

As políticas de agregação de tráfego podem levar em consideração diversos fatores. Neste trabalho foram considerados: saltos físicos, saltos virtuais, número de slots utilizados, números de novos circuitos, *Signal to Noise Ratio* (SNR) dos circuitos da SAT e impacto no SNR dos demais circuitos ativos. A combinação entre estes fatores e a importância dada a cada um durante a tomada de decisão, caracteriza a política de agregação de tráfego. Uma das hipóteses levantadas neste trabalho é que para cada cenário, existe uma política de agregação de tráfego ótima, ou seja, que resulta na menor Bloqueio de Banda (BB). O cenário referido corresponde à topologia, disponibilidade de recursos e carga ao qual a EON é submetida. Os experimentos apresentados no Capítulo 6 corroboram esta hipótese.

No contexto deste trabalho são propostos um algoritmo de agregação de tráfego chamado MTGAG e duas políticas de agregação de tráfego cientes de camada física: a WASA e a WAMLP. As políticas propostas utilizam técnicas de inteligência artificial para ajustar

a importância dada a cada fator de acordo com o cenário em que são aplicadas.

4.1.1 Trabalhos relacionados

O problema da agregação de tráfego tem sido explorado por diversos trabalhos na literatura visando a otimização na utilização dos recursos das EONs (ZHANG et al., 2015a; MINA; AKBAR; ALIZADEH, 2020; ZHANG; MARTEL; MUKHERJEE, 2013; ZHANG et al., 2018; MAJUMDAR; PAL; DE, 2016; DHARMAWEERA et al., 2016). Em (MINA; AKBAR; ALIZADEH, 2020; ZHANG; MARTEL; MUKHERJEE, 2013; ZHANG et al., 2018), os autores utilizam algoritmos de agregação de tráfego baseados em grafos auxiliares. Estes grafos são baseados na topologia, circuitos ativos e recursos espectrais disponíveis. A escolha de uma rota no grafo auxiliar determina os circuitos ativos e novos circuitos a serem criados para atender uma determinada requisição. Em geral, é possível utilizar diferentes políticas de agregação de tráfego ajustando os pesos das arestas nos grafos auxiliares. As políticas de agregação de tráfego *Minimizing the number of Physical Hops* (MPH), *Minimizing the number of Virtual Hops* (MVH) e *Minimal Spectrum consumption* (MS) estão entre as políticas avaliadas nestes trabalhos.

De maneira geral, as propostas de algoritmos de agregação de tráfego encontradas na literatura utilizam políticas de agregação de tráfego predefinidas de maneira empírica. Isto significa que os fatores considerados na tomada de decisão são escolhidos baseado na expertise de um especialista. Mesmo os trabalhos que avaliam diferentes políticas (ZHANG; MARTEL; MUKHERJEE, 2013; ZHANG et al., 2018; MINA; AKBAR; ALIZADEH, 2020), se limitam a analisar qual política apresenta melhor desempenho em cada cenário.

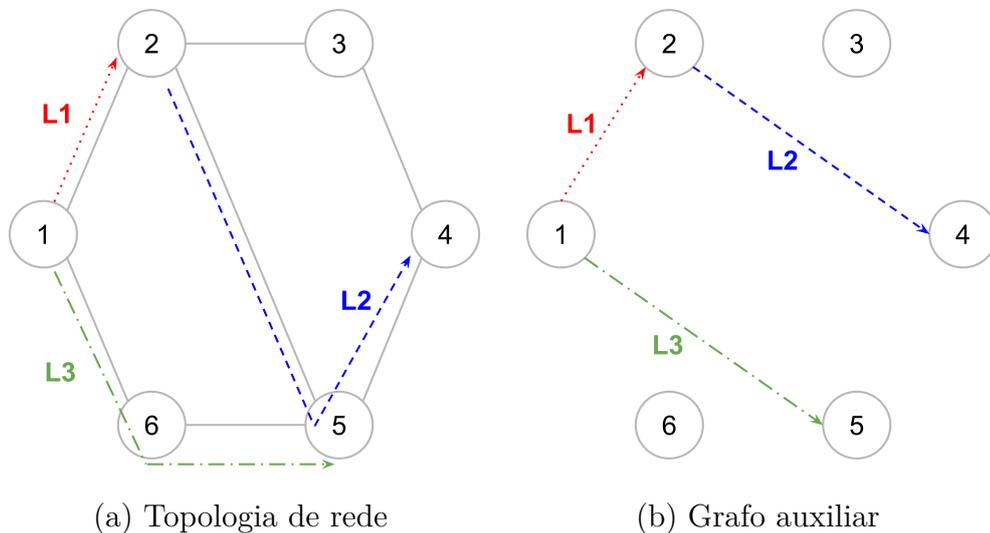
O MTGAG proposto neste trabalho permite a adoção de políticas de agregação de tráfego que consideram diversos fatores, inclusive informações da camada física. Além disso, o MTGAG atua de maneira isolada da solução *Routing, Modulation and Spectrum Allocation* (RMSA). Isto significa que é possível combinar o MTGAG com qualquer solução RMSA proposta na literatura. A operadora de rede fica livre para utilizar uma solução RMSA *impairment-aware, fragmentation aware*, ou qualquer outra classe de soluções RMSA. Já as políticas WASA e WMLP são específicas para o MTGAG. Estas políticas ajustam os pesos de cada fator durante a fase de planejamento da rede visando a minimização do BB. As políticas de agregação adaptativas propostas são comparadas a outras soluções disponíveis na literatura na Seção 6.4.

4.1.2 Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph

O funcionamento do MTGAG, assim como a maioria dos algoritmos de agregação de tráfego é simples e direto, a sofisticação neste caso fica por conta das políticas de

agregação de tráfego associadas a ele. No instante da chegada de uma nova requisição, o MTGAG cria um grafo auxiliar onde os vértices correspondem aos nós da topologia de rede física e as arestas correspondem a circuitos ativos ou potenciais novos circuitos entre cada par de nós. A seguir, o tradicional *Shortest Path First* (SPF) de Dijkstra (CORMEN et al., 2009) é executado no grafo auxiliar. Cada aresta escolhida pelo SPF corresponde a um circuito ativo ou um novo circuito que deverá ser criado. Desta forma, é determinada a SAT que será utilizada para atender à requisição. Uma topologia com alguns circuitos ativos e o grafo auxiliar correspondente são ilustrados na Figura 9. Neste exemplo, foram omitidas as arestas correspondentes aos potenciais novos circuitos para cada par de nós para facilitar a visualização.

Figura 9 – Topologia de rede com circuitos estabelecidos e grafo auxiliar correspondente.



Fonte: o autor (2021)

O custo de cada aresta no grafo auxiliar é calculado de acordo com a Equação 4.1 considerando os seguintes fatores: saltos físicos (ph), saltos virtuais (vh), número de slots utilizados (ss), números de novos circuitos (nl), SNR dos circuitos da SAT (snr) e impacto no SNR dos demais circuitos ($snri$). As constantes W_{ph} , W_{vh} , W_{ss} , W_{nl} , W_{snr} , W_{snri} determinam a importância de cada fator na escolha da SAT para cada requisição. Por exemplo, para implementar uma política que leve em consideração apenas a utilização de espectro, basta utilizar $W_{ss} = 1$ e $W_{ph} = W_{vh} = W_{nl} = W_{snr} = W_{snri} = 0$.

$$CF = W_{ph} * ph + W_{vh} * vh + W_{ss} * ss + W_{nl} * nl + W_{snr} * snr + W_{snri} * snri \quad (4.1)$$

Uma política de agregação de tráfego pode ser representada pela tupla $(W_{ph}, W_{vh}, W_{ss}, W_{nl}, W_{snr}, W_{snri})$. Neste trabalho é definido um problema de busca que consiste em encontrar a tupla $(x_{ph}, x_{vh}, x_{ss}, x_{nl}, x_{snr}, x_{snri})$ que aplicada à função de custo do

MTGAG, resulte no menor BB possível em um determinado cenário. Este problema é referenciado como MTGAG *tuning*.

A escolha do valor adequado para cada peso deve levar em consideração o cenário em que o MTGAG está sendo aplicado. Por exemplo, em uma topologia com enlaces mais longos é necessário priorizar o SNR (W_{snr} e W_{snri}) por conta do alcance óptico. Em outro cenário, onde há baixa disponibilidade de *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs), faz-se necessário evitar a criação de novos circuitos na rede aumentando o valor de W_{nl} . Entretanto, determinar todos os pesos do MTGAG de maneira empírica não é uma tarefa simples, portanto, devem ser utilizadas soluções computacionais.

Dada uma política $P1(x_{ph}, x_{vh}, x_{ss}, x_{nl}, x_{snr}, x_{snri})$ e uma política $P2$ obtida dividindo os pesos de $P1$ por um denominador comum $d \neq 0$. Se uma SAT S1 possui menor custo que a SAT S2 com a política $P1$, ela também possuirá menor custo que S2 com a política $P2$. Isto significa que, ao dividir todos os pesos por um denominador comum, a política resultante é equivalente à primeira. Com isto, pode-se afirmar que qualquer política P possui uma política P' equivalente onde todos os pesos estão entre 0 e 1. Para encontrar P' basta dividir todos os pesos pelo maior peso de P .

O MTGAG *tuning* consiste numa busca em um universo de 6 dimensões, como foi demonstrado, não há problema em limitar os pesos entre 0 e 1. Entretanto, uma busca por força bruta requer a discretização do espaço de busca. Utilizando apenas os valores 0, 0, 1, 0, 2, 0, 3, 0, 4, 0, 5, 0, 6, 0, 7, 0, 8, 0, 9 e 1, ainda haveriam 11^6 políticas para serem avaliadas. Nos experimentos realizados neste trabalho, cada política leva aproximadamente 1 hora para ser avaliada através de uma simulação, ou seja, a utilização de uma simples busca por força bruta é impossível sob estas condições. As soluções WASA e WAMLP apresentadas nas Subseções 4.1.3 e 4.1.4 resolvem o MTGAG *tuning* através de técnicas de inteligência artificial.

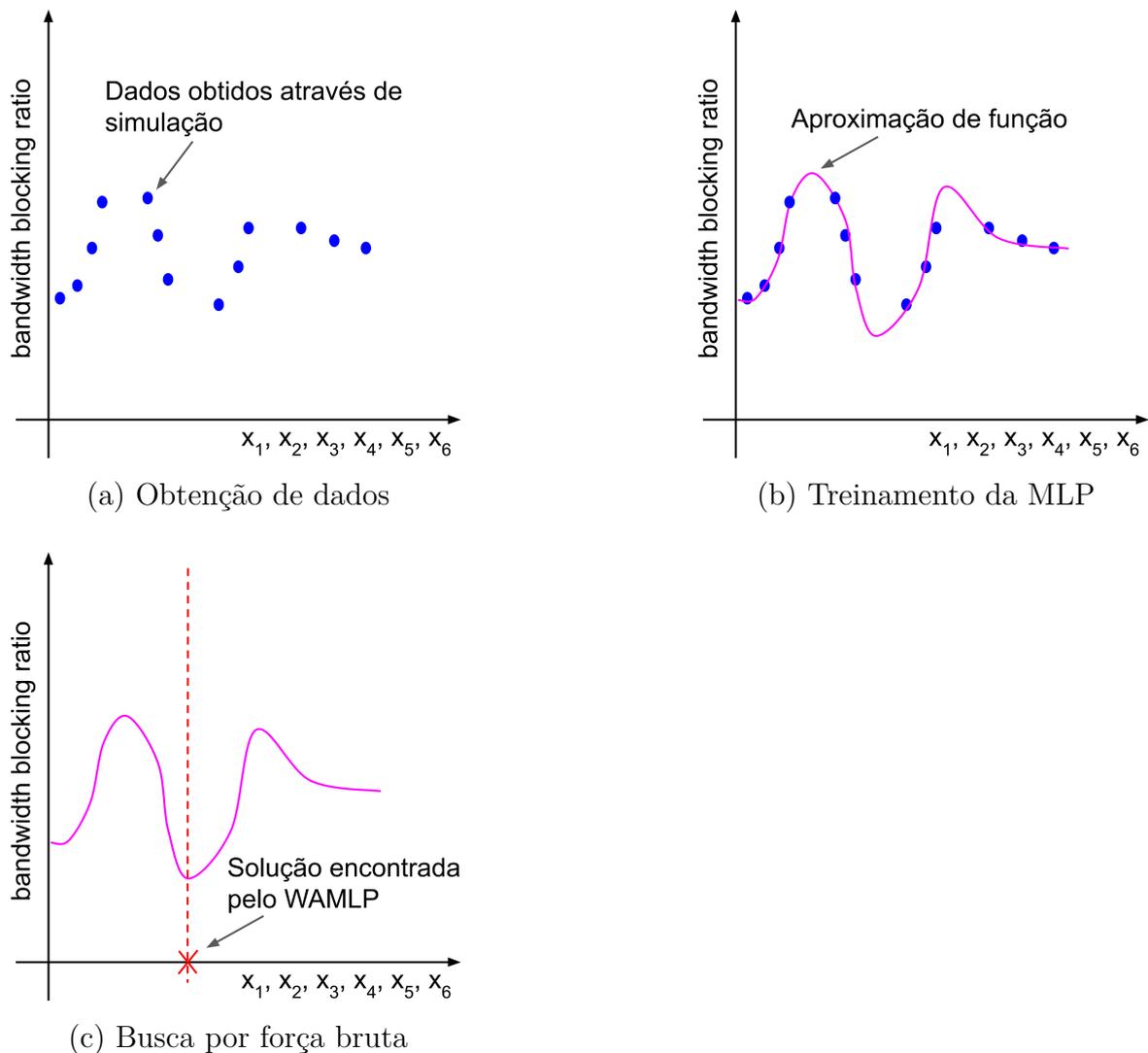
4.1.3 WAMLP

É possível obter o BB para uma determinada política de agregação de tráfego ($x_{ph}, x_{vh}, x_{ss}, x_{nl}, x_{snr}, x_{snri}$) através de uma simulação computacional, entretanto, conforme discutido na Subseção 4.1.2, este processo é computacionalmente custoso, tornando inviável uma busca por força bruta. Os pesos da função de custo do MTGAG possuem relação com o BB, entretanto, esta relação não pode ser determinada de maneira empírica. O WAMLP faz uma aproximação da função que descreve esta relação através de uma *Multi-layer Perceptron Network* (MLP) (HAYKIN, 2001; GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016). Após o treinamento da MLP, é possível estimar o BB sem a necessidade de uma simulação, isto viabiliza a realização de uma busca por força bruta.

A WAMLP possui três passos: a) Obter dados (exemplos de políticas e seus respectivos BBs) através de simulação, b) Treinar e testar a MLP alimentada pelos dados obtidos na

etapa anterior e c) Realizar uma busca por força bruta para encontrar a política com menor estimativa de BB. Os passos do WAMLP são ilustrados na Figura 10. As 6 dimensões do MTGAG *tuning* foram resumidas em apenas um eixo para facilitar a visualização. A complexidade computacional do WAMLP nos passos a), b) e c) são respectivamente $O(U)$, $O(E \cdot U \cdot N)$ e $O(B^6)$. U é a quantidade de dados utilizados no treinamento da MLP, E é o número de épocas na fase de treinamento, N é o número total de neurônios, por fim, B é o número de valores discretos utilizados na busca por força bruta. Nos experimentos realizados neste trabalho, o tempo gasto nas etapas b) e c) são desprezíveis em relação ao tempo gasto na etapa a). Isto ocorre devido ao alto custo computacional das simulações utilizadas na obtenção dos dados para o treinamento da MLP.

Figura 10 – Passos do WAMLP.



Fonte: o autor (2021)

A WAMLP utiliza uma MLP com duas camadas ocultas, nessas camadas, o método de ativação dos neurônios é o *relu* (HAYKIN, 2001; CHOLLET et al., 2015). Já na camada de

saída, há apenas um neurônio com método de ativação linear. Os pesos da própria MLP são ajustados através do algoritmo *backpropagation* (HAYKIN, 2001) utilizando o erro absoluto médio como função de custo. Também foi utilizado o otimizador *Adam* (CHOLLET et al., 2015). A quantidade de camadas, neurônios e épocas devem ser ajustadas para aumentar a precisão da estimativa dos BBs a fim de tornar o WAMLP mais assertivo na resolução do MTGAG *tuning*. Neste trabalho, foram utilizados 500 neurônios em cada camada oculta e 1600 épocas durante a fase de treinamento.

4.1.4 WASA

A *Simulated Annealing* é uma metaheurística baseada em um processo da termodinâmica que consiste em aquecer um material e posteriormente resfriá-lo lentamente para um estado de baixa energia (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983). Neste trabalho é proposta uma solução para o MTGAG *tuning* baseada nesta metaheurística, a WASA. O algoritmo parte de uma solução (política) inicial, a partir deste ponto, a cada iteração são realizadas sucessivas perturbações na solução para encontrar outras soluções com melhor desempenho.

Nas primeiras iterações, a altas temperaturas, a probabilidade de aceitar soluções com desempenho inferior ao atual é maior. Isto ajuda o algoritmo a fugir de ótimos locais. Por outro lado, com o passar das iterações, o algoritmo tende a aceitar apenas soluções que apresentam melhor desempenho, a fim de refinar uma boa solução encontrada. A probabilidade de aceitar uma solução com desempenho inferior ao obtido pela solução atual é dada pela temperatura (T) e a diferença entre o desempenho da solução atual e da nova solução (gerada pela perturbação).

O processo inteiro pode ser reiniciado diversas vezes para aprimorar o resultado, isto é chamado de reaquecimento. A WASA é descrita no Algoritmo 4. O procedimento *perturbar(S)* na linha 12 do Algoritmo 4 é descrito no Algoritmo 5. Este procedimento altera uma solução para uma solução diferente porém próxima. A WASA possui complexidade $O(R \cdot A \cdot P)$, onde R é o número de reaquecimentos, A é o número máximo de iterações e P é o número máximo de perturbações por iteração.

Algoritmo 4: *Weight Adjustment with Simulated Annealing.*

Entrada: T_0, R, A, P, α
Saída: *pesos*

```

1 início
  // Inicialização
2 pesos  $\leftarrow \emptyset$ 
3  $S \leftarrow (\text{rand}(), \text{rand}(), \text{rand}(), \text{rand}(), \text{rand}(), \text{rand}())$  // Solução inicial
4  $MR \leftarrow \infty$  // Melhor resultado
5
6 para cada  $r \in \{0 < n \leq R \mid n \in \mathbb{N}\}$  faça
  // Início do reaquecimento
7  $T \leftarrow T_0$ 
8  $j \leftarrow 1$ 
9 repita
  // Início da iteração
10  $nSucesso \leftarrow 0$ 
11 para cada  $i \in \{0 < n \leq P \mid n \in \mathbb{N}\}$  faça
12  $S_i \leftarrow \text{perturbar}(S)$ 
13  $\Delta F_i \leftarrow \text{avaliar}(S_i) - \text{avaliar}(S)$ 
14 se  $\Delta F_i \leq 0$  or  $(e^{-\frac{\Delta F_i}{T}} > \text{random}())$  então
15    $S \leftarrow S_i$ 
16    $nSucesso \leftarrow nSucesso + 1$ 
17   se  $\text{avaliar}(S) < MR$  então
18      $MR \leftarrow \text{avaliar}(S)$ 
19      $\text{weights} \leftarrow S$  // Guarda sempre a melhor solução
20   fim
21 fim
22 fim
23  $T \leftarrow T \times \phi$ 
24  $j \leftarrow j + 1$ 
25 até  $nSucesso = 0$  or  $j > A$ 
26 fim
27 retorna pesos
28 fim

```

Algoritmo 5: Perturbar solução.

Entrada: Sl
Saída: Slp

```
1 início
   // Inicialização
2    $S_p \leftarrow \emptyset$ 
3   para cada  $i \in \{ph, vh, ss, nl, snr, snri\}$  faça
4      $v \leftarrow (rand() - 0,5) \times 0,5$  // Variação entre -0,25 e 0,25
5      $Slp_i \leftarrow Sl_i + v$ 
6     se  $Slp_i < 0$  então
7        $Slp_i \leftarrow 0$ 
8     fim
9     se  $Slp_i > 1$  então
10       $Slp_i \leftarrow 1$ 
11    fim
12  fim
13  retorna  $Slp$ 
14 fim
```

4.2 PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA POTENCIALIZAÇÃO DA AGREGAÇÃO DE TRÁFEGO

As soluções apresentadas na Seção 4.1 atuam diretamente no solucionamento do problema de agregação de tráfego apresentado no Capítulo 2, Seção 2.4. Porém, existe uma outra classe de soluções que impactam diretamente na capacidade de agregação de tráfego da rede que não são em sua essência soluções de agregação de tráfego, tampouco podem ser consideradas soluções RMSA pois não são focadas neste problema. São os mecanismos para potencialização da agregação de tráfego. Em geral, estes mecanismos atuam juntamente com as soluções RMSA para facilitar o reaproveitamento de circuitos ativos nas futuras requisições.

No âmbito desta tese de doutorado é proposto um mecanismo para potencialização da agregação de tráfego chamado SSTG. O mecanismo proposto pode ser associado a quaisquer soluções de agregação de tráfego e RMSA. O SSTG facilita a expansão de circuitos no futuro influenciando as soluções RMSA durante o estabelecimento de novos circuitos.

4.2.1 Trabalhos relacionados

Como apresentado na Seção 4.1, diversos trabalhos na literatura apresentam algoritmos e políticas para agregação de tráfego. Também estão disponíveis na literatura diversas soluções RMSA, entretanto, existem poucas soluções exclusivas para a potencialização da agregação de tráfego. Em (ZHANG; MARTEL; MUKHERJEE, 2013), os autores propõem um mecanismo para potencialização da agregação de tráfego chamado *Spectrum Reservation* (SR), este mecanismo influencia as soluções RMSA para criar circuitos com capacidade de taxa de transmissão maior que a necessária no momento.

Em (ZHANG et al., 2015a), o SR foi refinado dando origem a dois outros mecanismos de potencialização da agregação de tráfego: o *Spectrum Reservation for each Light Path* (SRLP) e o *Spectrum Reservation for each Node Pair* (SRNP). O SRLP promove a reserva de espectro em cada circuito da rede, já o SRNP, considera um limite de reserva de espectro para cada par de nós da rede, isto é feito para evitar o esgotamento dos recursos espectrais da rede. Quando este limite é alcançado para um determinado par de nós (S,D), o SRNP não faz mais reserva de espectro óptico nos próximos circuitos estabelecidos para este mesmo par. O SRNP também é utilizado em (MINA; AKBAR; ALIZADEH, 2020).

Os mecanismos SR, SRLP e SRNP foram propostos em contextos onde apenas um formato de modulação é utilizado. Desta forma, a reserva de espectro é equivalente à reserva de capacidade de taxa de transmissão. Para adaptar estes mecanismos para atuar com soluções RMSA, onde normalmente são considerados diversos formatos de modulação, é mais adequado utilizar a reserva de capacidade de taxa de transmissão. Neste trabalho

estes mecanismos foram utilizados desta forma, porém todo o funcionamento bem como a nomenclatura original foi mantida.

O princípio de funcionamento dos mecanismos que fazem reserva de espectro é o mesmo: caso um circuito C seja alocado com a capacidade mínima necessária para atender a uma nova requisição, em um momento futuro é provável que este circuito não possa ser reaproveitado para atender outra requisição uma vez que a alocação de novos circuitos e a fragmentação do espectro irão dificultar a expansão de C . Para evitar esta situação, durante a criação dos circuitos, os mecanismos de reserva de espectro influenciam as soluções RMSA para alocar circuitos com capacidade maior do que a necessária no momento, visando o reaproveitamento do circuito no futuro. A diferença entre o SR, SRLP e SRNP fica por conta de o quão maior é esta capacidade e quando isto é feito. Um estudo de avaliação de desempenho comparando estes mecanismos ao SSTG é apresentado na Seção 6.5.

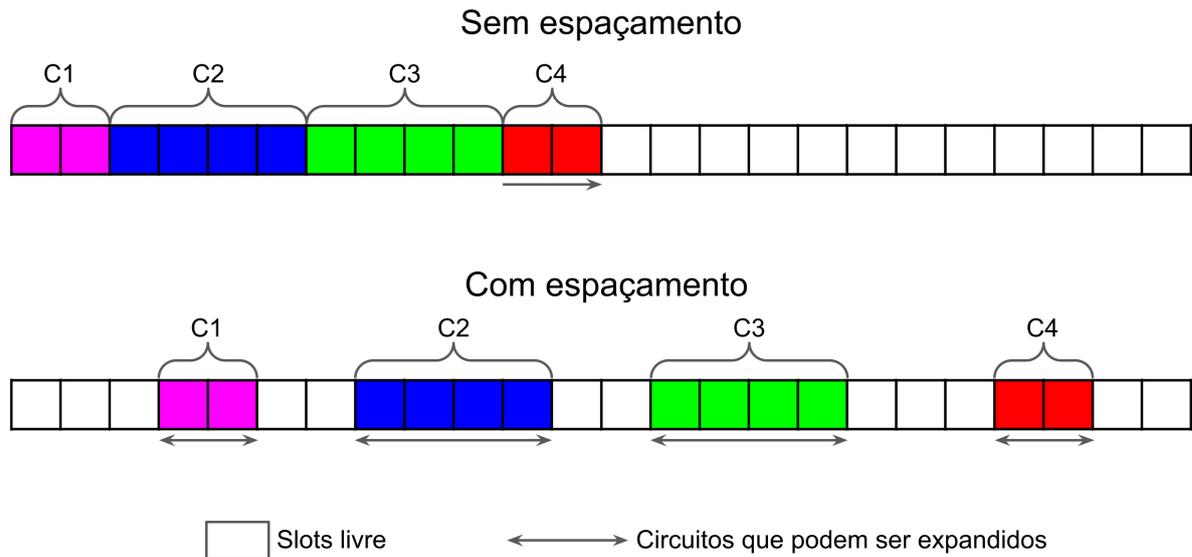
4.2.2 SSTG

O mecanismo SSTG, proposto neste trabalho, possui um princípio de funcionamento diferente dos mecanismos SR, SRLP e SRNP. O SSTG influencia a solução RMSA causando espaçamento entre a faixa de espectro alocada para cada circuito. Isto aumenta a probabilidade de que existam slots adjacentes no futuro, o que por sua vez, potencializa a expansão dos circuitos para atender novas requisições. Diferentemente dos mecanismos de reserva de espectro, o novo circuito irá utilizar apenas a quantidade de espectro mínima necessária.

A Figura 11 ilustra dois cenários hipotéticos onde os circuitos C1, C2, C3 e C4 são alocados de duas maneiras diferentes no espectro óptico. No primeiro caso (sem espaçamento), os circuitos estão alocados de maneira mais condensada, no segundo caso (com espaçamento), os circuitos estão alocados de maneira mais espaçada. Quando alocados sem espaçamento, os circuitos C1, C2 e C3 não podem ser expandidos uma vez que não há slots adjacentes livres. Por outro lado, quando alocados com espaçamento, todos os circuitos representados podem ser expandidos. Isto por sua vez irá viabilizar o reaproveitamento dos circuitos ativos para atender à novas requisições no futuro.

O SSTG permite o ajuste do nível de espaçamento desejado através do parâmetro σ . Este parâmetro deve ser ajustado para cada cenário durante a fase de planejamento da rede. O Algoritmo 6 demonstra como o SSTG atua durante a criação de um novo circuito na fase de operação da rede. Inicialmente, sp recebe o valor de σ (linha 2), entretanto, caso a solução RMSA não encontre recursos disponíveis (linha 5), o valor de sp é reduzido e é feita uma nova tentativa. O processo se repete até que sejam encontrados recursos disponíveis para estabelecer o circuito (linha 6), ou, em último caso o bloqueio do novo circuito (linha 11).

Figura 11 – Circuitos alocados de duas formas diferentes.



Fonte: o autor (2021)

Algoritmo 6: SSTG.

Entrada: S, D, Tr

Saída: *Sucesso*

```

1 início
  // Inicialização
2    $sp \leftarrow \sigma$ 
3
4   enquanto  $sp > 0$  faça
5     se  $RMSA.buscarRecursos(S, D, Tr, sp)$  então
6       RMLSA.estabelecerCircuito()
7       retorna Verdadeiro
8     fim
9      $sp \leftarrow sp - 1$ 
10  fim
11  retorna Falso
12 fim

```

Tradicionalmente, a solução RMSA recebe apenas o nó de origem (S), o nó de destino (D) e a taxa de transmissão desejada (Tr) como parâmetros para buscar os recursos durante o estabelecimento de um novo circuito. Após a escolha do formato de modulação, a solução RMSA calcula a quantidade exata de slots de espectro necessária (ns), em seguida busca em cada enlace uma faixa de espectro respeitando as restrições de continuidade e contiguidade. A adoção do SSTG requer uma adaptação na solução RMSA para buscar uma faixa de espectro com quantidade de slots igual ou superior a $ns + sp$. Esta adaptação corresponde ao método ‘ $buscarRecursos(S, D, Tr, sp)$ ’ na linha 5 do Algoritmo 6. Após encontrar a faixa de espectro compatível, o circuito é estabelecido no centro desta faixa.

Desta forma, sp corresponde ao espaçamento que será provocado neste instante.

Conforme apresentado no Algoritmo 6, o funcionamento do SSTG durante a fase de operação da rede é simples, entretanto, o parâmetro σ (linha 2) precisa ser determinado durante a fase de planejamento da rede. Valores baixos de σ tendem a preservar as características da solução RMSA, entretanto, não provocam espaçamento suficiente para impactar na capacidade de expansão dos circuitos. Valores maiores de σ facilitam a expansão dos circuitos e ajudam a reduzir ruídos e interferências na camada física, entretanto, podem causar a fragmentação do espectro na rede, dificultando a criação de novos circuitos.

O valor σ deve ser ajustado de acordo com o cenário (topologia, carga na rede, disponibilidade de recursos, soluções de agregação de tráfego e RMSA) a fim de minimizar o BB. Neste trabalho nós propomos uma solução baseada em algoritmo guloso para encontrar o σ dentro de um intervalo. Esta solução é descrita no Algoritmo 7

O procedimento ‘avaliar(v)’ que aparece no Algoritmo 7 consiste em realizar uma simulação para obter o BB considerando $\sigma = v$. A Figura 12 ilustra como o Algoritmo 7 funciona. Para facilitar a visualização, o exemplo ilustrado considera apenas o intervalo entre 0 e 32. Inicialmente são avaliados 5 pontos equidistantes cobrindo todo o espaço de busca (0, 8, 16, 24 e 32). Em seguida, o valor com menor BB (24) passa a ser o centro do novo espaço de busca, além disso, o espaço de busca é reduzido pela metade e novamente são avaliados 5 pontos (16, 20, 24, 28 e 32). O processo é repetido enquanto o espaço de busca for maior que 4. No exemplo da Figura 12, o valor escolhido para σ é 22. No Algoritmo 7, a cada iteração, o espaço de busca é reduzido pelo menos pela metade. Com esta abordagem, são necessárias no máximo $1 + 2 \times \text{Log}_2(\text{Max} - \text{Min})$ simulações para determinar o valor de σ .

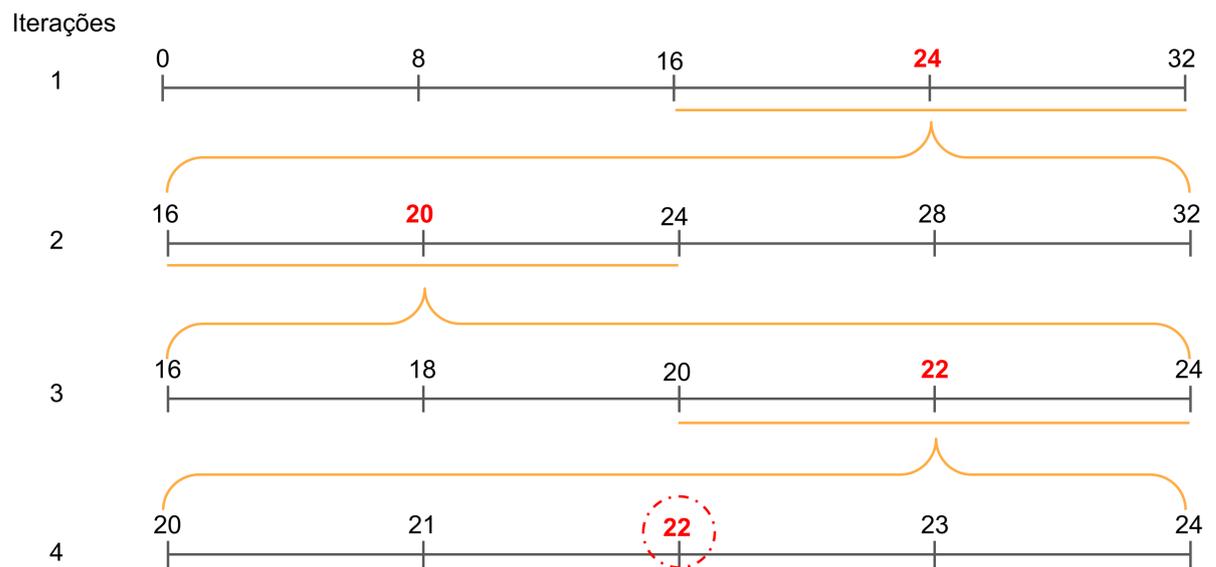
Algoritmo 7: Algoritmo guloso para ajuste do σ .

Entrada: Min, Max **Saída:** σ

```

1 início
2    $\sigma \leftarrow (Min + Max)/2$ 
3    $li \leftarrow Min$ 
4    $ls \leftarrow Max$ 
5   enquanto  $(ls - li) > 4$  faça
6      $candidatos \leftarrow [li, \frac{(li+\sigma)}{2}, \sigma, \frac{(\sigma+ls)}{2}, ls]$ 
7      $melhor \leftarrow 0$ 
8      $minBBR \leftarrow avaliar(candidatos[0])$ 
9     para cada  $i \in \{0 < n < 5 \mid n \in \mathbb{N}\}$  faça
10       $BBR \leftarrow avaliar(candidatos[i])$ 
11      se  $BBR < minBBR$  então
12         $minBBR \leftarrow BBR$ 
13         $melhor \leftarrow i$ 
14      fim
15    fim
16    se  $best = 0$  então
17       $li \leftarrow candidatos[0]$ 
18       $ls \leftarrow candidatos[1]$ 
19       $\sigma \leftarrow \frac{(li+ls)}{2}$ 
20    fim
21    senão
22      se  $best = 4$  então
23         $li \leftarrow candidatos[3]$ 
24         $ls \leftarrow candidatos[4]$ 
25         $\sigma \leftarrow \frac{(li+ls)}{2}$ 
26      fim
27      senão
28         $li \leftarrow candidatos[melhor - 1]$ 
29         $ls \leftarrow candidatos[melhor + 1]$ 
30         $\sigma \leftarrow candidatos[melhor]$ 
31      fim
32    fim
33  fim
34  retorna  $\sigma$ 
35 fim

```

Figura 12 – Representação gráfica das iterações do algoritmo guloso para ajuste do σ .

Fonte: o autor (2021)

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A agregação de tráfego reduz o desperdício de espectro óptico com bandas de guarda, reaproveita a capacidade de taxa de transmissão excedente nos circuitos, permite a utilização dos BVTs de maneira mais próxima da capacidade máxima suportada por eles e ainda reduz a quantidade de BVTs utilizados na rede. No entanto, para tirar o maior proveito possível destas vantagens, os algoritmos e políticas de agregação de tráfego devem ser adequados ao cenário em que são submetidos. O MTGAG é um algoritmo de agregação de tráfego que permite a implementação de diferentes políticas através do ajuste dos pesos de uma função de custo durante a fase de planejamento da rede. Entre os fatores considerados pelo MTGAG, está a SNR dos circuitos, desta forma é possível implementar políticas cientes de camada física. As soluções WAMLP e WASA consideram todos os fatores do MTGAG, além disso, elas se adaptam ao cenário em que são submetidas visando a minimização do BB.

O SSTG é um mecanismo de potencialização da agregação de tráfego baseado no espaçamento entre as faixas de espectro alocadas para cada circuito. Assim como outros mecanismos de potencialização da agregação de tráfego (SR, SRLP e SRNP), ele influencia diretamente a capacidade de agregação de tráfego da rede, porém não intervém nas tomadas de decisão dos algoritmos de agregação de tráfego. Estes mecanismos normalmente são adaptados para atuar em conjunto com as soluções RMSA, interferindo durante a criação de novos circuitos na rede. Vale destacar que a aplicação dos mecanismos SSTG, SRLP e SRNP só faz sentido em um cenário com agregação de tráfego, caso contrário, permaneceriam apenas os efeitos colaterais dos mecanismos que são a fragmentação do espectro no caso do SSTG e o esgotamento dos recursos espectrais no caso do SRLP e do SRNP.

5 MODELAGEM DA EON E MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Os aspectos apresentados no Capítulo 2 foram implementados na ferramenta *Slice Network Simulator* (SNetS) para viabilizar a realização dos experimentos. Este capítulo apresenta detalhes a respeito da modelagem de *Elastic Optical Network* (EON) utilizada. O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: A Seção 5.1 apresenta as técnicas de avaliação de desempenho bem como a justificativa para utilização de simulação computacional neste trabalho. A Seção 5.2 apresenta a ferramenta SNetS, utilizada na realização dos experimentos neste trabalho. A Seção 5.3 apresenta os modelos de camada física e consumo energético utilizados no SNetS. Neste trabalho foram utilizados dois tipos de distribuição de tráfego, ambos apresentados na Seção 5.5. Por fim, a Seção 5.6 apresenta as considerações finais do capítulo.

5.1 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

De maneira geral, a avaliação de desempenho de sistemas computacionais pode ser feita de três maneiras: i) medição em sistema real, ii) modelagem matemática, iii) simulação (JAIN, 1991). A avaliação através de medição exigiria a aquisição dos equipamentos e montagem da rede, o alto custo e complexidade deste método o torna inadequado para o planejamento de EONs. Mesmo que a EON já exista, a experimentação de novas soluções para alocação de recursos pode prejudicar o atendimento dos clientes da rede. Desta forma, este método é mais adequado para a monitoração do desempenho da rede durante a fase de operação.

Atualmente, a maioria dos trabalhos da literatura utilizam simulação para os estudos de avaliação de desempenho. Em (VAEZI; AKAR, 2015; KIM et al., 2015; ROSA et al., 2015) são utilizados modelos analíticos, entretanto, os cenários abordados nestes trabalho são simplificados. No geral consideram apenas um enlace e se limitam às métricas Bloqueio de Banda (BB), Utilização do Espectro (UE) e Fragmentação Externa (FE). Sob nosso conhecimento não há modelos analíticos propostos na literatura que viabilizem os experimentos com as soluções, topologias e métricas pretendidas. Desta forma, a simulação computacional é mais adequada para os estudos de avaliação de desempenho realizados neste trabalho.

5.2 SNETS

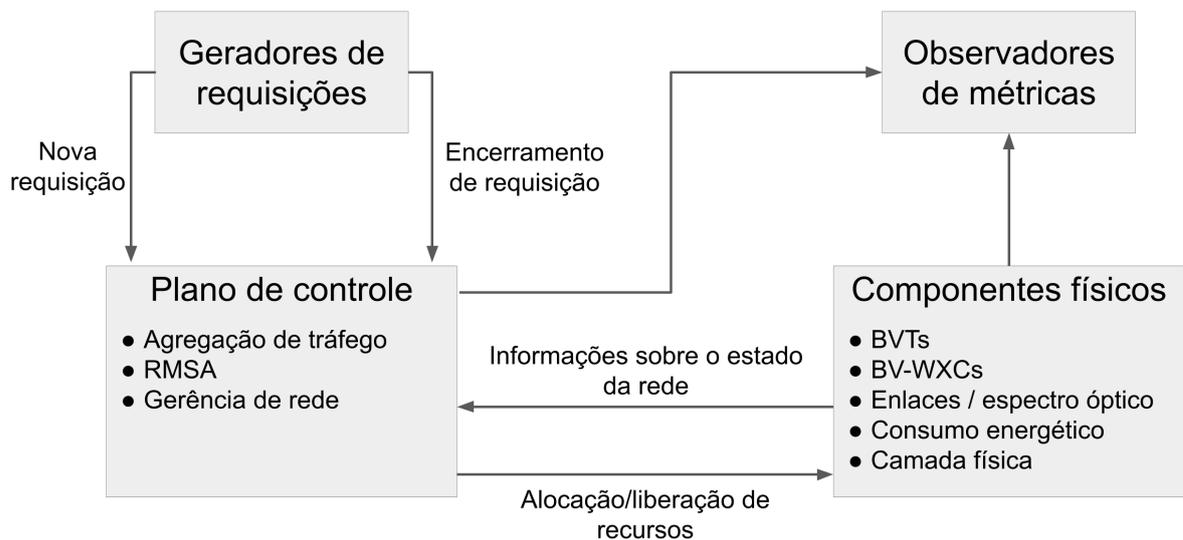
O SNetS é uma ferramenta de simulação voltada para redes ópticas elásticas. Esta ferramenta foi inicialmente desenvolvida em (SANTOS, 2015). Neste trabalho foi integrada a implementação do modelo de camada física desenvolvida em (FONTINELE, 2016). Tam-

bém foram implementados os modelos de consumo energético e agregação de tráfego, além de novas métricas de avaliação de desempenho.

O SNetS é composto de três módulos independentes: i) Simulador de eventos discretos, ii) Interface gráfica WEB (opcional) e iii) Assistente para compilação de resultados e criação de gráficos (opcional). O SNetS bem como a documentação completa da ferramenta estão disponíveis em (SANTOS, 2017).

A Figura 13 ilustra de forma simplificada como as EONs são modeladas no simulador de eventos discretos do SNetS. Na Figura 13 são ilustrados quatro componentes principais: os Geradores de Requisições (GRs), o plano de controle, os componentes físicos e os observadores de métricas. Detalhes a respeito do plano de controle e alguns componentes físicos são apresentados no Capítulo 2.

Figura 13 – Modelagem de EON utilizada no simulador de eventos discretos do SNetS.



Fonte: o autor (2021)

As requisições são modeladas como uma tupla (S, D, Tr) onde S é o nó de origem, D é o nó de destino e Tr é a taxa de transmissão requisitada. Na modelagem adotada, é utilizado um conjunto de GRs. Cada GR gera requisições para um único $par(S, D)$ e com uma única taxa de transmissão. O tempo entre os instantes de chegada de cada requisição gerada por um GR segue uma distribuição de *Poisson* com média λ . O tempo de duração das conexões requisitadas segue uma distribuição exponencial com média $1/\mu$.

Para gerar tráfego para diferentes $pares(S, D)$ e com diferentes taxas de transmissão são utilizados diversos GRs. Vale ressaltar que a distribuição de tráfego entre $pares(S, D)$ e larguras de banda é definida pelo conjunto de GRs adotados e os parâmetros λ e μ definidos individualmente para cada GR. Além disso, a Seção 5.5, apresenta metodologias para determinar os GRs para dois tipos de distribuição de tráfego. No Apêndice B, é especificado como é feita a definição dos GRs, algoritmos de alocação de recursos, parâmetros

de camada física e informações sobre a topologia da rede e a disponibilidade de recursos para um experimento no SNetS.

Para validar um modelo de simulação, normalmente é feita uma comparação com outra estratégia de avaliação de desempenho aplicada ao mesmo sistema. Entretanto, a complexidade intrínseca das EONs dificulta a criação de modelos analíticos, além disso, a tecnologia que viabiliza a implementação das EONs ainda é pouco amadurecida e custosa, o que dificulta a criação de *testbeds* para fazer medição. Como forma de verificação, foi realizado um estudo de avaliação de desempenho replicando os resultados obtidos com outra ferramenta de simulação em (WAN; HUA; ZHENG, 2012). Os resultados estão disponíveis no Apêndice A. Outros estudos de avaliação de desempenho com o objetivo de validar os modelos de consumo energético e camada física do SNetS são apresentados em (FONTINELE, 2021).

Durante a etapa inicial deste trabalho, foi realizado um levantamento das principais ferramentas para simulação de EONs disponíveis na literatura. Com isto, foram identificadas as seguintes ferramentas: i) *Complex Elastic Optical Network Simulator* (CEONS) (AIBIN; BLAZEJEWSKI, 2015), ii) *Elastic Optical Network Simulator* (EONS) (DELVALLE; ALFONZO; ROA, 2016), iii) MANTIS (KRETSIS et al., 2014), iv) *Simulator for Elastic Optical Networks* (SimEON) (CAVALCANTE; PEREIRA; ALMEIDA, 2017), v) SimRSA (SANTOS et al., 2014) e vi) *Optical Network Simulator* (ONS) (COSTA et al., 2016). A Tabela 4 apresenta uma comparação das ferramentas listadas incluindo o SNetS em termos de implementação e usabilidade.

Tabela 4 – Comparação de ferramentas de simulação em termos de implementação e usabilidade.

	CEONS	EONS	MANTIS	SimEON	SimRSA	ONS	SNetS
Ano de lançamento	2015	2015	2014	2017	2014	2016	2015
Linguagem	Java	Java	C++	C++	Java	Java	Java
Código aberto	Não	-	Não	Sim	Não	Sim	Sim
Paralelismo	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Simulações via WEB	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim

Fonte: o autor (2021)

Para implementar novos algoritmos de alocação de recursos e as particularidades dos modelos adotados é necessário adotar uma ferramenta com código fonte aberto. Entre as ferramentas levantadas, apenas o SimEON, o ONS e o SNetS se encaixam neste quesito. A Tabela 5 apresenta os modelos implementados em cada ferramenta de simulação.

A Tabela 6 apresenta as métricas de avaliação de desempenho disponíveis nas ferramentas de simulação. Além da métricas de BB frequentemente utilizada na literatura, o SNetS disponibiliza uma série de outras métricas que podem ser utilizadas para avaliar os custos e benefícios da EON e estudar o comportamento da rede de acordo com as soluções empregadas.

Tabela 5 – Modelos implementados nas ferramentas de simulação.

	CEONS	EONS	MANTIS	SimEON	SimRSA	ONS	SNetS
Tráfego estático	X		X		X		
Tráfego dinâmico	X	X		X		X	X
<i>Routing, Modulation and Spectrum Allocation</i> (RMSA)				X		X	X
Agregação de tráfego	X					X	X
Camada física	X		X	X			X
EON translúcida	X		X	X			X
Sobrevivência						X	X
Consumo energético				X		X	X

Fonte: o autor (2021)

Tabela 6 – Métricas de avaliação de desempenho disponíveis nas ferramentas de simulação.

	CEONS	EONS	MANTIS	SimEON	SimRSA	ONS	SNetS
Bloqueio de Requisições (BR)		X		X			X
Bloqueio de Banda (BB)	X					X	X
Utilização do Espectro (UE)			X		X	X	X
Utilização de BVTs (UB)			X		X	X	X
Utilização de regeneradores	X		X				X
Fragmentação Externa (FE)						X	X
Potência de Consumo Energético (PCE)			X	X		X	X

Fonte: o autor (2021)

A escolha do SNetS para a realização dos experimentos neste trabalho levou em consideração os aspectos apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6, bem como o *know-how* de utilização da ferramenta a partir de trabalhos desenvolvidos anteriormente.

5.3 MODELOS DE CAMADA FÍSICA E CONSUMO ENERGÉTICO

No Capítulo 2, são apresentados os principais conceitos das EONs incluindo aspectos da camada física, custos de implantação com dispositivos e custo de operação com consumo energético. Para considerar estes aspectos através de simulação, é necessário utilizar modelos capazes de estimar o *Signal to Noise Ratio* (SNR) dos circuitos e o consumo energético de cada dispositivo na rede. Os modelos adotados no SNetS são descritos a seguir.

5.3.1 Modelo de camada física

O modelo adotado neste trabalho considera os seguintes efeitos de camada física: i) *Amplified Spontaneous Emission* (ASE), ii) *Self-Channel Interference* (SCI) e iii) *Cross-Channel Interference* (XCI). O ASE é um ruído inserido no momento da amplificação do sinal óptico. Esta amplificação é necessária para compensar a atenuação que o sinal sofre ao longo do circuito. De maneira geral, quanto maior for o comprimento total do circuito, mais amplificações serão necessárias ao longo dos enlaces e conseqüentemente maior será

o ruído em decorrência do ASE. Além disso, ainda ocorrem os ruídos não lineares (SCI e XCI) quando o sinal se propaga pelas fibras ópticas. Neste trabalho, a SNR é utilizada para mensurar a *Quality of Transmission* (QoT) dos circuitos.

O cálculo da SNR do circuito i com rota r_i é expresso na Equação 5.1. I representa a *Power Spectral Density* (PSD) que por sua vez é dada pela Equação 5.2 onde P_{TX} é a potência do sinal e Δ_f é a largura de banda do circuito.

$$SNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}}. \quad (5.1)$$

$$I = \frac{P_{TX}}{\Delta_f} \quad (5.2)$$

Os valores de I_{ASE} e I_{NLI} correspondem às PSDs do ASE e efeitos não lineares (SCI e XCI). A Equação 5.3 expressa o cálculo de I_{ASE} . Onde N_l é o número de *spans* do link l e $I_{ASE} = 0,5(G_{AMP} - 1) \cdot NF \cdot h \cdot v$. Onde NF é a figura de ruído do amplificador (BEYRANVAND; SALEHI, 2013), h é a constante de Plank, v é a frequência central de transmissão do circuito e G_{AMP} é o ganho do amplificador.

$$I_{ASE} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{ASE} \quad (5.3)$$

A Equação 5.4 expressa o cálculo da PSD dos ruídos referentes aos efeitos não lineares. I_{NLI} é a PSD do ruído gerado pelos efeitos não lineares em um único span do link l e é calculado de acordo com a Equação 5.5.

$$I_{NLI} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{NLI} \quad (5.4)$$

Na Equação 5.5, j é cada circuito que compartilha o link l . B_i e B_j são as larguras de banda dos circuitos i e j respectivamente. $\Delta_{f_{ij}}$ é a distância entre as frequências centrais dos circuitos i e j . γ é o coeficiente não linear, β_2 é o coeficiente de dispersão e α é a atenuação de potência na fibra.

$$I_{NLI}^l = \frac{3\gamma^2 I^3}{2\pi\alpha|\beta_2|} \left(\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\pi^2 |\beta_2| B_i^2}{2\alpha} \right) + \sum_j \ln \left[\frac{\left(\Delta_{f_{ij}} + \frac{B_j}{2} \right)}{\left(\Delta_{f_{ij}} - \frac{B_j}{2} \right)} \right] \right) \quad (5.5)$$

Cada formato de modulação possui um limiar de SNR aceitável, ou seja, dependendo do formato de modulação, podem ser aceitos circuitos com SNR maior ou menor. De maneira geral quanto menor for o limiar de SNR aceitável, menor será a eficiência espectral da modulação. A Tabela 7 apresenta os limiares de SNR para cada formato de modulação.

Os valores utilizados estão de acordo com (IVES; BAYVEL; SAVORY, 2015). Os limiares de SNR para os formatos de modulação foram calculados para atingir um *Bit Error Rate* (BER) pré-*Forward Error Correction* (FEC) de $4 \cdot 10^{-3}$ e inclui um *overhead* de 12% para FEC (IVES; BAYVEL; SAVORY, 2015).

Tabela 7 – Limiar de SNR aceitável para cada formato de modulação.

Formato de modulação	Limiar de SNR
BPSK	5,5
QPSK	8,5
8QAM	12,5
16QAM	15,1
32QAM	18,1
64QAM	21,1

Fonte: IVES; BAYVEL; SAVORY (2015)

5.3.2 Modelo de consumo energético

O modelo de consumo energético está de acordo com (VIZCAÍNO et al., 2014). Neste modelo são considerados os consumos dos *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs), *Bandwidth Variable Optical Cross Connects* (BV-OXCs) e amplificadores ópticos. A potência de consumo de um BVT é calculada em função da sua taxa de transmissão (Tr) de acordo com a Equação 5.6. NS representa a quantidade de *slots* de espectro utilizados, a constante 1,683 relaciona a potência consumida e a taxa de transmissão e a constante 91,333 corresponde a um consumo adicional de energia do BVT.

$$PC_{BVT}(W) = NS \cdot TrGbps \cdot 1,683W/Gbps + 91,333W. \quad (5.6)$$

A Tabela 8 apresenta a potência de consumo e eficiência energética de um único BVT considerando a utilização de um único *slot* de espectro. A eficiência energética é dada pela razão entre a taxa de transmissão alcançada e a potência de consumo. Observa-se que modulações mais eficientes espectralmente também possuem maior eficiência energética. Vale destacar que, circuitos que utilizam mais *slots* também serão mais eficientes energeticamente devido à diluição do consumo fixo do BVT (91,333W).

Conforme discutido na Subseção 2.1, a quantidade de *splitters* e *Bandwidth Variable Spectrum Selective Switches* (BV-SSSs) utilizados em um BV-OXC depende da quantidade de enlaces de entrada (N) e saída (M). Isto se reflete na potência de consumo do BV-OXC que é calculada de acordo com a Equação 5.7. O modelo adotado também considera a quantidade de BVTs usados para fazer *add* e *drop* na rede ($QBVT$) e o consumo adicional de 150W.

Tabela 8 – Potência de consumo e eficiência energética de um único BVT por slot utilizado com diferentes formatos de modulação.

Formato de modulação	Taxa de transmissão (Gbps)	Potência de consumo (W)	Eficiência energética (Gbps/W)
BPSK	12,5	112,37	0,11
QPSK	25,0	133,41	0,19
8QAM	37,5	154,45	0,24
16QAM	50,0	175,48	0,29
32QAM	62,5	196,52	0,32
64QAM	75,0	217,56	0,34

Fonte: o autor (2021)

$$PC_{WXC}(W) = N \cdot 42,5W + M \cdot 42,5W + QBVT \cdot 100W + 150W. \quad (5.7)$$

O modelo adotado considera a potência de consumo de 100W por amplificador óptico. Considerando o tamanho do enlace d e distância de *span* L , a potência de consumo utilizada com amplificadores em cada enlace pode ser calculada de acordo com a Equação 5.8.

$$PC_{AMPs}(W) = (\lceil d/L - 1 \rceil + 2) \cdot 100. \quad (5.8)$$

5.4 MÉTRICAS DE DESEMPENHO DAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

O planejamento de EONs requer a avaliação de desempenho de diferentes estratégias para dimensionamento/posicionamento de dispositivos e alocação de recursos. A literatura apresenta uma série de métricas de avaliação de desempenho como: BR, BB, FE, UE, UB, Número de BVTs Implantados (NBI), QoT, PCE, dentre outras.

Algumas métricas de avaliação de desempenho são importantes para compreender o funcionamento dos algoritmos de alocação de recursos e o comportamento da rede. Entretanto, para as operadoras de rede, a capacidade de atendimento da rede, o *Capital Expenditure* (CapEx) e o *Operational Expenditure* (OpEx) são os fatores determinantes durante o planejamento da EON. Nesta tese de doutorado, as métricas UE, UB e QoT foram utilizadas apenas internamente nas soluções apresentadas nos Capítulos 3 e 4. Os estudos de avaliação de desempenho apresentados nas Seções 6.2, 3.2, 6.4 e 6.5 levam em consideração as métricas BB, PCE, FE, NBI, Injustiça no atendimento a requisições com diferentes Taxas de transmissão (IJ_{Tr}) e Injustiça no atendimento a requisições com diferentes Origens e Destinos (IJ_{OD}). Estas métricas são apresentadas a seguir.

As métricas BR e BB estão diretamente relacionadas à capacidade de atendimento às requisições feitas pelos clientes. O BR corresponde à relação entre o número de requisições bloqueadas e o número total de requisições. Já o BB também representa a capacidade de atendimento da rede, entretanto, o BB leva em consideração a taxa de transmissão das requisições. As Equações 5.9 e 5.10 apresentam como são computadas as métricas BR e BB, respectivamente. Na Equação 5.9, R' representa a quantidade de requisições atendidas e R a quantidade total de requisições feitas. Na Equação 5.10, DT é a quantidade de dados transferidos pela rede e DTP é a quantidade de dados que seriam transferidos se nenhuma requisição fosse bloqueada.

O atendimento de requisições com diferentes requisitos de taxa de transmissão e diferentes tempos de duração gera diferentes receitas para a operadora de rede. No entanto, a métrica de BR não leva em consideração esta diferença, ou seja, no cálculo do BR, requisições com taxa de transmissão de 10Gbps, 100Gbps ou 400Gbps são tratadas da mesma forma.

$$BR = 1 - \frac{R'}{R} \quad (5.9)$$

$$BB = 1 - \frac{DT}{DTP} \quad (5.10)$$

O bloqueio de requisições com taxa de transmissão Tr (BR_{Tr}) pode ser calculado de acordo com a Equação 5.11, onde R'_{Tr} é o número de requisições com taxa de transmissão Tr que foram atendidas e R_{Tr} é o número total de requisições com taxa de transmissão Tr . Quanto maior a taxa de transmissão requisitada, mais recursos espectrais são necessários para atender uma requisição. Em decorrência disto, o bloqueio de requisições com maiores taxas de transmissão normalmente é maior que o bloqueio de requisições com taxas de transmissão menores. Por exemplo, é esperado que $BR_{500Gbps} > BR_{100Gbps}$. Neste trabalho a métrica de IJ_{Tr} corresponde ao desvio padrão entre bloqueios de requisições para cada taxa de transmissão. De maneira análoga, é calculada a IJ_{OD} . Porém neste último caso, são considerados os bloqueios de requisições relativos a cada par origem e destino.

$$BR_{Tr} = 1 - \frac{R'_{Tr}}{R_{Tr}} \quad (5.11)$$

Quando o algoritmo de agregação de tráfego não consegue reaproveitar a capacidade excedente dos circuitos ativos para atender uma nova requisição, um novo circuito precisa ser criado. Caso não seja possível estabelecer o novo circuito, a requisição será bloqueada, isto pode acontecer em uma das seguintes situações: i) não há BVT disponível nos nós de origem ou destino do novo circuito, ii) não há espectro disponível mesmo desconsiderando as restrições de continuidade e contiguidade, iii) há espectro disponível, porém,

não é possível respeitar as restrições de continuidade e contiguidade, iv) há espectro contínuo e contíguo disponível, entretanto, a SNR do novo circuito não é aceitável ou o estabelecimento deste circuito tornará a SNR de outro circuito já ativo inaceitável. É possível decompor o BB de acordo com a causa dos bloqueios, dando origem às métricas de Bloqueio de Banda devido à Ausência de BVTs (BB_{ab}), Bloqueio de Banda devido à Ausência de Recursos Espectrais (BB_{ars}), Bloqueio de Banda devido à Fragmentação (BB_f) e Bloqueio de Banda devido à baixa QoT (BB_{qot}).

Diferentemente do BR, a métrica de BB considera a quantidade de dados transferidos na rede. Na prática, o preço cobrado por bit transferido pelas operadoras pode variar dependendo de diversos fatores como: i) taxa de transmissão requisitada, ii) classes de serviço e iii) distância entre os nós de origem e destino. Com isso, a relação entre o BB e a receita da operadora não é linear, contudo, o BB é considerada uma importante métrica para avaliar a capacidade de atendimento da rede. Por este motivo, neste trabalho, o BR é utilizado apenas para computar as métricas IJ_{Tr} e IJ_{OD} e o BB é utilizada para avaliar a capacidade de atendimento às demandas dos clientes.

Nos últimos anos, tem crescido a preocupação com o desenvolvimento de soluções para EON com menor consumo e maior eficiência energética (WU; NING; GUO, 2017; WU et al., 2014). A Eficiência Energética (EE) pode ser calculada de acordo com a Equação 5.12, onde, DT é a quantidade de dados transferidos pela rede (bits), Energia Consumida (EC) é a energia consumida na rede em Watts-hora (Wh).

$$EE = \frac{DT}{EC} \quad (5.12)$$

A EE não leva em consideração a quantidade de clientes atendidos. Em uma situação hipotética onde fossem aceitas apenas requisições que pudessem ser atendidas com circuitos de 1 salto na topologia, a EE possuiria um valor alto, entretanto, muitas requisições seriam bloqueadas. Desta forma, esta métrica não pode ser analisada de forma isolada.

A flexibilidade na alocação de espectro nas EONs provoca um efeito colateral conhecido como fragmentação do espectro. Isto acontece quando o espectro óptico disponível está dividido em pequenas porções não adjacentes, o que por sua vez, dificulta o estabelecimento de novos circuitos devido à restrição de contiguidade. A fragmentação do espectro óptico pode ser quantificada através da métrica FE (YOUSEFI; Ghaffarpour Rahbar; YAGHUBI-NAMAAD, 2019), calculada de acordo com a Equação 5.13, onde BFS é o número de *slots* na maior faixa contígua de espectro livre e FFS é o número total de *slots* livres.

$$F_{ext} = \frac{BFS}{FFS} \quad (5.13)$$

Para computar as métricas, o SNetS observa a rede sempre que há uma alteração no estado do sistema, esta alteração é necessariamente provocada pela criação/expansão ou

a desativação/retração de um circuito. O que por sua vez, é decorrente da chegada ou encerramento de uma requisição na rede. Como os instantes de chegada ou encerramento das requisições não são necessariamente distribuídos uniformemente, as métricas FE, UE, UB, PCE, Taxa de requisições atendidas Por Circuito (RPC) precisam ser ponderadas em relação ao tempo decorrido entre cada evento de mudança de estado. Para isto, a cada observação multiplica-se o valor observado em um determinado instante pela diferença entre o instante atual e o instante da última alteração de estado da rede, ao final divide-se o somatório das observações pelo tempo total observado durante a simulação, que por sua vez corresponde à diferença entre o primeiro e último evento observado. Além destas métricas, para computar o EC, a DT , a DTP também leva-se em consideração o tempo porém não fazem a divisão ao final do experimento uma vez que estes valores são valores totais e não valores médios. Estes dados por sua vez são utilizados para computar as métricas BB e EE.

5.5 DISTRIBUIÇÃO DE TRÁFEGO POR PARES DE NÓS E TAXAS DE TRANSMISSÃO

A Tabela 9 apresenta uma amostragem de trabalhos da literatura que abordam EONs e a distribuição de tráfego adotada. De acordo com o levantamento bibliográfico realizado, apenas (PATEL et al., 2020) considera um tráfego distribuído de maneira não uniforme por par(S,D), além dele, alguns trabalhos consideram a distribuição não uniforme entre as taxas de transmissão requisitadas. Em geral, estes trabalhos utilizam modelos onde requisições com altas taxas de transmissão são menos frequentes que requisições com taxas de transmissão menores.

Tabela 9 – Modelo de tráfego adotado em trabalhos da literatura.

Trabalho	Distribuição de tráfego			
	Por par(S,D)		Por taxa de transmissão	
	Uniforme	Não uniforme	Uniforme	Não uniforme
(BEYRANVAND; SALEHI, 2013)	X		X	
(FONTINELE et al., 2017)	X		X	
(MINA; AKBAR; ALIZADEH, 2020)	X		X	
(KHODASHENAS et al., 2013)	X		X	
(MAJUMDAR; PAL; DE, 2016)	X		X	
(WANG; MUKHERJEE, 2014)	X		X	
(ZHANG et al., 2015a)	X			X
(ZHANG; MARTEL; MUKHERJEE, 2013)	X			X
(ZHANG et al., 2018)	X			X
(PATEL et al., 2020)		X		X

Fonte: o autor (2021)

Nos experimentos realizados neste trabalho, foram considerados dois tipos de distribuição de tráfego na rede: Distribuição Uniforme entre os Nós e Inversamente proporcional entre as Taxas de transmissão (UNIT) e Distribuição Não uniforme entre os Nós e Inversamente proporcional entre as Taxas de transmissão (NNIT). Em ambos os casos, a distribuição das requisições em relação às taxas de transmissão requisitadas é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a taxa de transmissão menos requisições na rede. Na UNIT, as requisições são distribuídas de maneira uniforme entre todos os nós da rede, este tipo de distribuição de tráfego é mais simples e utilizado pela maioria dos trabalhos da literatura, conforme apresentado na Tabela 9. Já na NNIT o tráfego é distribuído entre os nós de maneira não uniforme, baseado na densidade populacional.

A Figura 14 apresenta um mapa de densidade demográfica dos Estados Unidos e a topologia de rede *National Science Foundation Network* (NSFNet). Através de uma sobreposição da topologia com o mapa demográfico, cada nó da rede recebeu uma classificação. Os nós 2, 9, 12 e 13 correspondem às áreas de maior densidade demográfica e receberam a classificação N3 (representados em vermelho). Em seguida, os nós 3, 8, 10, 11 e 14 receberam a classificação N2 (laranja). Por fim, os nós posicionados em área com menor densidade populacional receberam a classificação N1 (amarelo).

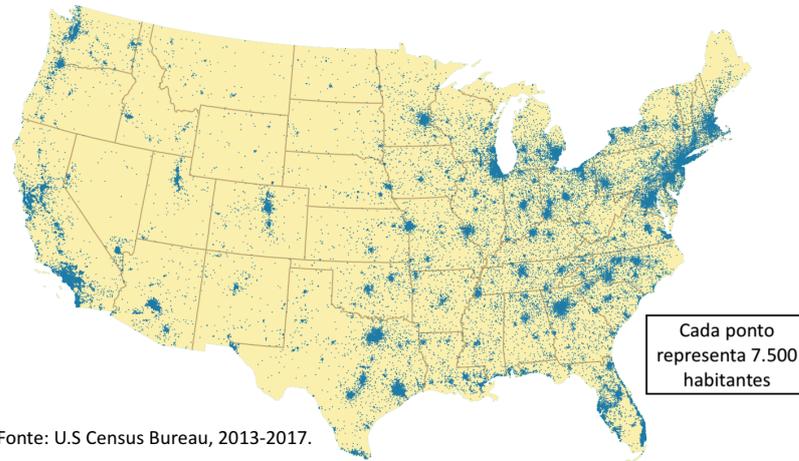
A proporção da distribuição do tráfego entre os pares de nós da rede é dada pela multiplicação do peso dos nós de cada par. O peso de cada nó é dado pela classe dele, sendo 1, 4, 9 para as classes N1, N2 e N3, respectivamente. Por exemplo, no par(1,4), ambos origem e destino pertencem à classe N1. Portanto, a proporção da distribuição do tráfego para o par(1,4) é $1 \cdot 1 = 1$. Já o par(8,9) possui nó de origem classe N2 e nó de destino classe N3, portanto, a proporção da distribuição do tráfego para o par(8,9) é $4 \cdot 9 = 36$. Desta forma, a intensidade de tráfego do par(8,9) é 36 vezes maior que a intensidade de tráfego do par(1,4) e 4 vezes maior que a do par(7,2).

Para cada par(S,D) e taxa de transmissão Tr , é configurado um GR com $\mu = 1$ e λ calculado de acordo com a equação 5.14, onde P_s e P_d são os pesos dos nós S e D , de acordo com as suas respectivas classificações, PTT é a proporção da taxa de transmissão Tr e por fim, λ_{min} é um valor predeterminado para o tipo de requisição com menor intensidade de tráfego na rede. No caso, o λ_{min} é utilizado para um par de nós com ambos origem e destino na classe N1 e a maior taxa de transmissão considerada. Destaca-se que o λ_{min} influencia em todos os demais λ s. Desta forma, este parâmetro é usado para controlar a intensidade de tráfego na rede de maneira geral.

$$\lambda_{odt} = P_o \cdot P_d \cdot PTT \cdot \lambda_{min} \quad (5.14)$$

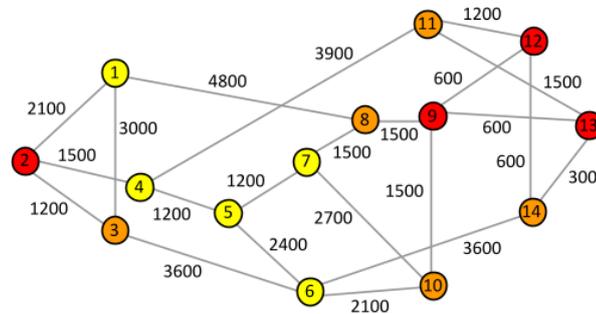
A intensidade de tráfego gerada por cada GR é dada por λ_{odt}/μ e expressa em Erlangs. A carga total na rede é obtida através do somatório da intensidade de tráfego de todos os geradores de requisições. Nos experimentos apresentados no Capítulo 6, a carga total na

Figura 14 – Densidade populacional dos Estados Unidos e topologia NSFNet.



Fonte: U.S Census Bureau, 2013-2017.

(a) Densidade Populacional



(b) NSFNet

Fonte: U.S. Census (2020)

rede foi dimensionada de maneira empírica buscando observar a rede com BB no patamar entre 0 e 0,025 considerando a melhor dentre as soluções avaliadas.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a ferramenta SNetS, utilizada para a realização dos experimentos neste trabalho. Também foram apresentados os modelos de camada física e consumo energético das EONs implementados no SNetS. O modelo de camada física permite observar a interferência de ruídos nos circuitos da EON, estes ruídos prejudicam a qualidade do sinal óptico e podem reduzir a capacidade de atendimento da rede. Neste contexto, os algoritmos de alocação de recursos podem levar em consideração aspectos da camada física para amenizar este problema, conforme foi discutido no Capítulo 2. Já o modelo de consumo energético é importante para determinar o consumo e a eficiência energética da rede que por sua vez, também são influenciados pelos algoritmos de alocação de recursos.

Ainda neste capítulo foram apresentadas as métricas de avaliação de desempenho utilizadas e como estas métricas são calculadas. As métricas mais importantes são o BB e o PCE. Estas métricas estão relacionadas diretamente à capacidade de atendimento da rede e ao custo de operação da rede. As demais métricas ajudam a compreender o comportamento da rede e dos algoritmos de alocação de recursos. Neste trabalho foram utilizados dois tipos de distribuição de tráfego, o UNIT e o NNIT. A principal diferença entre os dois é a distribuição de tráfego entre os pares de nós da rede. Este capítulo apresentou como são configurados os GRs no SNetS para alcançar estas distribuições de tráfego.

6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS

Os Capítulos 3 e 4 apresentam as soluções propostas neste trabalho para planejamento e alocação de recursos em *Elastic Optical Networks* (EONs). Para demonstrar a viabilidade e o desempenho das soluções propostas, elas foram comparadas a outras soluções disponíveis na literatura levando em consideração diferentes métricas de desempenho. Os experimentos foram organizados em 4 estudos de avaliação de desempenho, abordando roteamento, dimensionamento/distribuição de *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs), políticas de agregação de tráfego e mecanismos de potencialização da agregação de tráfego.

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: A Seção 6.1 apresenta como foram organizados os estudos de avaliação de desempenho abordando as soluções propostas. As Seções 6.2 a 6.5 apresentam os estudos de avaliação de desempenho realizados. Por fim, a Seção 6.6 apresenta as considerações finais do Capítulo.

6.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nesta tese de doutorado são propostas diversas soluções para planejamento e alocação de recursos em EONs. A avaliação de desempenho destas propostas está organizada em quatro estudos de avaliação de desempenho para demonstrar as contribuições em cada um dos subproblemas abordados. As soluções propostas são comparadas a outras soluções disponíveis na literatura em diferentes cenários. Conforme discutido no Capítulo 5, os experimentos foram realizados através de simulação computacional utilizando a ferramenta *Slice Network Simulator* (SNetS).

Diferentes soluções *Routing, Modulation and Spectrum Allocation* (RMSA) são comparadas no estudo de avaliação de desempenho **AD1 - Soluções RMSA**. Neste estudo de avaliação de desempenho são consideradas todas as combinações entre os algoritmos de roteamento *K Balanced Paths* (KBP), *KSP hops* (KSP_h) e *KSP distance* (KSP_d) as estratégias de alocação de espectro *Path-Priority* (PP), *Firstfit* e *Reduction of QoTO* (RQoTO). Já no estudo de avaliação de desempenho **AD2 - Dimensionamento/distribuição de BVTs**, a estratégia *Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization* (FNBN), apresentada no Capítulo 3 é comparada à estratégia *BVTs Evenly Distributed* (BED). No estudo de avaliação de desempenho **AD3 - Políticas de agregação de tráfego**, as políticas adaptativas *Weight Adjustment with Multilayer Perceptron Network* (WAMPLP) e *Weight Adjustment with Simulated Annealing* (WASA) são comparadas a outras políticas de agregação de tráfego tradicionais encontradas na literatura. Por fim, o mecanismo de potencialização da agregação de tráfego *Spectrum Spacing for Traffic Grooming* (SSTG), apresentado no Capítulo 4, é comparado aos mecanismos *Spec-*

*trum Reservation for each Light Path (SRLP) e Spectrum Reservation for each Node Pair (SRNP) no estudo de avaliação de desempenho **AD4 - Mecanismos de potencialização da agregação de tráfego.***

Em todos os estudos de avaliação de desempenho são avaliadas as métricas de Bloqueio de Banda (BB) e Potência de Consumo Energético (PCE). Estas métricas são importantes na avaliação de desempenho de EONs pois representam a capacidade de atendimento e o custo energético da rede. Outras métricas auxiliares são utilizadas de acordo com o foco das soluções avaliadas. No AD1 - Soluções RMSA, o foco são os algoritmos RMSA, incluindo o algoritmo de roteamento KBP que visa o balanceamento de carga na rede, desta forma, também são avaliadas as componentes de bloqueio, a Injustiça no atendimento a requisições com diferentes Taxas de transmissão (IJ_{Tr}) e a Injustiça no atendimento a requisições com diferentes Origens e Destinos (IJ_{OD}). No AD2 - Dimensionamento/distribuição de BVTs, são avaliadas estratégias para dimensionamento e distribuição de BVTs, por esta razão, este estudo também leva em consideração o Número de BVTs Implantados (NBI). Já nos estudos AD3 - Políticas de agregação de tráfego e AD4 - Mecanismos de potencialização da agregação de tráfego, onde o foco é na agregação de tráfego, é utilizada a métrica de Taxa de requisições atendidas Por Circuito (RPC). A Tabela 10 apresenta as soluções, topologias e distribuições de tráfego avaliadas em cada um dos estudos de avaliação de desempenho, as propostas deste trabalho estão destacadas em azul.

Tabela 10 – Soluções, topologias e distribuição de tráfego consideradas em cada estudo de avaliação de desempenho.

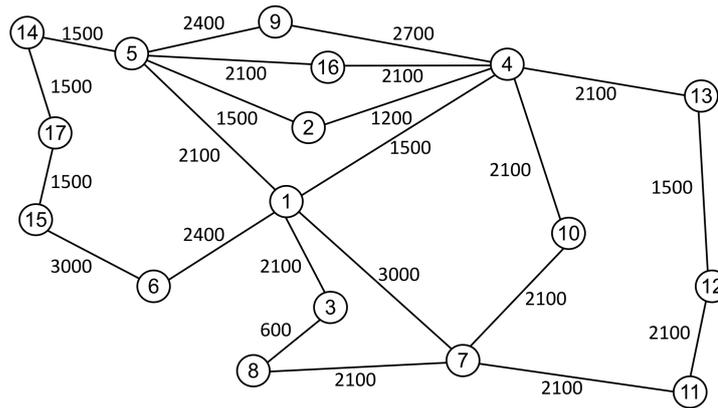
	AD1 - Soluções RMSA	AD2 - Dimensionamento/distribuição de BVTs
RMSA	KBP , KSPH, KSPd PP, FirstFit, RQoTO	CompleteSharing
Agregação de tráfego	Sem	Sem, MTGAG-MPH
Potencialização da agregação de tráfego	-	-
Dimensionamento e Distribuição de BVTs	BED	FNBN , BED
Topologias	NSFNet	NSFNet
Distribuição de tráfego	NNIT	NNIT
	AD3 - Políticas de agregação de tráfego	AD4 - Mecanismos de potencialização da agregação de tráfego
RMSA	CompleteSharing	CompleteSharing
Agregação de tráfego	MTGAG MPH, MVH, MS, WASA , WAMPLP	MTGAG MPH, MVH, MS
Potencialização da agregação de tráfego	-	SRLP, SRNP, SSTG
Dimensionamento e Distribuição de BVTs	BED	FNBN
Topologias	NSFNet, R6TNet	NSFNet, Pacific bell
Distribuição de tráfego	UNIT	UNIT

Fonte: o autor (2021)

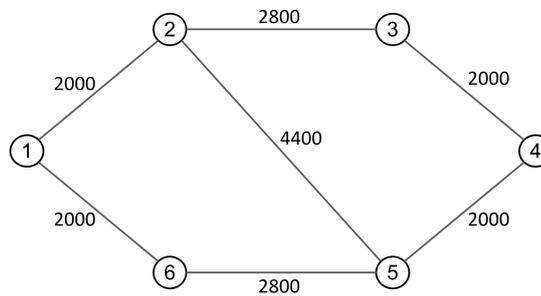
As topologias de rede utilizadas nos estudos de avaliação de desempenho foram a *National Science Foundation Network* (NSFNet), a Pacific Bell e a R6TNet. A Figura

15 ilustra as topologias Pacific Bell e R6TNet, a NSFNet é ilustrada na Figura 15(b). As arestas representam enlaces bidirecionais e valores sobre elas representam a distância dos enlaces em quilômetros (km). Estas topologias foram escolhidas pois são amplamente utilizadas em estudos de avaliação de desempenho de EONs na literatura, incluindo os trabalhos relacionados apresentados nos Capítulos 3 e 4.

Figura 15 – Topologias Pacific Bell e R6TNet.



(a) Pacific Bell



(b) R6TNet

Fonte: o autor (2021)

Com exceção da *Power Spectral Density* (PSD), todos os parâmetros de camada física são os mesmos em todos os experimentos realizados. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 11 e estão de acordo com (BEHERA et al., 2019; BEYRANVAND; SALEHI, 2013; JOHANNISSON; AGRELL, 2014; YAN et al., 2015). A PSD foi ajustada em cada experimento para o valor que resulta em menor BB. As métricas de avaliação de desempenho foram calculadas a partir de 100.000 observações de requisições na rede em cada experimento, cada experimento é replicado 10 vezes com diferentes sementes aleatórias. Todos os resultados são apresentados com estimativa pontual (média das replicações) e estimativa intervalar com nível de confiança de 95%.

Tabela 11 – Parâmetros de camada física utilizados em todos os experimentos

Parâmetro de camada física	Valor
Atenuação da fibra (α) - dB/km	0,2
Parâmetro de dispersão da fibra (D) - ps/nm/km	16
Coefficiente não linear da fibra (γ)	1,3
Tamanho de um <i>span</i> - km	100
Figura de ruído do amplificador - dB	6
Amplitude espectral máxima do BVT - slots	40
Banda de guarda - slots	1
Número de <i>slots</i> de espectro	400
Amplitude espectral de um <i>slot</i> - GHz	12,5

Fonte: o autor (2021)

6.2 ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AD1 - SOLUÇÕES RMSA

O objetivo deste estudo de avaliação de desempenho é avaliar diferentes soluções RMSA resultantes da combinação dos algoritmos KBP, KSP_d e KSP_h com as soluções para alocação de espectro *Path-Priority* (PP) (IZQUIERDO-ZARAGOZA; PAVON-MARINO; BUENO-DELGADO, 2014), *Firstfit* e RQoTO (FONTINELE et al., 2017). Neste estudo de avaliação de desempenho, foi utilizada apenas a topologia NSFNet. A distribuição de tráfego na rede é a Distribuição Não uniforme entre os Nós e Inversamente proporcional entre as Taxas de transmissão (NNIT), apresentada na Seção 5.5. Foram geradas requisições com taxas de transmissão de 100, 200, 300, 400 e 500 Gbps com proporção de 5:4:3:2:1 respectivamente. O algoritmo *Modulation Selection by QoT and Sigma* (FONTINELE et al., 2017) foi utilizado para escolher o formato de modulação para cada requisição. Conforme apresentado na Seção 5.3, os formatos de modulação disponíveis são: BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM.

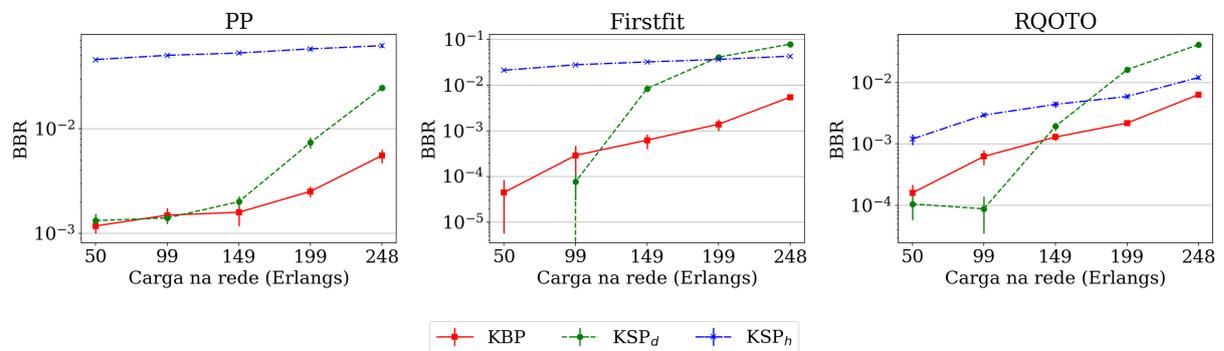
Foi distribuído um número igual de 70 BVTs para cada nó da rede (estratégia BED), esta quantidade foi definida empiricamente buscando evitar qualquer bloqueio Bloqueio de Banda devido à Ausência de BVTs (BB_{ab}). Neste estudo de avaliação de desempenho não foi utilizada agregação de tráfego, desta forma, cada requisição é atendida por um novo circuito. Cada solução RMSA foi avaliada sob 5 condições de carga na rede: 50, 99, 149, 199 e 248 Erlangs. Este valor corresponde à carga total na rede e é calculado de acordo com a Equação 6.1. Onde O e D pertencem ao conjunto de nós da topologia, t pertence ao conjunto de taxas de transmissão consideradas e λ_{odt} é a taxa média de chegada de requisições com origem em o , destino em d e taxa de transmissão t . O λ_{odt} é calculado de acordo com a Equação 5.14 já apresentada na Seção 5.5. A carga total representa o somatório da carga em Erlangs referente a cada Gerador de Requisições (GR). O KBP

Tuning (Algoritmo 1) foi resolvido para o PP, *Firstfit* e RQoTO considerando a carga de 248 Erlangs. Os mesmos pesos auxiliares foram utilizados para as demais cargas.

$$CT = \frac{\sum_O \sum_D \sum_t \lambda_{odt}}{\mu} \quad (6.1)$$

A Figura 16 apresenta os BBs obtidos com cada solução RMSA. Nos pontos de carga mais baixos (50 e 99 Erlangs), O KBP apresenta BB maior ou igual ao KSP_d . Já nos pontos de carga 149, 199 e 248 Erlangs, o KBP apresenta menor BB que as demais soluções. Considerando todos os cenários avaliados, pode-se afirmar que o KBP-Firstfit apresenta a menor BB dentre as demais soluções.

Figura 16 – Bloqueio de banda alcançado com o KBP, KSP_d e KSP_h .



Fonte: o autor (2021)

Entre todas as soluções de roteamento avaliadas, o KBP foi a única que manteve o BB abaixo de 10^{-2} em todos os cenários avaliados. A Equação 6.2 foi utilizada para calcular o ganho (G) do KBP em relação ao KSP_d e o KSP_h em termo de BB. Ainda na Equação 6.2, BBR_{kbp} representa o BB obtido com o uso do KBP e BBR_{md} o menor BB obtido entre as demais soluções.

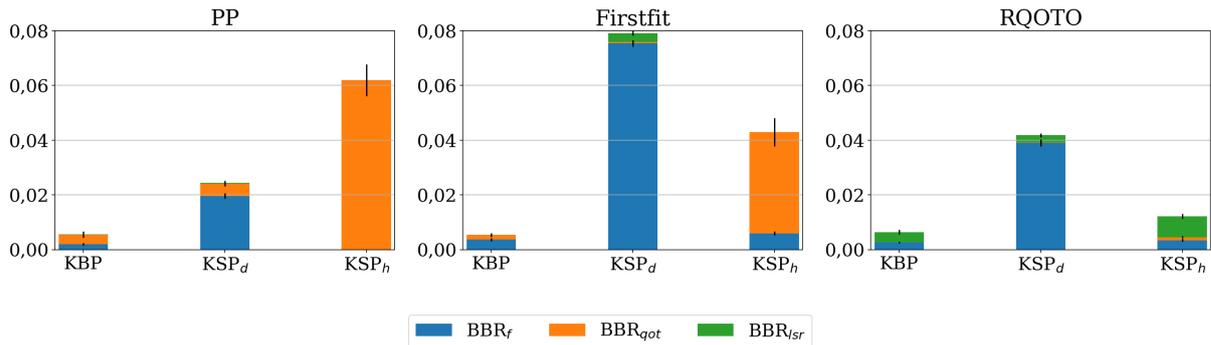
$$G = 1 - \frac{BBR_{kbp}}{BBR_{md}} \quad (6.2)$$

Com as cargas 149, 199 e 248 Erlangs, usando solução RMSA *Firstfit*, o KBP apresentou ganho de 92,6%, 96,2% e 87,3%, respectivamente. Considerando a solução RQoTO os ganhos foram de 33,1%, 63,1% e 47,3% para os mesmos pontos de carga. Por fim, considerando a solução PP, os ganhos foram 20,8%, 65,9% e 77,4%.

A Figura 17 apresenta a decomposição do BB alcançado quando a rede é submetida a 248 Erlangs. Os bloqueios por baixa QoT (Bloqueio de Banda devido à baixa QoT (BB_{got})) são praticamente inexistentes quando se utiliza a solução RQoTO. Isto ocorre pois a solução RQoTO é ciente de camada física (*Impairment Aware (IA)*-RMSA) e toma as decisões sobre rota e alocação de espectro visando a minimização deste tipo de bloqueio. A solução PP obteve o menor nível de Bloqueio de Banda devido à Fragmentação (BB_f),

isto ocorreu devido ao balanceamento de carga provido por esta solução. Entretanto, o KSP_h -PP provoca a utilização de rotas com maior comprimento devido ao balanceamento de carga, especialmente quando se utiliza o KSP_h . Isto por sua vez aumentou a BB_{qot} . Ainda na Figura 17, o KBP apresenta menor BB que o KSP_d e o KSP_h com PP, *Firstfit* e RQoTO. Destaca-se que entre todas as combinações de soluções, as três com menor BB são o KBP-PP, KBP-*Firstfit* e o KBP-QoTO.

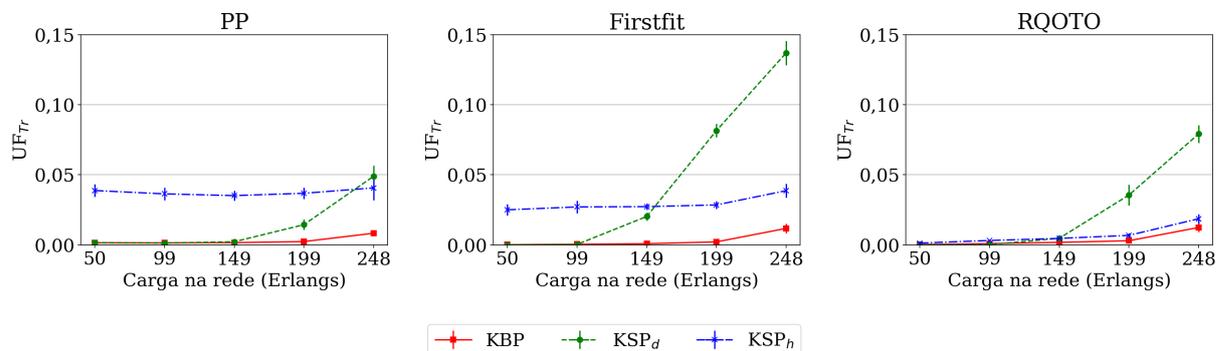
Figura 17 – Decomposição do bloqueio de banda com o KBP, KSP_d e KSP_h sob carga 248 Erlangs.



Fonte: o autor (2021)

A Figura 18 apresenta a IJ_{Tr} alcançada pelas soluções avaliadas. Quanto menor a IJ_{Tr} , mais igualitário é o atendimento às requisições com diferentes requisitos de taxa de transmissão. Sob este aspecto, o KBP também apresenta desempenho igual ou superior ao KSP_d e o KSP_h em todos os cenários avaliados. O algoritmo proposto combinado com as soluções RMSA foi capaz de manter a IJ_{Tr} abaixo de 0,02 sob todas as cargas avaliadas.

Figura 18 – Nível de injustiça no atendimento à requisições com diferentes taxas de transmissão obtido com o KBP, KSP_d e KSP_h .

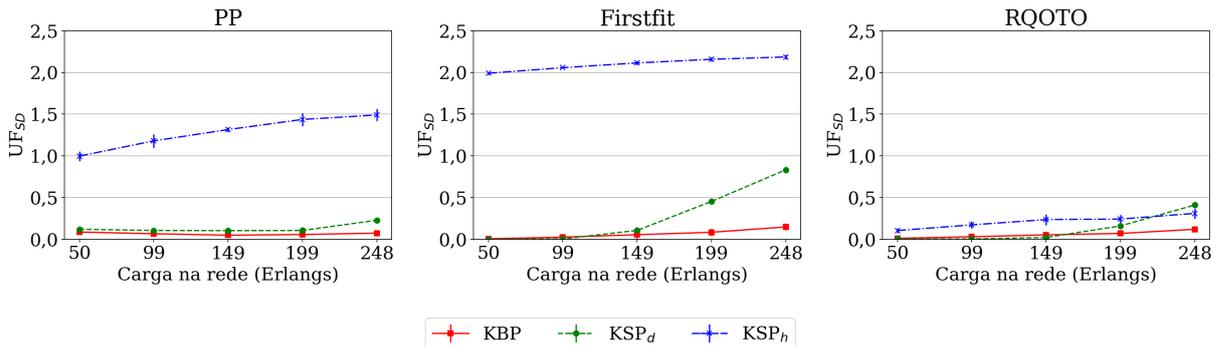


Fonte: o autor (2021)

De maneira análoga ao que acontece com as taxas de transmissão, o bloqueio de requisições varia de acordo com o par (S, D) . Isto ocorre pois alguns pares estão mais distantes, os circuitos que interligam estes pares possuem rotas com mais saltos e/ou maior

comprimento, o que por sua vez amplia os desafios impostos pela restrição de continuidade de espectro e a degradação do sinal óptico. A Figura 19 apresenta a IJ_{OD} alcançada pelas soluções avaliadas. Novamente o KBP atende as requisições de maneira mais igualitária, observa-se que as soluções KBP-PP, KBP-*Firstfit* e KBP-RQOTO mantêm a IJ_{OD} abaixo de 0,2 sob todas as condições de carga na rede.

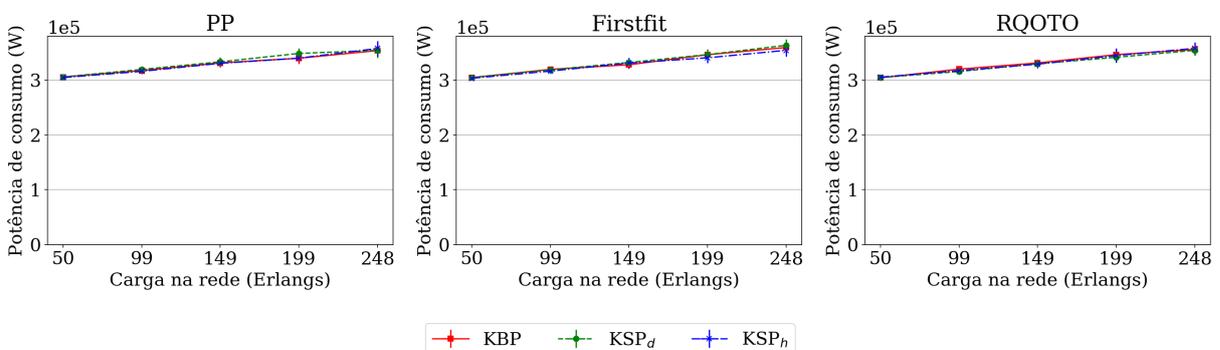
Figura 19 – Nível de injustiça no atendimento à requisições com diferentes origens e destinos obtido com o KBP, KSP_d e KSP_h .



Fonte: o autor (2021)

A Figura 20 apresenta a PCE observada na rede com cada uma das soluções avaliadas. Percebe-se que apesar de ter maior capacidade de atendimento, o KBP não provocou maior consumo energético que as demais soluções. De maneira geral, os experimentos realizados mostram que não há diferença significativa entre a PCE alcançada pelas soluções avaliadas. Destaca-se o comportamento esperado de incremento na PCE à medida que se aumenta a carga na rede, isto acontece pois a PCE é uma medida de consumo energético instantâneo e este cenário possui maior quantidade de dispositivos sendo utilizados simultaneamente.

Figura 20 – Potência de consumo energético obtida com o KBP, KSP_d e KSP_h .



Fonte: o autor (2021)

6.3 ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AD2 - DIMENSIONAMENTO/DISTRIBUIÇÃO DE BVTs

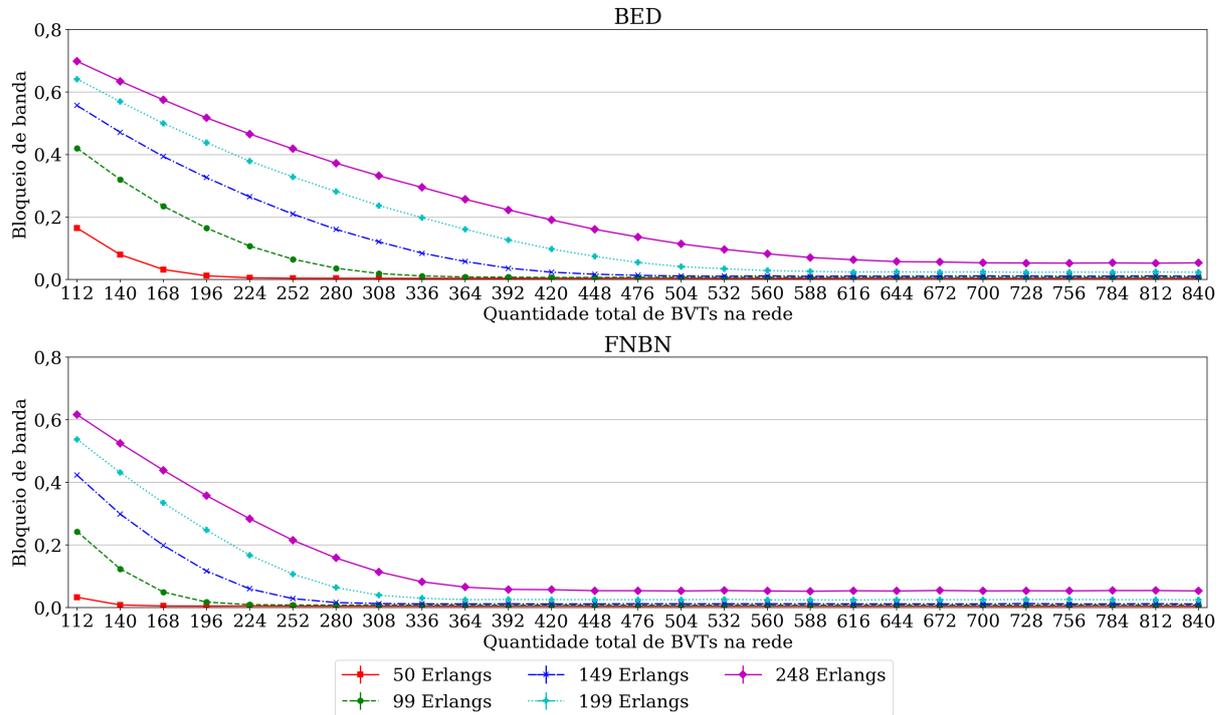
Este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o FNBN, proposto neste trabalho para dimensionamento/distribuição de BVTs. O FNBN foi comparado à estratégia BED, utilizada na maioria dos trabalhos da literatura. Assim como o AD1 - Soluções RMSA apresentado na Seção 6.2, neste estudo de avaliação de desempenho foi utilizada apenas a topologia NSFNet e distribuição de tráfego NNIT. Além disso, também foram consideradas as mesmas taxas de transmissão e condições de carga. Como a agregação de tráfego é fortemente relacionada ao consumo de BVTs, neste estudo de avaliação de desempenho foram considerados cenários com e sem agregação de tráfego. Para agregação de tráfego foi utilizado o algoritmo *Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph* (MTGAG) com política *Minimizing the number of Physical Hops* (MPH), para RMSA foram utilizados os algoritmos *Complete Sharing* (WANG; MUKHERJEE, 2014) e *Modulation Selection by QoT and Sigma* (FONTINELE et al., 2017).

A Figura 21 apresenta a BB alcançada pelas estratégias de distribuição de BVTs BED e FNBN considerando diferentes quantidades de BVTs implantados na rede. Neste caso, o FNBN foi utilizado apenas para distribuição e o número de BVTs configurado de maneira independente. De maneira geral, quanto menor a quantidade de BVTs na rede, maior o BB, isto acontece devido ao aumento do BB_{ab} . A partir de certo ponto, o incremento na quantidade de BVTs deixa de reduzir o BB, nesta situação, o BB_{ab} já está próxima de 0 e o BB é composto principalmente por BB_f , BB_{qot} e Bloqueio de Banda devido à Ausência de Recursos Espectrais (BB_{ars}). Podemos deduzir que a estratégia de posicionamento e dimensionamento de BVTs impacta principalmente no BB_{ab} .

Na Figura 22 é feita a mesma avaliação da Figura 21, entretanto, neste caso considera-se a agregação de tráfego na rede. Observa-se que a utilização da agregação de tráfego permite alcançar BB mínima com uma menor quantidade de BVTs. As Figuras 21 e 22 mostram que o FNBN permite alcançar BB mínima com uma quantidade de BVTs menor em relação ao BED em todas as condições de carga, com e sem agregação de tráfego. Isto acontece pois o FNBN permite um melhor aproveitamento dos BVTs posicionando-os de maneira mais eficiente. A utilização de uma quantidade de BVTs superior a 672 BVTs é suficiente para que não ocorra nenhum bloqueio de requisição por ausência de BVTs, com isto, o BB é equivalente para ambas soluções avaliadas. Com nível de confiança de 95%, o erro estatístico para esta métrica foi pequeno, por esta razão, os intervalos de confiança não são perceptíveis.

A estratégia de dimensionamento de BVTs do FNBN apresentada no Algoritmo 3, determina a quantidade mínima de BVTs necessária para que o BB_{ab} seja inferior a um limiar (L) especificado previamente. Esta mesma abordagem foi aplicada com o BED. As Figuras 23 e 24 apresentam a quantidade total de BVTs necessários para respeitar os

Figura 21 – Bloqueio de banda atingido com o FNBN e o BED sem a utilização de agregação de tráfego em função no número total de BVTs distribuídos na rede.



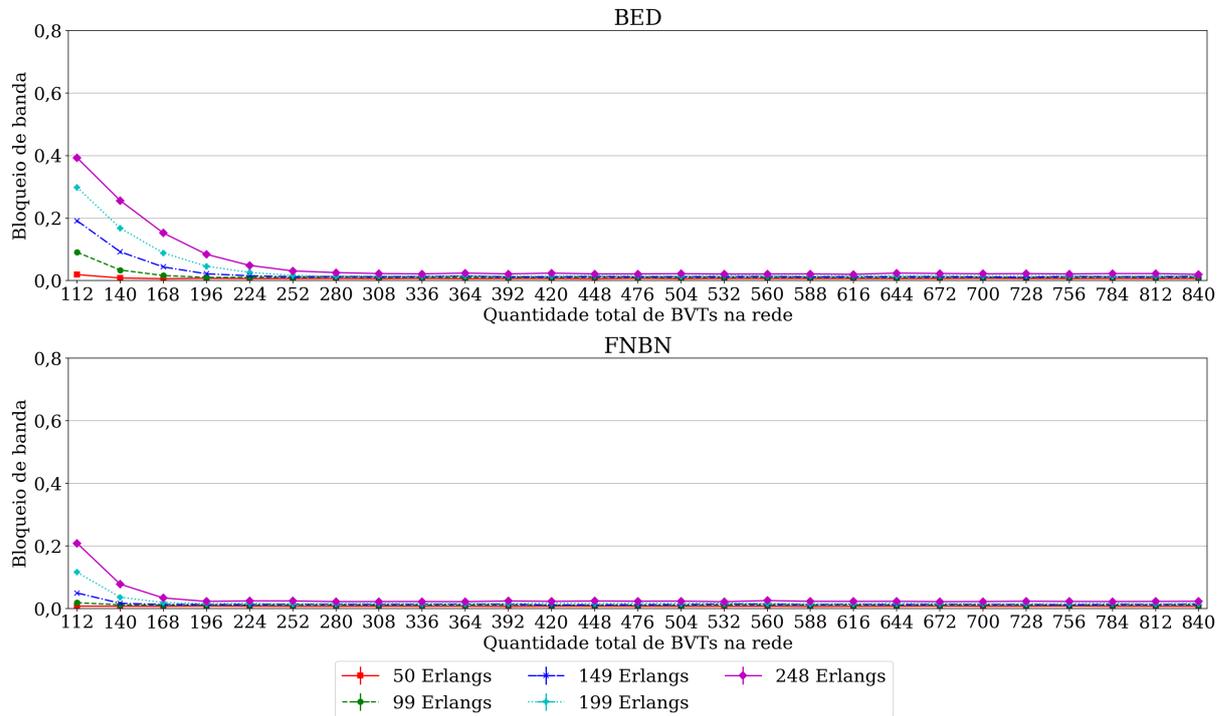
Fonte: o autor (2021)

limiares: 0,005, 0,0025 e 0. Quanto menor o L , menor a tolerância para BB_{ab} e consequentemente, mais BVTs são necessários. Observa-se ainda que sem a utilização de agregação de tráfego, foram necessários mais de 800 BVTs para atender $L = 0$ com a estratégia BED, enquanto sob mesmas condições, com agregação de tráfego, o número de BVTs necessários foi inferior a 400. Este é um resultado esperado visto que a agregação de tráfego permite o reaproveitamento dos BVTs para atender a diversas requisições.

Tanto com agregação quanto sem agregação de tráfego, O FNBN conseguiu respeitar o L utilizando pelo menos 20% e até 41% menos BVTs que o BED. Com o FNBN, foram necessários menos que 600 e 300 BVTs considerando os cenários sem agregação e com agregação de tráfego, respectivamente. Isto representa uma economia nos custos de implantação da rede.

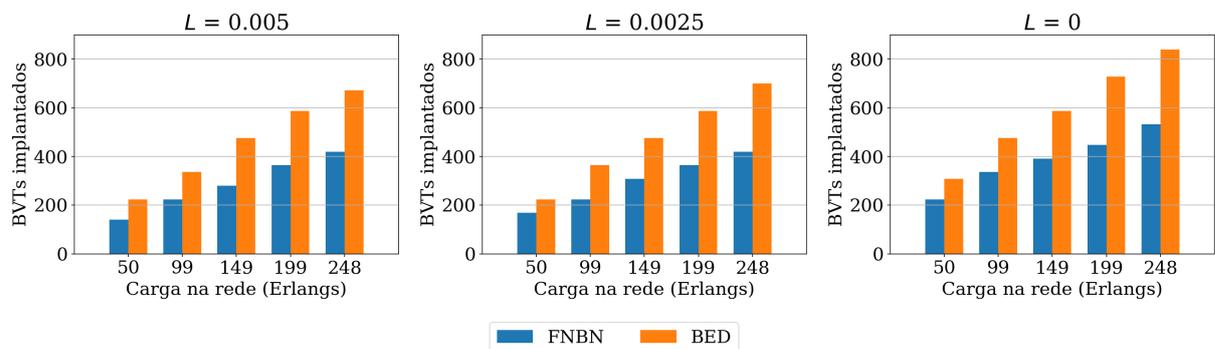
Apesar da redução do número de BVTs implantados, durante a fase de operação da rede a utilização média de BVTs não depende do FNBN ou do BED, esta métrica está mais associada aos algoritmos de alocação de recursos. Então é esperado que sob mesma carga e nível de BB na rede, a utilização de BVTs seja semelhante, independentemente da estratégia de distribuição de BVTs. Por outro lado, como o FNBN distribui os BVTs de maneira mais eficiente, são reduzidos os BVTs ociosos na rede, isto representa uma economia de energia com BVTs em *standby*. A Figura 25 apresenta a PCE obtida com a utilização do FNBN e o BED. Nos resultados apresentados na Figura 25 o limiar de BB_{ab} é

Figura 22 – Bloqueio de banda atingido com o FNBN e o BED com agregação de tráfego em função no número total de BVTs distribuídos na rede.



Fonte: o autor (2021)

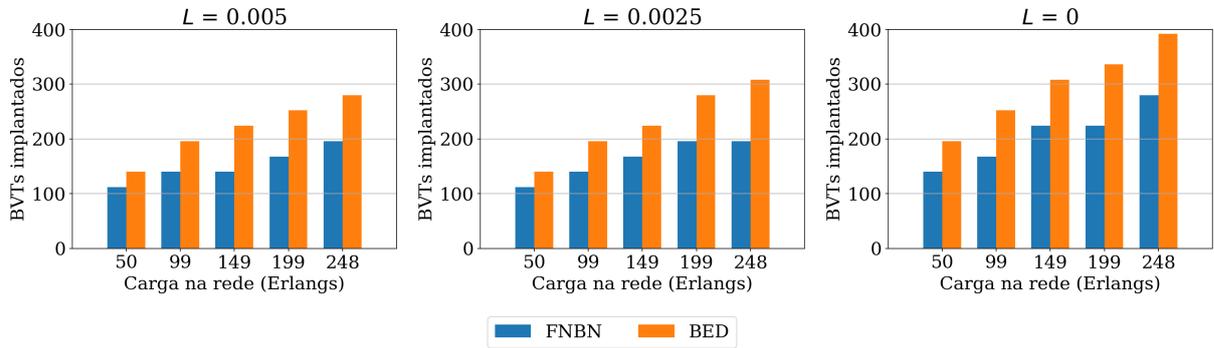
Figura 23 – Quantidade de BVTs necessários para atingir os limiares de tolerância para a BB_{ab} sem agregação de tráfego.



Fonte: o autor (2021)

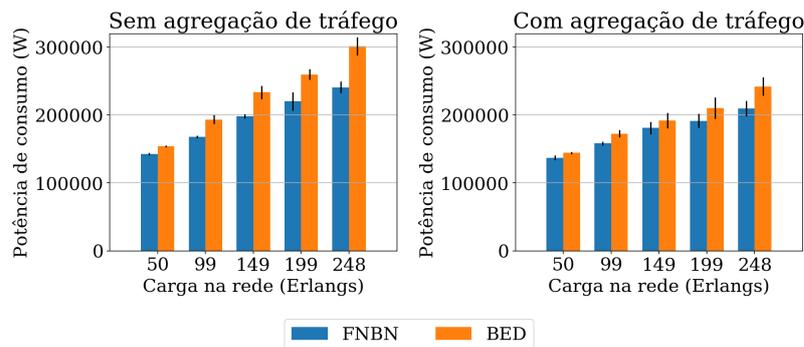
0,0025. De acordo com a estimativa pontual, a rede apresenta PCE menor quando utilizado o algoritmo FNBN tanto com agregação de tráfego quanto sem agregação. Entretanto, sob carga 149 e 199 Erlangs, com agregação de tráfego, há sobreposição dos intervalos de confiança entre as duas soluções avaliadas. Portanto, para estes cenários especificamente, a PCE não é significativamente diferente com as soluções FNBN e BED.

Figura 24 – Quantidade de BVTs necessários para atingir os limiares de tolerância para BB_{ab} com agregação de tráfego.



Fonte: o autor (2021)

Figura 25 – Potência de consumo energético alcançada com o FNBN e o BED respeitando o limiar de BB_{ab} $L = 0,0025$.



Fonte: o autor (2021)

6.4 ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO 3 (AD3)

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de diferentes políticas de agregação de tráfego para EONs, incluindo as políticas WAMPLP e WASA propostas neste trabalho. Ambas políticas propostas utilizam técnicas de inteligência artificial para se adaptarem ao cenário em que são submetidas. Também foram avaliadas as políticas MPH (ZHANG; MARTEL; MUKHERJEE, 2013), *Minimizing the number of Virtual Hops* (MVH) (ZHANG et al., 2015a) e *Minimal Spectrum consumption* (MS) (MINA; AKBAR; ALIZADEH, 2020). Todas as políticas avaliadas foram implementadas no algoritmo de agregação de tráfego MTGAG, também proposto no âmbito desta tese. O MTGAG permite a implementação de políticas de agregação de tráfego cientes de camada física e a utilização de soluções RMSA independentes.

Assim como no AD2, neste estudo de avaliação de desempenho, foram utilizadas as soluções RMSA *Complete Sharing* (WANG; MUKHERJEE, 2014) e *Modulation Selection by QoT and Sigma* (FONTINELE et al., 2017). Foram consideradas as topologias R6TNet

(conceitual) e NSFNet (Real). Para distribuição de BVTs foi utilizada a estratégia BED. Foram consideradas duas condições de disponibilidade de BVTs na rede. Com isso foi possível avaliar a adaptabilidade das políticas propostas em 4 diferentes cenários apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Cenários avaliados no estudo de avaliação de desempenho 3.

Cenário	Topologia	BVTs/nó	Carga na rede (Erlangs)
R6T-140	R6TNet	140	480, 540, 600, 660, 720
R6T-35	R6TNet	35	480, 540, 600, 660, 720
NSF-180	NSFNet	180	1092, 1274, 1456, 1638, 1820
NSF-45	NSFNet	45	1092, 1274, 1456, 1638, 1820

Fonte: o autor (2021)

Diferentemente dos estudos AD1 - Soluções RMSA e AD2 - Dimensionamento/distribuição de BVTs, neste, o tráfego é distribuído de maneira uniforme entre os pares de nós. Foram geradas requisições com taxa de transmissão de 10, 40, 80, 100, 160, 200 e 400 Gbps com proporção 7:6:5:4:3:2:1, respectivamente. Nos cenários R6T-140 e R6T-35, o MTGAG *tuning* foi solucionado considerando a carga de 720 Erlangs, já nos cenários NSF-180 e NSF-45, 1820 Erlangs. Os pesos do MTGAG ajustados pelas políticas WAMLP e WASA são apresentados na Tabela 13. Vale destacar que ao serem aplicadas em cenários diferentes dos avaliados, as políticas WASA e WAMLP irão se ajustar automaticamente gerando outros pesos.

Tabela 13 – Soluções do MTGAG *tuning* encontradas pelas políticas WAMLP e WASA.

Cenário	Política adaptativa	$(W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6)$
R6T-140	WASA	(0,717, 0,334, 0,958, 0,0, 0,353, 0,939)
	WAMLP	(0,8, 0,0, 1,0, 0,0, 0,2, 0,8)
R6T-35	WASA	(0,455, 0,701, 0,339, 0,407, 0,0, 0,0)
	WAMLP	(0,9, 1,0, 0,2, 1,0, 0,0, 0,0)
NSF-180	WASA	(0,764, 0,0, 0,958, 0,0, 0,586, 0,57)
	WAMLP	(0,7, 0,0, 1,0, 0,0, 0,5, 0,4)
NSF-45	WASA	(0,527, 0,6, 0,28, 0,795, 0,0, 0,0)
	WAMLP	(0,2, 1,0, 0,4, 1,0, 0,0, 0,0)

Fonte: o autor (2021)

A Tabela 14 apresenta os parâmetros utilizados pelas soluções WAMLP e WASA no MTGAG *tuning*. A arquitetura da *Multilayer Perceptron Network* (MLP) utilizada na WAMLP é apresentada no Capítulo 4, os parâmetros para a MLP apresentados na Tabela 14 foram escolhidos de maneira empírica buscando a redução do erro absoluto médio.

Tabela 14 – Parâmetros configurados nas soluções WASA e WMLP

WMLP		WASA	
Camadas ocultas	2	Reaquecimentos (R)	5
Neurônios por camada oculta	500	Número máximo de iterações (M)	20
Neurônios na camada de saída	1	Número máximo de perturbações (P)	8
Épocas	1600	α	0,5
Dados para treino	400	Temperatura inicial	1
Dados para teste	40		

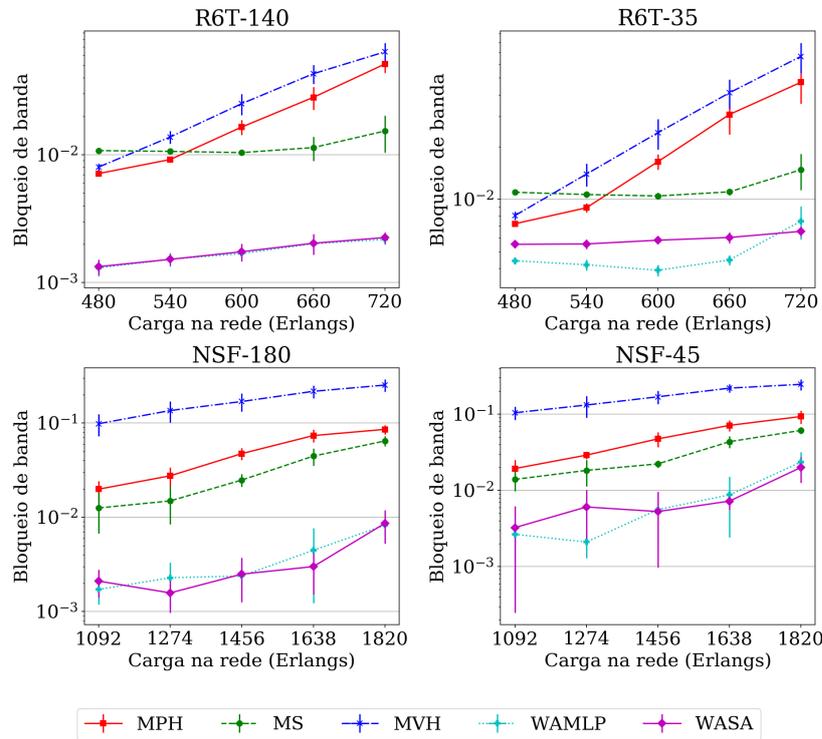
Fonte: o autor (2021)

A Figura 26 apresenta o BB observado em cada cenário avaliado. As políticas MPH, MVH e MS priorizam a reutilização de circuitos ativos sempre que possível, isto reduz a utilização de BVTs. Desta forma, a baixa disponibilidade de BVTs nos cenários R6T-35 e NSF-45 não afetam o BB destas políticas. Em contrapartida, nos cenários R6T-140 e NSF-180, estas políticas provocam a subutilização dos BVTs disponíveis. Por outro lado, as políticas WMLP e WASA se adaptam ao cenário visando a redução do BB. Em todos os cenários avaliados, as políticas adaptativas alcançaram BB menor quando comparadas às outras políticas de agregação de tráfego. Nos cenários com maior disponibilidade de BVTs (R6T-140 e NSF-180), a WMLP e a WASA priorizaram outros fatores em detrimento do reaproveitamento de circuitos ativos. Isto causou maior utilização de BVTs, porém alcançaram redução no BB de pelo menos 81% em relação às demais políticas. Nos cenários com menor disponibilidade de BVTs (R6T-35 and NSF-45), as políticas propostas também obtiveram melhor desempenho, apresentando redução no BB de pelo menos 38% em relação às demais.

Nos cenários R6T-140, NSF-180 e NSF-45, o desempenho das soluções WASA e WMLP em termo de BB não pode ser considerado estatisticamente diferente uma vez que há sobreposição dos intervalos de confiança. Já no cenário R6T-35, o WMLP apresenta menor BB que o WASA sob cargas 480, 540, 600 e 660 Erlangs. Ao observar os pesos ajustados pelas políticas adaptativas apresentados na Tabela 13, observa-se que o cenário R6T-35 foi justamente o cenário em que as políticas adaptativas apresentaram maior diferença. Neste cenário o WMLP priorizou mais os pesos W_1 e W_2 que correspondem ao número de saltos físicos e o número de novos circuitos.

A redução no BB obtida pelas políticas adaptativas vem a custo de maior utilização de BVTs, e conseqüentemente, maior consumo energético na rede. A Figura 27 apresenta a PCE alcançada com as políticas avaliadas. A política MVH alcançou PCE menor ou igual às demais políticas avaliadas. Isto ocorre por 3 motivos: o MVH prioriza a reutilização de circuitos ativos sempre que possível, o uso de menos saltos virtuais por requisição também reduz o número de circuitos ativos e a política apresenta maior BB, o que significa menos

Figura 26 – Bloqueio de banda atingido pelas políticas de agregação de tráfego em função da carga na rede.



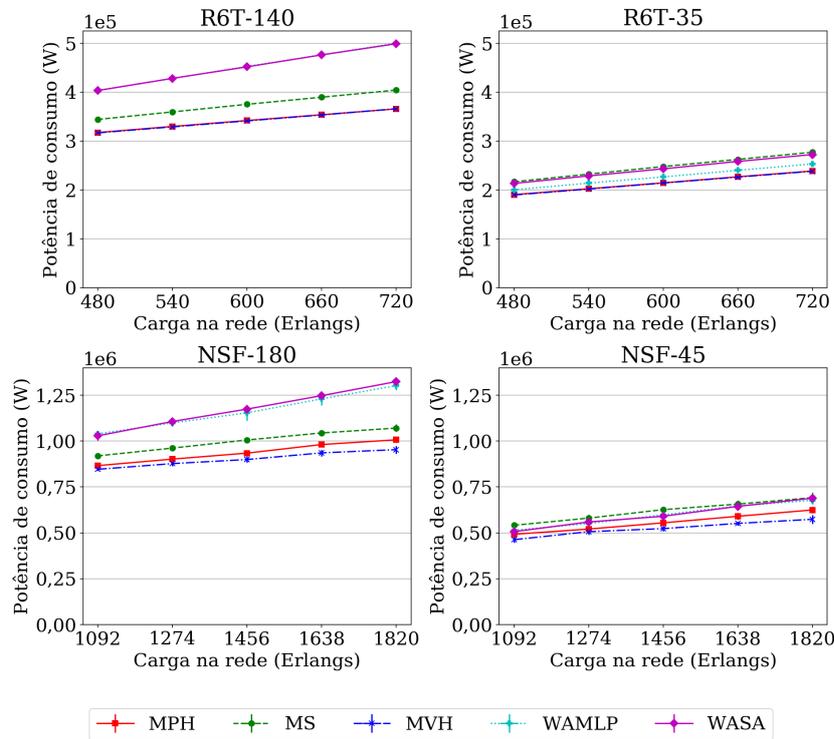
Fonte: o autor (2021)

atendimento das demandas dos clientes. Conforme discutido anteriormente, nos cenários R6T-140 e NSF-180, as políticas WAMPLP e WASA utilizam mais BVTs, isto provoca maior PCE. Nos demais cenários, as políticas adaptativas reduzem o uso de BVTs, e consequentemente, a PCE da rede. Por exemplo, no cenário R6T-140, a política WASA possui PCE pelo menos 27% maior que a MVH, já no cenário R6T-35, esta diferença é de no máximo 6%.

A métrica de Fragmentação Externa (FE) normalmente é explorada em trabalhos que propõem soluções para alocação de espectro uma vez que a alocação e desalocação do espectro óptico é justamente o que causa a fragmentação. Entretanto, neste estudo de avaliação de desempenho observou-se que as políticas de agregação de tráfego influenciam esta métrica, mesmo com a utilização do mesmo algoritmo de alocação de espectro. A Figura 28 apresenta a FE observada em cada cenário. As políticas adaptativas apresentaram menor FE que as demais políticas nos cenários R6T-140, NSF-180, e NSF-45. Nos cenários R6T-140 e NSF-180, a WAMPLP e a WASA obtiveram FE pelo menos 37% menor que as demais políticas. No cenário R6T-35, a WAMPLP obteve FE maior que a MS sob determinadas cargas, entretanto, neste mesmo cenário, a WASA apresenta FE pelo menos 12% menor que as demais políticas.

A métrica RPC serve para medir o nível de agregação de tráfego na rede. Quanto maior a RPC, mais requisições são atendidas por circuito em média. Assim como a FE, esta

Figura 27 – Potência de consumo energético alcançada pelas políticas de agregação de tráfego em função da carga na rede.

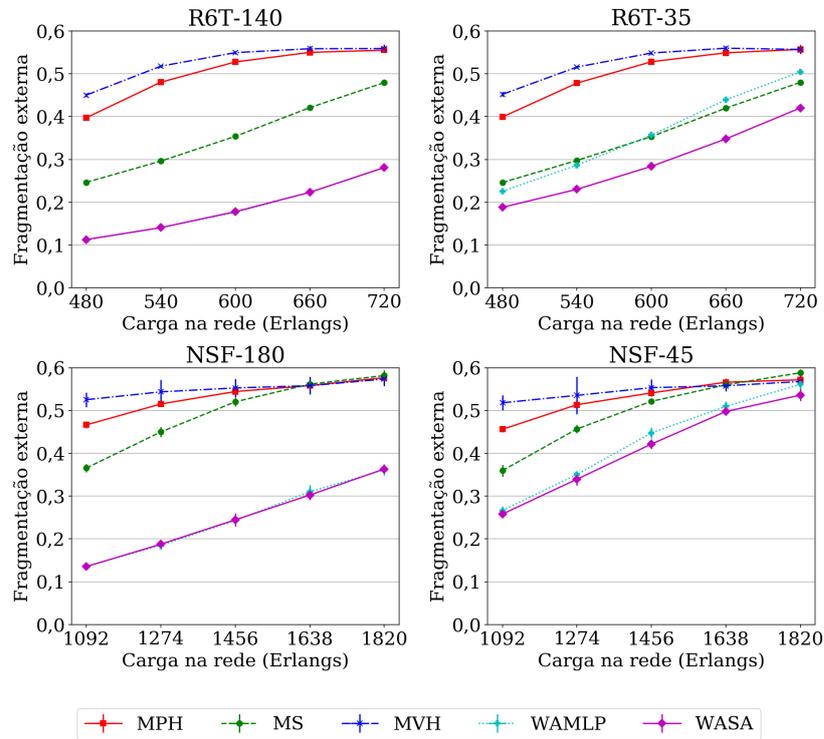


Fonte: o autor (2021)

métrica ajuda a compreender o comportamento dos algoritmos de alocação de recursos, especialmente os responsáveis pela agregação de tráfego. A Figura 29 apresenta a RPC alcançada pelas políticas de agregação de tráfego em cada um dos cenários avaliados. As políticas MPH, MVH e MS sempre priorizam a reutilização de circuitos ativos, por esta razão, estas políticas também apresentam maior RPC que as políticas WASA e WAMPLP. Durante a resolução do MTGAG *tuning*, as políticas adaptativas se ajustam com o único objetivo de reduzir a BB, neste processo, elas convergiram para soluções que alcançam menor RPC nos cenários com maior disponibilidade de BVTs e maior RPC nos cenários com menos BVTs.

No cenário R6T-35, a WAMPLP alcançou menor PCE que a WASA. Em contrapartida, a WASA alcançou menor FE. Nos demais cenários e métricas, ambas políticas adaptativas obtiveram o mesmo desempenho. Como discutido no Capítulo 4, a operação com maior custo nas duas políticas propostas é a simulação computacional executada internamente nos algoritmos para ajuste dos pesos do MTGAG. Nos experimentos realizados neste estudo de avaliação de desempenho, cada simulação levou aproximadamente 1 hora, as especificações da máquina utilizada estão na Tabela 15. Com os parâmetros apresentados na Tabela 14, a WAMPLP executou exatamente 440 simulações para cada cenário avaliado. No pior caso, a WASA precisaria de 800 simulações. Entretanto, nos experimentos realizados, o algoritmo chegou ao ponto de convergência antes de atingir este número,

Figura 28 – Fragmentação externa alcançada pelas políticas de agregação de tráfego em função da carga na rede.



Fonte: o autor (2021)

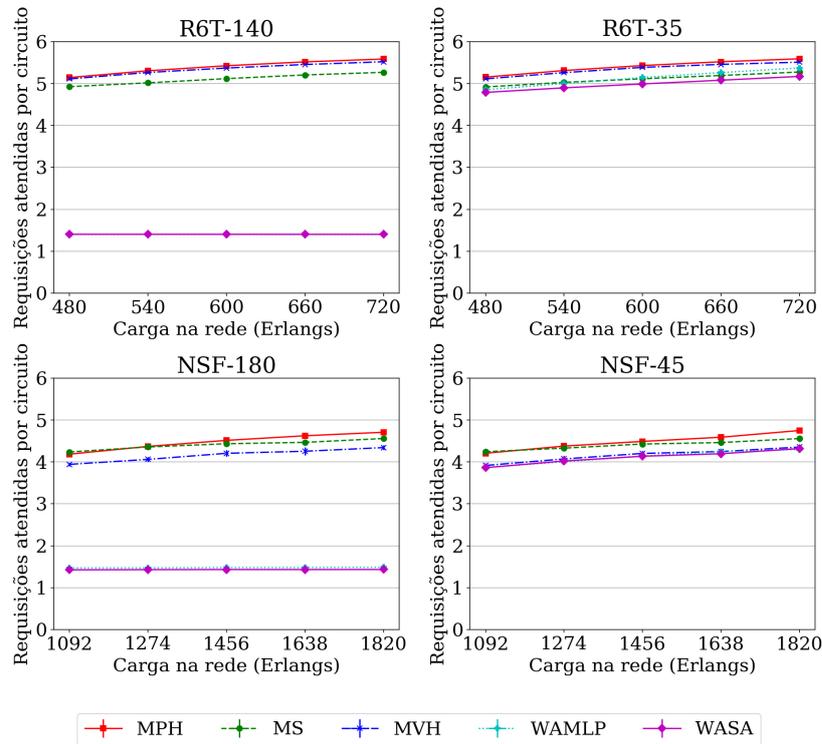
executando entre 400 e 720 simulações. Na prática, a WAMPLP tem duas vantagens em relação à WASA: 1) Em média, são necessárias menos simulações o que por sua vez torna o MTGAG *tuning* menos custoso, 2) como cada elemento do conjunto de treinamento da MLP é independente, todas as simulações da WAMPLP podem ser executadas em paralelo, desde que haja recurso computacional para isso.

Tabela 15 – Especificações da máquina utilizada para realizar as simulações.

Modelo da CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670 v3
Arquitetura	x64
Número de CPUs	32
CPU <i>clock</i>	2.3 GHz
Memória RAM	100Gb

Fonte: o autor (2021)

Figura 29 – Média de requisições atendidas por circuito alcançada pelas políticas de agregação de tráfego em função da carga na rede.



Fonte: o autor (2021)

6.5 ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO 4 (AD4)

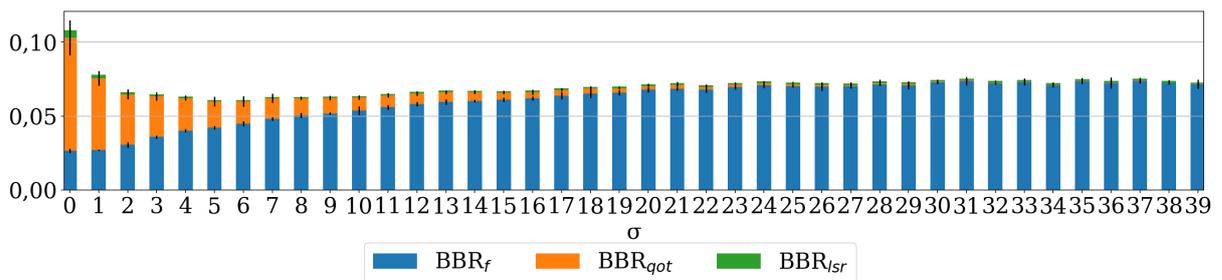
O objetivo deste último estudo de avaliação de desempenho, é avaliar diferentes mecanismos para potencialização da agregação de tráfego. Conforme apresentado no Capítulo 4, existem mecanismos que atuam em conjunto com as soluções RMSA para potencializar a agregação de tráfego na rede. Neste estudo de avaliação de desempenho, o mecanismo SSTG é comparado aos mecanismos baseados em reserva de espectro: SRLP e SRNP (ZHANG et al., 2015a), além disso, estes mecanismos também são comparados ao GRMSA tradicional que consiste na utilização das soluções de agregação de tráfego e RMSA sem nenhum mecanismo de potencialização. O princípio de funcionamento do SSTG é diferente dos demais mecanismos uma vez que ele não realiza reservas prévias de espectro óptico. No entanto, o objetivo final dos mecanismos é o mesmo: facilitar o reaproveitamento de circuitos ativos para o atendimento de múltiplas requisições.

Assim como nos estudos AD2 - Dimensionamento/distribuição de BVTs e AD3 - Políticas de agregação de tráfego, neste estudo de avaliação de desempenho, foram utilizadas as soluções RMSA *Complete Sharing* (WANG; MUKHERJEE, 2014) e *Modulation Selection by QoT and Sigma* (FONTINELE et al., 2017). O dimensionamento/distribuição de BVTs foi feito com a solução FNBN considerando limiar de $BB_{ab}(L)$ 0. Os experimentos foram realizados considerando as topologias NSFNet e *Pacific Bell*. Também foram consideradas

3 políticas de agregação de tráfego diferentes: MVH, MPH e MS. As políticas de agregação de tráfego foram implementadas no algoritmo MTGAG. Assim como no AD3, o tráfego é distribuído de maneira uniforme entre os pares de nós e foram geradas requisições com taxa de transmissão de 10, 40, 80, 100, 160, 200 e 400 Gbps com proporção 7:6:5:4:3:2:1 respectivamente.

De maneira geral, o espaçamento provocado pelo SSTG reduz o BB e o NBI, além disso, aumenta a Eficiência Energética (EE) e a RPC. Entretanto, há um efeito colateral provocado por esta estratégia que é a fragmentação do espectro óptico. A Figura 30 apresenta a decomposição do BB considerando diferentes níveis de espaçamento (σ). É possível observar que há um *tradeoff* entre o BB_f e as demais componentes do BB (BB_{ars} e BB_{qot}). Como foi configurado $L = 0$ no FNBN, o BB_{ab} é 0 em todos os cenários avaliados, desta forma, ele não aparece na Figura 30.

Figura 30 – Decomposição do bloqueio de banda em função do σ na topologia NSFNet com a política MS e carga 1820 Erlangs.



Fonte: o autor (2021)

Como pode ser observado na Figura 30, conforme o valor de σ é incrementado, há uma redução do BB_{ars} e do BB_{qot} que resulta na redução do BB total. A partir de determinado ponto, o BB volta a crescer por conta da fragmentação do espectro. Conforme discutido no Capítulo 2, o bloqueio de uma requisição é considerado no BB_{ars} apenas no seguinte cenário: não é possível atender a requisição com os circuitos ativos e não é possível criar um novo circuito mesmo que sejam desconsideradas as restrições de continuidade, contiguidade e utilizando a modulação com maior eficiência espectral (consideram-se apenas as modulações que seriam possíveis para o circuito em questão caso não houvesse interferência de outros circuitos). Como esta é uma situação pouco comum, a maior parte do BB é composta por BB_f e BB_{qot} .

O Algoritmo 7 apresentado no Capítulo 4 é responsável pela determinação do valor apropriado para σ na fase de planejamento da rede. A Tabela 16 apresenta os valores de σ ajustados para cada topologia e política de agregação de tráfego. Na topologia NSFNet, o valor de σ foi parecido para as três políticas, entretanto, na *Pacific Bell*, a política MS não apresentou bons resultados com altos níveis de espaçamento. Neste cenário, o σ foi

ajustado para 2 *slots*, com a mesma topologia porém com as políticas MPH e MVH, o σ foi ajustado para 26 e 17 *slots*, respectivamente.

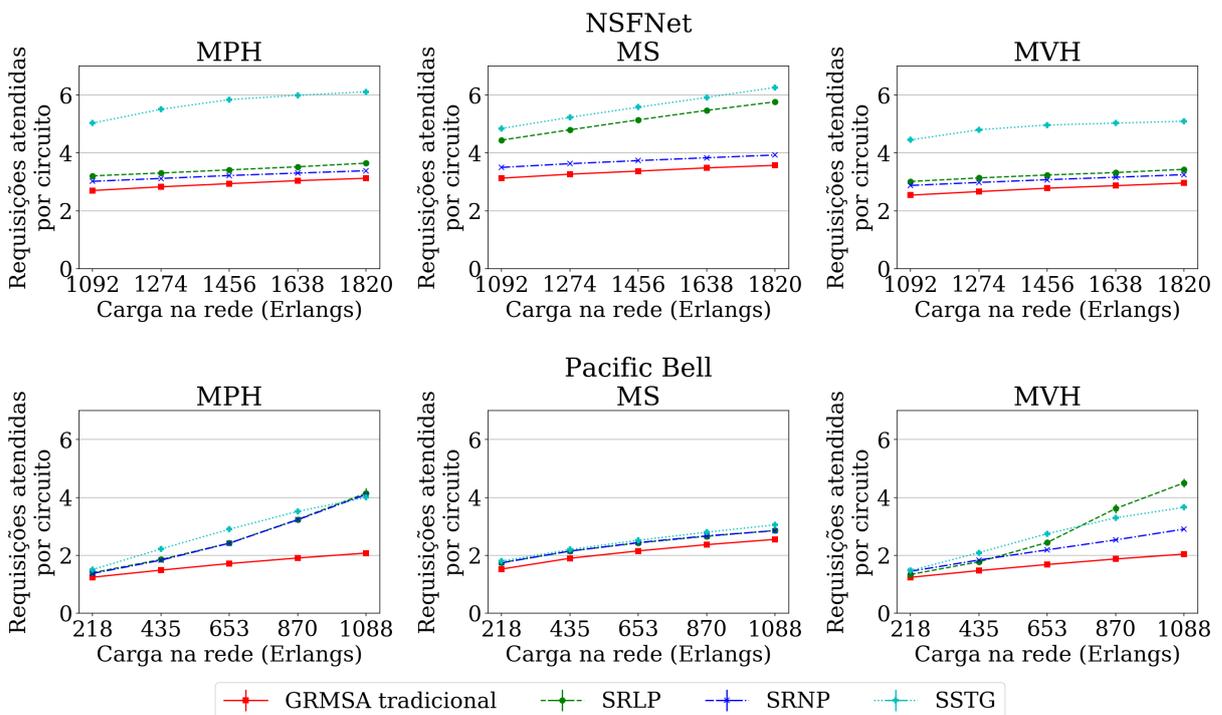
Tabela 16 – Valores de σ ajustados para cada cenário

	NSFNet	Pacific Bell
MPH	8	26
MS	7	2
MVH	7	17

Fonte: o autor (2021)

A Figura 31 apresenta a RPC alcançada pelo SSTG e demais mecanismos de potencialização da agregação de tráfego nas topologias NSFNet e *Pacific Bell* em função da carga na rede. Conforme esperado, o SSTG, o SRLP e o SRNP alcançaram maior RPC que o GRMSA tradicional, isto significa que os mecanismos obtiveram êxito em potencializar a agregação de tráfego na rede. Na NSFNet, o SSTG obteve RPC superior aos demais mecanismos com todas as políticas de agregação de tráfego. Já na *Pacific Bell*, o SSTG apresenta RPC igual ou maior que os demais mecanismos, exceto com a política MVH sob carga 870 e 1088 Erlangs, onde o SRLP apresenta maior RPC.

Figura 31 – Média de requisições atendidas por circuito alcançada pelos mecanismos de potencialização de agregação de tráfego em cada um dos cenários estudados.

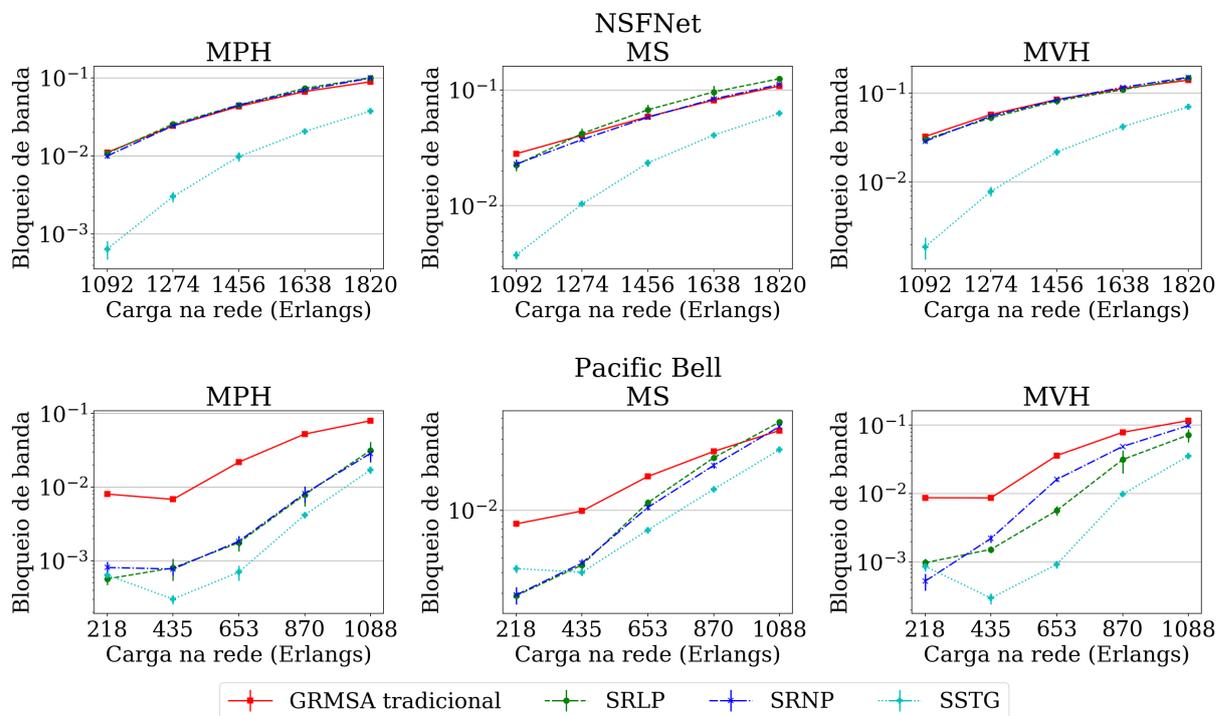


Fonte: o autor (2021)

O principal problema dos mecanismos que fazem reserva de espectro é que, ao fazê-la, há apenas a expectativa de que uma requisição no futuro poderá utilizar aquela capacidade excedente, entretanto, existe a possibilidade de o espectro reservado não ser utilizado, e no pior caso, o esgotamento dos recursos espectrais dificultar a criação de um outro circuito. O SSTG não faz esta reserva, permitindo assim que os slots livres possam ser utilizados para expansão dos circuitos apenas quando for necessário. A Figura 32 apresenta o BB alcançado nos cenários avaliados. Na NSFNet, o SSTG obteve BB pelo menos 57% menor que o SRLP, o SRNP e o GRMSA tradicional. Ainda nesta topologia, com a política MS, o SRLP e o SRNP alcançaram aproximadamente 19% menos BB do que o GRMSA tradicional. Com as políticas MPH e MVH, os mecanismos de reserva de espectro não apresentam BB inferior ao GRMSA tradicional.

Na *Pacific Bell* com a política MS, sob carga 218 Erlangs, os mecanismos SRLP e SRNP apresentam menor BB que o SSTG e o GRMSA tradicional. Neste ponto de carga, a política MS é a que apresenta maior BB comparada às demais políticas avaliadas. Sob cargas 435, 653, 870 e 1088 Erlangs, o SSTG apresenta menor BB que os demais mecanismos em todas as políticas de agregação de tráfego avaliadas. A partir de 653 Erlangs, o SSTG apresenta BB pelo menos 31% e até 83% menor que as demais soluções.

Figura 32 – Bloqueio de banda atingido pelos mecanismos de potencialização de agregação de tráfego em cada um dos cenários estudados.

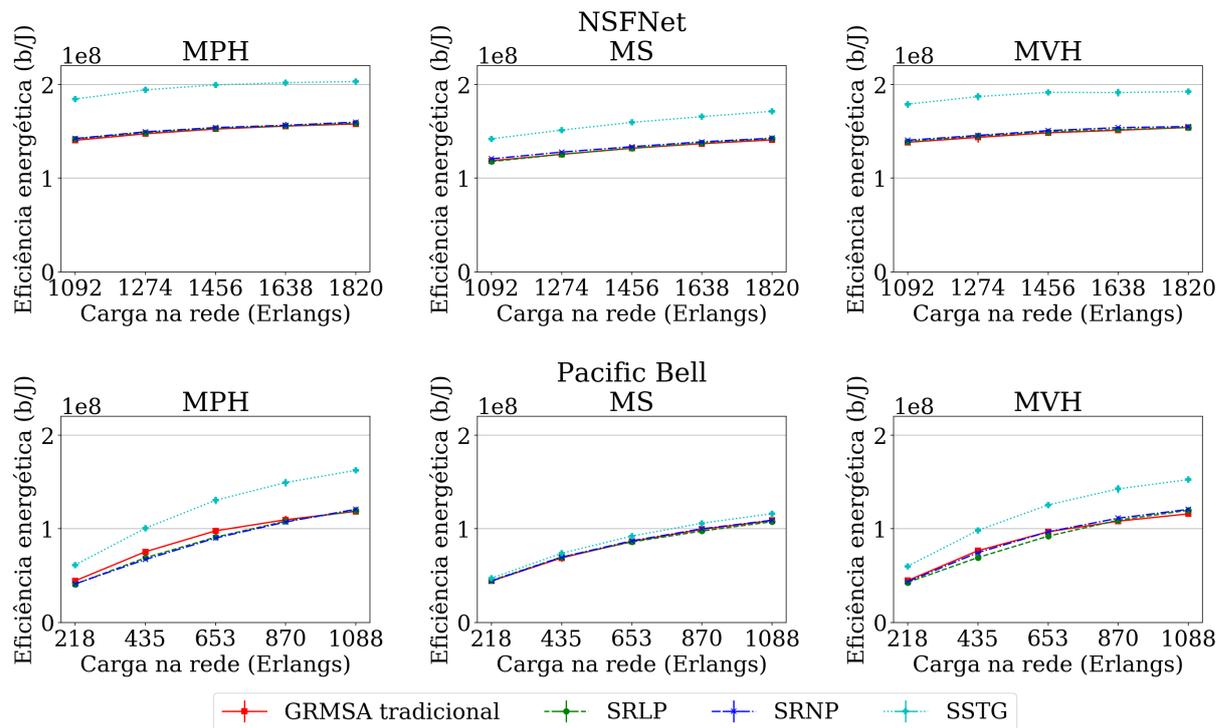


Fonte: o autor (2021)

A EE alcançada pelas soluções avaliadas é apresentada na Figura 33. O incremento na RPC alcançado pelo SSTG (Figura 31) também significa menor utilização de BVTs.

Isto associado à redução do BB (Figura 32) faz com que o SSTG alcance maior EE que as demais soluções em todos os cenários avaliados, conforme pode ser observado na Figura 33. Entre todos os cenários avaliados, a maior EE foi alcançada na topologia NSFNet com a política de agregação de tráfego MPH e com o mecanismo SSTG. Neste cenário, a EE é superior à 170000000 b/J sob todas as carga avaliadas. Por outro lado, a menor EE foi obtida na topologia *Pacific Bell* com a política MS. Neste cenário a diferença entre o SSTG e as demais soluções em termos de EE é de aproximadamente 6%.

Figura 33 – Eficiência energética alcançada pelos mecanismos de potencialização de agregação de tráfego em cada um dos cenários estudados.

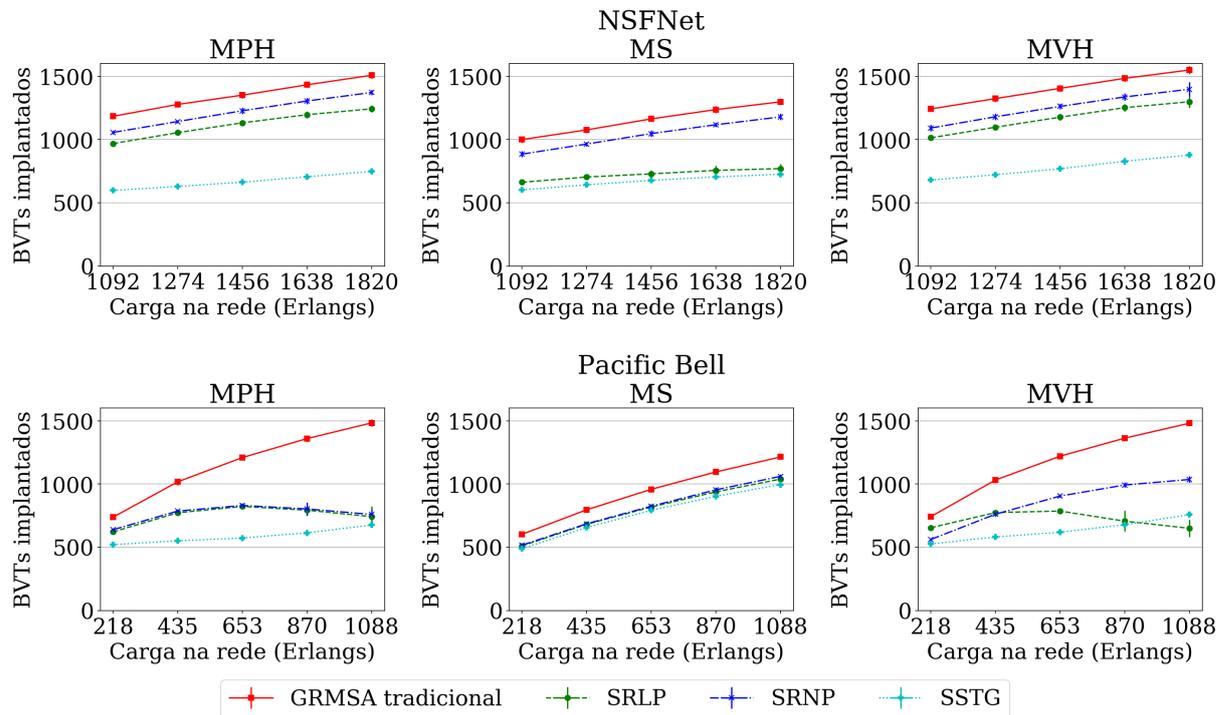


Fonte: o autor (2021)

O dimensionamento de BVTs foi realizado utilizando o FNBN com limiar de BB_{ab} $L = 0$, a quantidade de BVTs necessários para alcançar este limiar é influenciada pelos algoritmos de alocação de recursos, com isso, o NBI também é influenciado. A Figura 34 apresenta o NBI com cada política e mecanismo avaliados. Quando não é utilizado mecanismo para potencializar a agregação de tráfego, o algoritmo de agregação de tráfego tem menos oportunidade para reaproveitamento de circuitos ativos. Por sua vez, isto exige uma quantidade maior de BVTs, por esta razão, o GRMSA tradicional apresenta maior NBI em todos os cenários avaliados.

Quando a rede é submetida a maiores cargas, os instantes de chegada das requisições são mais próximos. Nesta situação, a reserva de espectro se torna menos arriscada. A Figura 34 exemplifica este comportamento: na topologia *Pacific Bell* com política MPH, há uma inflexão na linha de tendência de NBI dos mecanismos SRLP e SRNP por volta

Figura 34 – Número necessário de BVTs implantados alcançado pelos mecanismos de potencialização de agregação de tráfego em cada um dos cenários estudados.



Fonte: o autor (2021)

de 653 Erlangs. Este mesmo comportamento é indicado em outros cenários, entretanto, em alguns deles o ponto de inflexão não foi alcançado. Ainda na Figura 34, observa-se que o SRLP, com política MVH sob carga 870 e 1088 Erlangs exigiu menor NBI que o SSTG. Nos demais cenários, o SSTG requer menor NBI que o GRMSA tradicional, o SRNP e o SRLP. Isto está de acordo com a RPC apresentada na Figura 31.

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

As soluções KBP, FNBN, MTGAG, WAMLP e WASA foram comparadas a outras soluções para planejamento e alocação de recursos em EONs. Devido à variedade de problemas atacados e ao grande número de fatores, a avaliação de desempenho foi organizada em 4 estudos (AD1 - Soluções RMSA, AD2 - Dimensionamento/distribuição de BVTs, AD3 - Políticas de agregação de tráfego e AD4 - Mecanismos de potencialização da agregação de tráfego). De maneira geral, os estudos de avaliação de desempenho apresentados neste capítulo mostraram que as soluções propostas superaram outras soluções disponíveis na literatura sob diversas métricas de avaliação de desempenho.

As soluções propostas no contexto desta tese de doutorado apresentaram redução do BB em relação a outras soluções disponíveis na literatura, isto significa maior capacidade

de atendimento da rede e, conseqüentemente, maior receita para a operadora que pode admitir um número maior de clientes. Apesar deste incremento na capacidade de atendimento, as soluções propostas não sacrificam o consumo energético. Algumas das soluções propostas como o FNBN e o KBP inclusive reduzem o consumo energético na rede o que favorece a redução dos custos de operação. O FNBN bem como as soluções propostas para agregação de tráfego também permitem a redução do NBI, o que por sua vez representa um menor custo de implantação da rede.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A flexibilidade na alocação de recursos provida pelas *Elastic Optical Networks* (EONs) permite a utilização mais eficiente dos recursos da rede. Isto ocorre devido à melhor adequação da capacidade dos circuitos estabelecidos às demandas dos clientes. Por esta razão, as EONs são apontadas pela literatura como a principal alternativa para compor as redes de transporte no futuro, substituindo as atuais redes ópticas com grade fixa. Contudo, a adoção de EONs traz novos desafios e problemas e atualiza alguns já existentes para outros tipos de rede óptica. Entre eles estão os problemas abordados neste trabalho: a agregação de tráfego, o *Routing, Modulation and Spectrum Allocation* (RMSA) e o dimensionamento/distribuição de *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs).

Este capítulo sintetiza a pesquisa desenvolvida no contexto deste trabalho de doutorado e apresenta nossas contribuições, conclusões e trabalhos futuros. O restante do capítulo está organizado da seguinte forma: A Seção 7.1 apresenta um resumo das contribuições e conclusões do trabalho. A Seção 7.2 apresenta a produção bibliográfica desenvolvida no contexto deste trabalho. Por fim, a Seção 7.3 apresenta os trabalhos futuros.

7.1 CONCLUSÕES

A Tabela 17 apresenta as soluções propostas no contexto deste trabalho para problemas de EONs. No Capítulo 6, estas soluções são comparadas a outras soluções presentes na literatura considerando as principais métricas de avaliação de desempenho de EONs. Alguns trabalhos da literatura investigam o impacto da limitação do número de BVTs no desempenho da rede. Entretanto, o dimensionamento/distribuição de BVTs é um problema pouco abordado. Apesar disto, como discutido nos Capítulos 2 e 3, o problema de dimensionamento possui impacto direto no *Capital Expenditure* (CapEx) devido ao custo dos BVTs, no *Operational Expenditure* (OpEx) devido ao consumo energético destes equipamentos e na capacidade de atendimento da rede. Já o problema de distribuição se torna mais relevante quando há agregação de tráfego *multihop* e distribuição de tráfego não uniforme entre os nós. Neste sentido, foi proposta a solução *Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization* (FNBN). Como ainda não há outras soluções para dimensionamento/distribuição de BVTs mais sofisticadas, o FNBN foi comparado à estratégia mais utilizada na literatura, a *BVTs Evenly Distributed* (BED). Esta estratégia distribui os BVTs de maneira uniforme entre os nós da rede.

Por outro lado, diversos trabalhos na literatura propõem soluções para o problema RMSA. Estas soluções podem ser focadas na redução de impactos da camada física *Impairment-aware* RMSA, redução da fragmentação do espectro *Fragmentation-aware* RMSA, atendimento mais igualitário a requisições com diferentes pares(o,d) e taxas de

Tabela 17 – Problemas abordados e soluções propostas.

Problemas abordados	Soluções propostas
Dimensionamento/distribuição de BVTs	FNBN
Roteamento	KBP
Algoritmo de agregação de tráfego	MTGAG
Políticas de agregação de tráfego	WAMPLP, WASA
Potencialização da agregação de tráfego	SSTG

Fonte: o autor (2021)

transmissão *Fairness-aware* RMSA, dentre outros fatores. Um ponto em comum entre diversas destas propostas é a computação prévia de rotas candidatas para cada par de nós da rede durante a fase de planejamento. Durante a fase de operação, quando um circuito precisa ser criado, estas soluções RMSA escolhem entre as rotas candidatas, a mais adequada de acordo com uma política própria. A maioria destes trabalhos utiliza o tradicional algoritmo de menor caminho *K-Shortest Paths* (KSP), mais precisamente, uma de suas variações, considerando o menor número de saltos ou o menor comprimento da rota, *KSP hops* (KSP_h) e *KSP distance* (KSP_d) respectivamente. O algoritmo *K Balanced Paths* (KBP) foi proposto neste trabalho como alternativa a estes algoritmos para computar as rotas alternativas, desta forma, as mesmas soluções RMSA podem ser aproveitadas. O principal diferencial do KBP é que ele fornece um conjunto de rotas alternativas que promove um balanceamento de carga, mesmo que essa política não seja priorizada nas etapas seguintes do RMSA. Isto por sua vez reduz a formação de gargalos nos enlaces da rede.

A agregação de tráfego permite alcançar maior eficiência na utilização dos recursos através do compartilhamento de circuitos para atender diversas requisições. Nas EONs, a agregação de tráfego permite reduzir a utilização de BVTs e o desperdício de espectro óptico com bandas de guarda. Alguns trabalhos na literatura avaliam diversas políticas de agregação de tráfego em diferentes cenários. Conforme discutido no Capítulo 4, diferentes políticas de agregação de tráfego podem ser mais ou menos adequadas a cenários específicos. Neste trabalho foram propostas as políticas *Weight Adjustment with Multilayer Perceptron Network* (WAMPLP) e *Weight Adjustment with Simulated Annealing* (WASA) que utilizam técnicas de inteligência artificial para se adaptarem ao cenário a que são submetidas. Dentre os fatores considerados pelas políticas propostas, estão a *Signal to Noise Ratio* (SNR) dos circuitos ópticos, tornando estas políticas cientes de camada física. A WAMPLP e a WASA foram comparadas a outras políticas de agregação de tráfego encontradas na literatura. Todas as políticas avaliadas foram implementadas no algoritmo de agregação de tráfego *Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph* (MTGAG), também proposto neste trabalho. O MTGAG é um algoritmo de agregação

de tráfego baseado em grafos auxiliares que permite a definição de políticas de agregação de tráfego através da definição de pesos em uma função de custo. Além disso, o MTGAG permite a utilização de soluções RMSA independentes.

Quando as soluções RMSA são acionadas para criar um novo circuito na rede, caso a taxa de transmissão do novo circuito seja a mínima suficiente para atender à necessidade atual (de uma nova requisição), o reaproveitamento de circuitos para agregação de tráfego no futuro pode ser prejudicado. Neste sentido, alguns mecanismos de reserva prévia de espectro foram propostos na literatura (*Spectrum Reservation for each Light Path* (SRLP) e *Spectrum Reservation for each Node Pair* (SRNP)). Estes são chamados mecanismos para potencialização da agregação de tráfego. Neste trabalho também é proposto o *Spectrum Spacing for Traffic Grooming* (SSTG), um mecanismo para potencialização da agregação de tráfego que atua em conjunto com as soluções RMSA provocando espaçamento entre o espectro alocado para cada circuito.

A Tabela 18 apresenta a redução de Bloqueio de Banda (BB) promovida pelo KBP em relação aos demais algoritmos de roteamento. Como foi mostrado no Capítulo 6, nos cenários onde o KBP foi avaliado, sob carga 50 e 99 Erlangs, todas as soluções apresentaram BB estatisticamente semelhante a 0, isto ocorre devido à baixa demanda na rede. Por este motivo, a adoção do KBP nesta circunstância não apresenta nenhuma redução no BB. Entretanto, a partir de 149 Erlangs, o KBP apresenta BB pelo menos 20,8% e até 96,2% menor que o KSP_h e o KSP_d . Vale destacar, que mesmo com esta redução no BB, considerando a estimativa intervalar apresentada no Capítulo 6, o KBP não apresentou incremento no Potência de Consumo Energético (PCE). Considerando apenas a estimativa pontual, o KBP apresentou incremento na PCE de no máximo 1,6%.

Tabela 18 – Redução no BB promovida pelo KBP em relação ao melhor entre KSP_h e KSP_d em cada solução RMSA.

carga na rede	PP	Firstfit	RQoTO
50 Erlangs	0	0	0
99 Erlangs	0	0	0
149 Erlangs	20,80%	92,60%	33,10%
199 Erlangs	65,90%	96,20%	63,10%
248 Erlangs	77,40%	87,30%	47,30%

Fonte: o autor (2021)

A Tabela 19 apresenta a redução no Número de BVTs Implantados (NBI) proporcionado pelo FNBN. Os experimentos realizados mostraram que o FNBN permite a redução do NBI em pelo menos 20% e até 41,1% nos cenários avaliados com carga maior ou igual a 149 Erlangs. Além disso, por distribuir os BVTs de maneira mais eficiente, há menos desperdício com BVTs em *standby*, desta forma, o FNBN também reduz a PCE na rede.

Tabela 19 – Redução no número de BVTs implantados (NBI) promovida pelo FNBN em relação ao BED de acordo com a carga e o limiar de BB_{ab} .

Carga	Com agregação de tráfego			Sem agregação de tráfego		
	L = 0,005	L = 0,0025	L = 0	L = 0,005	L = 0,0025	L = 0
50 Erlangs	37,5%	25%	27,3%	20%	20%	28,6%
99 Erlangs	33,3%	38,5%	29,4%	28,6%	28,6%	33,3%
149 Erlangs	41,1%	35,3%	33,3%	37,5%	25%	27,3%
199 Erlangs	38,1%	38,1%	38,5%	33,3%	30%	33,3%
248 Erlangs	37,5%	40%	36,7%	30%	36,4%	28,6%

Fonte: o autor (2021)

Em termos de BB, as políticas WMLP e WASA não apresentaram diferença significativa de desempenho entre si. A Tabela 20 apresenta a redução no BB promovida pelas políticas adaptativas em relação às demais políticas avaliadas (*Minimizing the number of Virtual Hops* (MVH), *Minimizing the number of Physical Hops* (MPH) e *Minimal Spectrum consumption* (MS)) em cada um dos cenários apresentados no Capítulo 6. Pelo fato de se adaptar ao cenário em que são aplicadas e utilizar informações da camada física nas tomadas de decisão, a WMLP e a WASA obtiveram BB pelo menos 38,8% e até 90,3% menor que políticas de agregação de tráfego tradicionais. Além disso, observou-se que as políticas propostas apresentam menor Fragmentação Externa (FE). Em contrapartida, a PCE obtida com as políticas propostas também é maior que o das demais políticas, isto ocorre devido a dois fatores: 1) maior nível de atendimento às requisições dos clientes e, 2) a aplicação das técnicas de inteligência artificial tem como única função objetivo a minimização do BB a qualquer custo.

Tabela 20 – Redução no BB promovida pelas políticas adaptativas em relação às demais políticas avaliadas em cada um dos cenários abordados.

Carga	R6T-140	R6T-35	Carga	NSF-180	NSF-45
480 Erlangs	81,7%	38,8%	1092 Erlangs	86,3%	81,0%
540 Erlangs	83,4%	53,0%	1274 Erlangs	84,7%	88,5%
600 Erlangs	83,8%	62,6%	1456 Erlangs	90,3%	75,0%
660 Erlangs	82,3%	59,4%	1638 Erlangs	90,0%	80,0%
720 Erlangs	85,8%	49,4%	1820 Erlangs	87,2%	61,6%

Fonte: o autor (2021)

O mecanismo SSTG apresentou BB inferior aos mecanismos SRLP, SRNP e ao GRMSA tradicional em quase todos os cenários avaliados. A Tabela 21 apresenta a redução no BB promovida pelo SSTG em relação à melhor dentre as demais soluções avaliadas. Conforme

mostrado no Capítulo 6, na topologia Pacific Bell sob 218 Erlangs, os mecanismos de potencialização da agregação de tráfego permitiram o atendimento de 100% das requisições, desta forma, não haveria como o SSTG reduzir ainda mais o BB. Nos demais cenários, o SSTG obteve BB pelo menos 13,2% e até 93,6% menor que as demais soluções. Além disso, o SSTG também apresentou melhor desempenho que as demais soluções considerando as métricas: Taxa de requisições atendidas Por Circuito (RPC), Eficiência Energética (EE) e NBI.

Tabela 21 – Redução na BB promovida pelo mecanismo SSTG em relação aos mecanismos SRLP, SRNP e o GRMSA tradicional.

NSFNet				Pacific Bell			
Carga	MPH	MS	MVH	Carga	MPH	MS	MVH
1092	93,6%	83,4%	93,5%	218	0%	0%	0%
1274	87,6%	72,2%	85%	435	60,9%	13,2%	80,6%
1456	77,2%	59,6%	73,2%	653	60,2%	35,4%	83,7%
1638	69,1%	50,1%	61,5%	870	46,8%	37,1%	68,8%
1820	57,8%	41,9%	49,8%	1088	40,6%	31,2%	50,5%

Fonte: o autor (2021)

7.2 PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

As soluções propostas e experimentos desenvolvidos no contexto deste trabalho são apresentados nos seguintes artigos: 1) Um mecanismo para potencialização da agregação de tráfego em redes ópticas elásticas (SANTOS et al., 2019), 2) Um Algoritmo para Dimensionamento e Distribuição de BVTs em Redes Ópticas Elásticas (SANTOS; SOARES; MONTEIRO, 2021), 3) *A Spectrum Spacing Mechanism to Enhance Traffic Grooming in Elastic Optical Networks* (SANTOS et al., 2021), 4) *Adaptive Traffic Grooming in Elastic Optical Networks* e 5) Um Novo Algoritmo Para Escolha de K Rotas Alternativas em Redes Ópticas Elásticas. Os artigos 1 e 2 foram aceitos para publicação no Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC) nas edições de 2019 e 2021 respectivamente. O artigo 3 foi aceito para publicação no periódico *Photonic Network Communications* (PNet). O artigo 4 foi submetido para apreciação no periódico PNet e por fim, o artigo 5 será submetido para o periódico *Optical Switching and Networking* (OSN).

Além desses, também contribuí como coautor no desenvolvimento de outros artigos científicos com temas relacionados: 6) Alocação de Espectro com Redução de Interferências entre Circuitos em Redes Ópticas Elásticas (FONTINELE et al., 2018), 7) Novo Algoritmo para Provisão de Banda de Guarda Adaptativa em Redes Ópticas Elásticas (MONTEIRO et

al., 2019), 8) Novo Algoritmo para Atribuição de Potência por Circuito em Redes Ópticas Elásticas (FONTINELE et al., 2020) e 9) Algoritmo de Balanceamento Inter-Núcleos para Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial (JUNIOR et al., 2020). Os artigos 6, 7, 8 e 9 foram aceitos para publicação no SBRC nas edições de 2018, 2019, 2020 e 2020 respectivamente. Além desses, há um trabalho intitulado *Impairment-aware Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks*, submetido para apreciação no periódico *Computer Networks*.

7.3 TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros serão investigados outros problemas do planejamento de EONs como a distribuição não uniforme de amplificadores ópticos e a aplicação de técnicas de inteligência artificial no ajuste da *Power Spectral Density* (PSD). Também é possível considerar a recomputação periódica dos parâmetros ajustados em fase de planejamento para as propostas KBP e SSTG. Isto poderia aprimorar as soluções em cenários mais dinâmicos como redes metropolitanas. Também pretendemos investigar a aplicação de outras técnicas de aprendizagem de máquina para solucionar o MTGAG *tuning* além das já empregadas nas políticas WASA e WAMLP.

Em trabalhos futuros as propostas deste trabalho serão avaliadas em outros cenários de topologia e distribuição de tráfego. Pretendemos avaliar como as soluções propostas se comportam em conjunto com soluções para sobrevivência e desfragmentação de rede, bem como em EONs multicore.

Por fim, também é de interesse avaliar as soluções propostas considerando diferentes requisições com diferentes classes de serviços e clientes com diferentes requisitos previstos em *Service-Level Agreement* (SLA). A partir disto, podem ser indentificadas possíveis adaptações nas propostas existentes considerando as particularidades do tráfego com diferenciação de serviço.

REFERÊNCIAS

- ABKENAR, F. S.; RAHBAR, A. G. Study and analysis of routing and spectrum allocation (RSA) and routing, modulation and spectrum allocation (RMSA) algorithms in elastic optical networks (EONs). *Optical Switching and Networking*, v. 23, p. 5–39, 2017. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427716300741>>.
- AIBIN, M.; BLAZEJEWSKI, M. Complex elastic optical network simulator (CEONS). In: *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4. ISSN 2162-7339.
- BEHERA, S.; DAS, G. Dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with minimal disruption. In: *2020 National Conference on Communications (NCC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–5.
- BEHERA, S.; DEB, A.; DAS, G.; MUKHERJEE, B. Impairment aware routing, bit loading, and spectrum allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 37, n. 13, p. 3009–3020, 2019.
- BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A. A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 18, p. 3043–3054, Sept 2013. ISSN 0733-8724.
- CAVALCANTE, M. A.; PEREIRA, H. A.; ALMEIDA, R. C. Simeon: an open-source elastic optical network simulator for academic and industrial purposes. *Photonic Network Communications*, p. 1–9, 2017.
- CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 3, p. 1776–1800, thirdquarter 2015. ISSN 1553-877X.
- CHOLLET, F. et al. *Keras*. 2015. <<https://keras.io>>.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 9, p. 1354–1366, May 2011. ISSN 0733-8724.
- CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. *Introduction to Algorithms, Third Edition*. 3rd. ed. [S.l.]: The MIT Press, 2009. ISBN 0262033844.
- COSTA, L.; DRUMMOND, A. Novo algoritmo RMLSA com roteamento multihop em redes Ópticas elásticas. *SBRC*, 2016. Disponível em: <<http://www.sbrc2016.ufba.br/downloads/SessoesTecnicas/152171.pdf>>.
- COSTA, L. R.; SOUSA, L. de; OLIVEIRA, F.; SILVA, K.; JÚNIOR, P.; DRUMMOND, A. On: Simulador de eventos discretos para redes Ópticas wdm / eon. In: . [S.l.: s.n.], 2016.
- DELVALLE, L.; ALFONZO, E.; ROA, D. P. P. EONS: An online RSA simulator for elastic optical networks. In: *2016 35th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–12.

- DHARMAWEERA, M. N.; ZHAO, J.; YAN, L.; KARLSSON, M.; AGRELL, E. Traffic-grooming- and multipath-routing-enabled impairment-aware elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 8, n. 2, p. 58–70, 2016.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959. ISSN 0945-3245. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF01386390>>.
- FAN, Z.; QIU, Y.; CHAN, C. Dynamic multipath routing with traffic grooming in OFDM-based elastic optical path networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 1, p. 275–281, 2015.
- FONTINELE, A. *Um Novo Algoritmo RSA Ciente de Imperfeições de Camada Física para Redes Ópticas Elásticas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Piauí, 2016.
- FONTINELE, A. *Algoritmos RMLSA Cientes de Imperfeições de Camada Física em Redes Ópticas Elásticas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 10 2021.
- FONTINELE, A.; SANTOS, I.; JR., J. L.; SOARES, A.; MONTEIRO, J.; CAMPELO, D. Alocação de espectro com redução de interferências entre circuitos em redes Ópticas elásticas. In: *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2018. p. 561–574. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/2442>>.
- FONTINELE, A.; SANTOS, I.; JÚNIOR, J. L.; SOARES, A.; CARTAXO, A.; CAMPELO, D. Novo algoritmo para atribuição de potência por circuito em redes Ópticas elásticas. In: *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2020. p. 561–574. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/12309>>.
- FONTINELE, A.; SANTOS, I.; NETO, J. N.; CAMPELO, D. R.; SOARES, A. An efficient IA-RMLSA algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, v. 118, p. 1 – 14, 2017. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128617300634>>.
- GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep Learning*. [S.l.]: MIT Press, 2016. <<http://www.deeplearningbook.org>>.
- HABIBI, M.; BEYRANVAND, H. Impairment-aware manycast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 11, n. 5, p. 179–189, 2019.
- HALDER, J.; ACHARYA, T.; CHATTERJEE, M.; BHATTACHARYA. E-S-RSM-RSA: A novel energy and spectrum efficient regenerator aware multipath based survivable rsa in offline eon. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, p. 1–1, 2021.
- HAYKIN, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2. ed. [S.l.]: Porto Alegre, 2001.

- IVES, D. J.; BAYVEL, P.; SAVORY, S. J. Routing, modulation, spectrum and launch power assignment to maximize the traffic throughput of a nonlinear optical mesh network. *Photonic Network Communications*, v. 29, n. 3, p. 244–256, Jun 2015. ISSN 1572-8188. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11107-015-0488-0>>.
- IZQUIERDO-ZARAGOZA, J.; PAVON-MARINO, P.; BUENO-DELGADO, M. Distance-adaptive online rsa algorithms for heterogeneous flex-grid networks. In: *2014 International Conference on Optical Network Design and Modeling*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 204–209.
- JAIN, R. *The art of computer systems performance analysis - techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. [S.l.]: Wiley, 1991. I-XXVII, 1-685 p. (Wiley professional computing). ISBN 978-0-471-50336-1.
- JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICKI, B.; TSUKISHIMA, Y.; SONE, Y.; MATSUOKA, S. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 11, p. 66–73, November 2009. ISSN 0163-6804.
- JOHANNISSON, P.; AGRELL, E. Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 23, p. 4544–4552, Dec 2014. ISSN 0733-8724.
- JUNIOR, J. L.; FONTINELE, A.; SANTOS, I.; LEÃO, E.; CAMPELO, D.; MONTEIRO, J. A.; SOARES, A. Algoritmo de balanceamento inter-núcleos para redes Ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. In: *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2020. p. 519–532. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/12306>>.
- KHODASHENAS, S.; COMELLAS, J.; SPADARO, S.; Perelló, J. Dynamic source aggregation of subwavelength connections in elastic optical networks. *Photonic Network Communications*, v. 26, n. 2-3, p. 131–139, 2013. ISSN 1387974X.
- KIM, J.; YAN, S.; FUMAGALLI, A.; OKI, E.; YAMANAKA, N. An analytical model of spectrum fragmentation in a two-service elastic optical link. In: *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, v. 220, p. 671–680, maio 1983.
- KLINKOWSKI, M.; ZALEWSKI, G. Dynamic crosstalk-aware lightpath provisioning in spectrally-spatially flexible optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 11, n. 5, p. 213–225, 2019.
- KOZICKI, B.; TAKARA, H.; YONENAGA, K.; JINNO, M. Efficient elastic optical path network for transmission beyond 100G. In: WEIERSHAUSEN, W.; DINGEL, B.; DUTTA, A. K.; SRIVASTAVA, A. K. (Ed.). *Optical Metro Networks and Short-Haul Systems III*. [S.l.]: SPIE, 2011. v. 7959, p. 151 – 159.
- KRETSIS, A.; CHRISTODOULOPOULOS, K.; KOKKINOS, P.; VARVARIGOS, E. Planning and operating flexible optical networks: Algorithmic issues and tools. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 1, p. 61–69, January 2014. ISSN 0163-6804.

LACERDA, J.; FONTINELE, A.; SANTOS, I.; LEAO, E.; CAMPELO, D.; MONTEIRO, J.; SOARES, A. Algoritmo de balanceamento inter-núcleos para redes Ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. In: *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: [s.n.], 2020. p. 519–532. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/12306>>.

LEE, K.; KIM, Y. Dynamic spectrum assignment algorithm based on fuzzy logic to reduce fragmentation in eons. In: *2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 662–666.

MAJUMDAR, P.; PAL, A.; DE, T. Extending light-trail into elastic optical networks for dynamic traffic grooming. *Optical Switching and Networking*, v. 20, p. 1 – 15, 2016. ISSN 1573-4277.

MINA, S.; AKBAR; ALIZADEH, B. Load balancing, multipath routing and adaptive modulation with traffic grooming in elastic optical networks. *Computer Networks*, v. 169, p. 107081, 2020. ISSN 1389-1286.

MONTEIRO, N.; SOARES, A.; FONTINELE, A.; SANTOS, I. G.; CAMPELO, D.; OLIVEIRA, A. Novo algoritmo para provisão de banda de guarda adaptativa em redes Ópticas elásticas. In: *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 307–320. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7368>>.

PATEL, A. N.; JI, P.; JUE, J.; WANG, T. Routing, wavelength assignment, and spectrum allocation in transparent flexible optical WDM (FWDM) networks. *Optical Switching and Networking*, v. 9, 07 2010.

PATEL, B.; JI, H.; NAYAK, S.; DING, T.; PAN, Y.; AIBIN, M. On efficient candidate path selection for dynamic routing in elastic optical networks. In: *2020 11th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 0889–0894.

PEDERZOLLI, F.; SIRACUSA, D.; ZANARDI, A.; GALIMBERTI, G.; FAUCI, D. L.; MARTINELLI, G. Path-based fragmentation metric and RSA algorithms for elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 11, n. 3, p. 15–25, 2019.

RIVAL, O.; MOREA, A. Elastic optical networks with 25–100G format-versatile WDM transmission systems. In: *OECC 2010 Technical Digest*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 100–101. ISSN 2166-8884.

ROSA, A.; WIATR, P.; CAVDAR, C.; CARVALHO, S.; COSTA, J.; WOSINSKA, L. Statistical analysis of blocking probability and fragmentation based on markov modeling of elastic spectrum allocation on fiber link. *Optics Communications*, v. 354, 06 2015.

SANTOS, A. F.; COUTO, G. S.; MANIÇOBA, R. H. C.; ASSIS, K. D. R.; ALMEIDA, R. C. Simrsa: An education tool for network planning in spectrum-sliced elastic optical path networks. In: *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4. ISSN 2162-7339.

SANTOS, I. *Alocação de Recursos Para o Estabelecimento de Circuitos em Redes Ópticas WDM e OFDM*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Piauí, 2015.

SANTOS, I. *SLICE Network Simulator*. [S.l.]: GitHub, 2017. <<https://github.com/iallengabio/SNetS>>.

SANTOS, I.; MONTEIRO, J. A.; SOARES, A.; FONTINELLE, A.; CAMPELO, D. A spectrum spacing mechanism to enhance traffic grooming in elastic optical networks. *Photonic Network Communications*, v. 42, 08 2021.

SANTOS, I.; SOARES, A.; MONTEIRO, J. Um algoritmo para dimensionamento e distribuição de bvts em redes Ópticas elásticas. In: *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2021. p. 672–685. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/16755>>.

SANTOS, I. G.; HIAGO, L.; FONTINELE, A.; MONTEIRO, J. A. S.; SOARES, A.; CAMPELO, D. Um mecanismo para potencialização da agregação de tráfego em redes ópticas elásticas. In: *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 321–334. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7369>>.

SATO, K. Recent developments in and challenges of elastic optical path networking. In: *37th European Conference and Exposition on Optical Communications*. [S.l.]: Optical Society of America, 2011. p. Mo.2.K.1.

SHEN, G.; CHENG, T.; BOSE, S.; LU, C.; CHAI, T. Y. Impact of number of transceivers and their tunabilities on WDM network performance. *Communications Letters, IEEE*, v. 4, p. 366 – 368, 12 2000.

SONE, Y.; WATANABE, A.; IMAJUKU, W.; TSUKISHIMA, Y.; KOZICKI, B.; TAKARA, H.; JINNO, M. Bandwidth squeezed restoration in spectrum-sliced elastic optical path networks (slice). *J. Opt. Commun. Netw., OSA*, v. 3, n. 3, p. 223–233, Mar 2011.

SÓCRATES-DANTAS, J.; CAREGLIO, D.; PERELLÓ, J.; SILVEIRA, R. M.; RUGGIERO, W. V.; SOLÈ-PARETA, J. Challenges and requirements of a control plane for elastic optical networks. *Computer Networks*, v. 72, p. 156 – 171, 2014. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128614002618>>.

TANG, F.; LI, Y.; SHEN, G.; ROUSKAS, G. N. Minimizing inter-core crosstalk jointly in spatial, frequency, and time domains for scheduled lightpath demands in multi-core fiber-based elastic optical network. *Journal of Lightwave Technology*, v. 38, n. 20, p. 5595–5607, 2020.

TANG, F.; LI, Y.; SHEN, G.; ROUSKAS, G. N. Minimizing inter-core crosstalk jointly in spatial, frequency, and time domains for scheduled lightpath demands in multi-core fiber-based elastic optical network. *Journal of Lightwave Technology*, v. 38, n. 20, p. 5595–5607, 2020.

U.S. Census. *United States Census Bureau*. 2020. <<https://www.census.gov/>>. Acessado em 14/04/2021.

- VAEZI, K.; AKAR, N. Analytical performance modeling of elastic optical links with aligned spectrum allocation. *Computer Networks*, v. 88, p. 40 – 50, 2015. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128615001978>>.
- VIZCAÍNO, J. L.; YE, Y.; LÓPEZ, V.; JIMÉNEZ, F.; MUSUMECI, F.; TORNATORE, M.; PATTAVINA, A.; KRUMMRICH, P. M. Protection in optical transport networks with fixed and flexible grid: Cost and energy efficiency evaluation. *Optical Switching and Networking*, v. 11, p. 55 – 71, 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427713000568>>.
- WAN, X.; HUA, N.; ZHENG, X. Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 4, n. 8, p. 603–613, Aug 2012. ISSN 1943-0620.
- WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, v. 11, p. 83–91, 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427713000799>>.
- WANG, Y.; CAO, X.; HU, Q.; PAN, Y. Towards elastic and fine-granular bandwidth allocation in spectrum-sliced optical networks. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, v. 4, n. 11, p. 906–917, Nov 2012. ISSN 1943-0620.
- WU, J.; NING, Z.; GUO, L. Energy-efficient survivable grooming in software-defined elastic optical networks. *IEEE Access*, v. 5, p. 6454–6463, 2017.
- WU, Y.; HOU, W.; GUO, L.; LIU, Y.; SUN, Z. Green grooming in elastic optical networks. In: . [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 978-1-55752-993-0.
- YAN, L.; AGRELL, E.; WYMEERSCH, H.; JOHANNISSON, P.; TARANTO, R. D.; BRANDT-PEARCE, M. Link-level resource allocation for flexible-grid nonlinear fiber-optic communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 27, n. 12, p. 1250–1253, June 2015. ISSN 1041-1135.
- YEN, J. Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.17.11.712>>.
- YOUSEFI, F.; Ghaffarpour Rahbar, A.; YAGHUBI-NAMAAD, M. Fragmentation-aware algorithms for multipath routing and spectrum assignment in elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, v. 53, p. 102019, 2019. ISSN 1068-5200.
- ZHANG, J.; JI, Y.; SONG, M.; ZHAO, Y.; YU, X.; ZHANG, J.; MUKHERJEE, B. Dynamic traffic grooming in sliceable bandwidth-variable transponder-enabled elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 1, p. 183–191, 2015. ISSN 07338724.
- ZHANG, J.; ZHAO, Y.; YU, X.; ZHANG, J.; SONG, M.; JI, Y.; MUKHERJEE, B. Energy-efficient traffic grooming in sliceable-transponder-equipped IP-over-elastic optical networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 7, n. 1, p. A142–A152, 2015.

ZHANG, S.; MARTEL, C.; MUKHERJEE, B. Dynamic traffic grooming in elastic optical networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 31, n. 1, p. 4–12, 2013. ISSN 07338716.

ZHANG, S.; ZHU, M.; SUN, Q.; LI, G.; CHEN, B. Effective utilization of transponder in elastic CD-ROADM optical networks with traffic grooming. In: *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3. ISSN null.

ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 22, p. 4554–4564, Nov 2015. ISSN 0733-8724.

ZHU, R.; SAMUEL, A.; WANG, P.; LI, S.; LI, L.; LV, P.; XU, M. Survival multipath energy-aware resource allocation in sdm-eons during fluctuating traffic. *Journal of Lightwave Technology*, v. 39, n. 7, p. 1900–1912, 2021.

APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DO SNETS

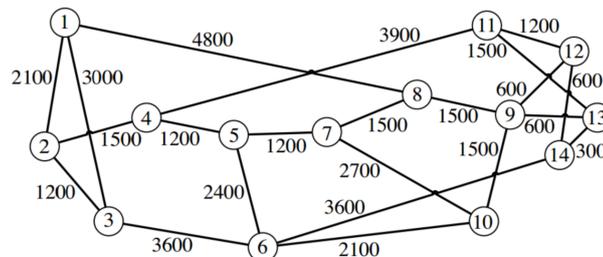
Algumas das tecnologias necessárias para a implantação das *Elastic Optical Networks* (EONs) ainda estão em desenvolvimento. Alguns dos equipamentos necessários ainda não estão disponíveis no mercado. Além disso, a implementação de redes ópticas geralmente possui um alto custo. Por estes motivos, a medição em um sistema real se torna inviável como alternativa para a validação de modelos de EONs

De acordo com nosso conhecimento, os modelos analíticos disponíveis para EONs abrangem apenas cenários muito simplificados como topologias com apenas 2 nós, topologia em anel e apenas alguns algoritmos específicos de *Routing, Modulation and Spectrum Allocation* (RMSA). Também possuem uma limitação quanto às métricas que podem ser extraídas. Isto torna difícil a validação de modelos para EONs, a maioria dos trabalhos que apresentam ferramentas de simulação ignora este aspecto nas suas proposições (AIBIN; BLAZEJEWSKI, 2015; DELVALLE; ALFONZO; ROA, 2016; KRETSIS et al., 2014; CAVALCANTE; PEREIRA; ALMEIDA, 2017; SANTOS et al., 2014).

Uma forma de amenizar este problema é a comparação dos resultados obtidos através da ferramenta de simulação com resultados publicados previamente em outros trabalhos. Esta técnica de verificação é utilizada por exemplo em (COSTA et al., 2016). Além disso, os desenvolvedores da ferramenta devem utilizar princípios e técnicas de engenharia de software para garantir que a implementação esteja de acordo com os modelos adotados.

Estas mesmas técnicas foram utilizadas durante o desenvolvimento do *Slice Network Simulator* (SNetS). Um experimento apresentado em (WAN; HUA; ZHENG, 2012) foi replicado. Os resultados são apresentados a seguir. Foi utilizada a topologia *National Science Foundation Network* (NSFNet), apresentada na Figura 35. Foram geradas 100.000 requisições com requisitos de taxa de transmissão entre 10 e 200 Gbps, distribuídas de maneira uniforme. Dois formatos de modulação com 2 e 4 bits por símbolo, respectivamente. Cada enlace possui 400 slots e cada slot possui 10 GHz de largura de banda.

Figura 35 – Topologia NSFNet.



Fonte: o autor (2021)

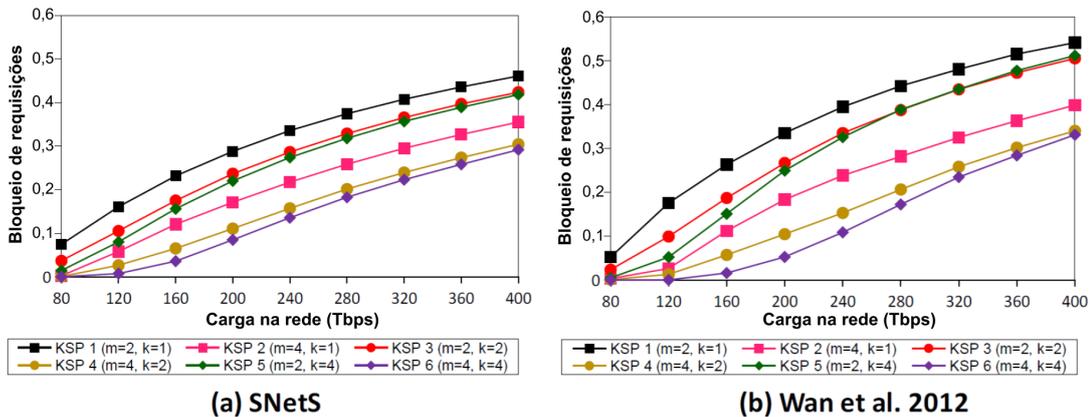
O tráfego é distribuído uniformemente entre todos os pares origem e destino. O intervalo entre a chegada das requisições segue uma distribuição de Poisson com média λ ,

já o tempo de duração das requisições é distribuído de maneira exponencial com média $1/\mu$. A carga na rede em Erlangs é dada por $\rho = \lambda/\mu$. Para cada simulação, foram feitas 10 replicações com diferentes sementes. Os resultados são apresentados com estimativa pontual e intervalar considerando um nível de confiança de 95%.

Para viabilizar a comparação, foi feita a conversão da unidade de carga. A representação da carga em Erlangs foi substituída para Gbps. Esta conversão foi feita da seguinte forma: O valor em bps é dado através de $\rho \cdot C$, onde ρ é a carga em Erlangs e C é a taxa de transmissão média (105 Gbps nos experimentos realizados).

Os experimentos avaliam o algoritmo de roteamento *K-Shortest Paths* (KSP) com diferentes quantidades de rotas alternativas k . A Figura 36 apresenta o Bloqueio de Requisições (BR) obtido com o SNetS e na modelagem de (WAN; HUA; ZHENG, 2012).

Figura 36 – Blocking probability values to simulations with SNetS and the model proposed in (WAN; HUA; ZHENG, 2012).



Fonte: o autor (2021)

Os BRs apresentados em ambos gráficos da Figura 36 estão próximos. É possível observar uma similaridade nos comportamentos apresentados pelas curvas de desempenho de cada um dos cenários avaliados. O KSP 1 apresenta maior BR que as demais soluções em ambos os experimentos. Também é possível observar que os algoritmos KSP 3 e KSP 5 têm BRs próximos, especialmente em cargas maiores. O desempenho mediano alcançado pelo KSP 2 também é similar em ambos os experimentos.

No SNetS, as taxas de transmissão requisitadas variam de 10 a 200 Gbps com granularidade de 1Gbps. No modelo proposto em (WAN; HUA; ZHENG, 2012), a granularidade não é especificada. Entretanto, os experimentos foram realizados buscando a maior aproximação possível entre as duas situações. Os resultados obtidos em (WAN; HUA; ZHENG, 2012) apresentam BR ligeiramente superior em alguns casos mas, de maneira geral, o comportamento apresentado é similar. Com os resultados apresentados, validamos os resultados obtidos com o uso do SNetS.

APÊNDICE B – ENTRADA DE PARÂMETROS E SISTEMAS NO SNETS

Neste trabalho os experimentos foram realizados através da ferramenta de simulação *Slice Network Simulator* (SNetS). Cada experimento exige que seja fornecido para o SNetS dados correspondentes à configuração da rede, parâmetros de camada física, disponibilidade de formatos de modulação, parâmetros dos algoritmos de alocação de recursos, etc. Estes dados são fornecidos ao SNetS através de arquivos de configuração no formato *JavaScript Object Notation* (JSON). Cada experimento realizado pelo SNetS requer 5 arquivos de configuração JSON. Estes arquivos devem ser obrigatoriamente nomeados como: *network*, *traffic*, *physicalLayer*, *others* e *simulation*.

No arquivo *network*, são especificados a topologia de rede, a quantidade de *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs) em cada nó, a amplitude espectral e a quantidade de slots de espectro considerados. A Figura 37 apresenta um exemplo de configuração do arquivo *network*. Neste exemplo há uma topologia com apenas dois nós e dois enlaces. Ainda no arquivo *network*, são definidas as modulações disponíveis, a quantidade de slots utilizados como banda de guarda e a amplitude espectral máxima dos BVTs.

Figura 37 – Exemplo de configuração do arquivo *network*.

```
{
  "nodes":
  [
    {"name": "1", "transmitters": 70, "receivers": 70, "regenerators": 0},
    {"name": "2", "transmitters": 50, "receivers": 50, "regenerators": 0}
  ],
  "links":
  [
    {"source": "1", "destination": "2", "slots": 400,
     "spectrum": 1.25E10, "size": 800.0},
    {"source": "2", "destination": "1", "slots": 400,
     "spectrum": 1.25E10, "size": 800.0},
  ],
  "modulations":
  [
    {"name": "BPSK", "maxRange": 10000.0, "M": 2.0, "SNR": 5.5},
    {"name": "QPSK", "maxRange": 5000.0, "M": 4.0, "SNR": 8.5},
    {"name": "8QAM", "maxRange": 2500.0, "M": 8.0, "SNR": 12.5}
  ],
  "guardBand": 1,
  "bvtSpectralAmplitude": 40
}
```

Conforme discutido no Capítulo 6, no SNetS, o tráfego é gerado a partir de diferentes geradores de requisições para cada par de origem e destino, e taxa de transmissão. A

intensidade de tráfego de cada gerador de requisições é dada em Erlangs de acordo com a taxa de chegada ("arrivalRate") e a taxa de atendimento ("holdRate"). A Figura 38 apresenta um exemplo de configuração do arquivo *traffic* com 4 geradores de requisições para os pares (1,2) e (2,1). O SNetS permite a realização de experimentos sequenciais com diferentes cargas na rede de maneira automática, para isto, além dos parâmetros mencionados anteriormente, cada gerador de requisições possui um parâmetro "arrivalRateIncrease" que representa o incremento no "arrivalRate" no próximo ponto de carga.

Figura 38 – Exemplo de configuração do arquivo *traffic*.

```
{
  "requestGenerators":
  [
    {"source": "1", "destination": "2", "bandwidth": 1.0E11,
      "arrivalRate": 0.02, "holdRate": 1.0, "arrivalRateIncrease": 0.02},
    {"source": "1", "destination": "2", "bandwidth": 2.0E11,
      "arrivalRate": 0.01, "holdRate": 1.0, "arrivalRateIncrease": 0.01},
    {"source": "2", "destination": "1", "bandwidth": 1.0E11,
      "arrivalRate": 0.02, "holdRate": 1.0, "arrivalRateIncrease": 0.02},
    {"source": "2", "destination": "1", "bandwidth": 2.0E11,
      "arrivalRate": 0.01, "holdRate": 1.0, "arrivalRateIncrease": 0.01}
  ]
}
```

Conforme discutido nos Capítulos 2 e 6, o sinal óptico sofre interferências do meio ao se propagar por enlaces, nós e amplificadores ópticos. Por sua vez, esta interferência pode inviabilizar o estabelecimento de novos circuitos na rede impactando na capacidade de atendimento e nos algoritmos de alocação de recursos. O arquivo *physicalLayer* armazena os dados referentes aos parâmetros de camada física da rede. A Figura 39 apresenta os parâmetros do arquivo *physicalLayer*.

Conforme discutido nos Capítulos 3 e 4, alguns algoritmos de alocação de recursos requerem alguns parâmetros que devem ser determinados durante a fase de planejamento da rede, por exemplo: a quantidade de rotas alternativas do *K-Shortest Paths* (KSP) (k), o nível de espaçamento pretendido do *Spectrum Spacing for Traffic Grooming* (SSTG) (σ) e os pesos dos *Multihop Traffic Grooming algorithm based on Auxiliary Graph* (MTGAG). Estes parâmetros são definidos no arquivo *others*. A Figura 40 apresenta um exemplo de configuração do arquivo *others*.

Por fim, o arquivo *simulation* determina quantas requisições serão observadas em cada simulação ("requests"), algoritmos de alocação de recursos ("rmlsaType", "integratedRmlsa", "modulationSelection" e "grooming"), a quantidade de pontos de carga observados ("loadPoints"), a quantidade de replicações de simulações em cada ponto de carga ("replications"), as métricas que serão observadas ("activeMetrics") e a quantidade de th-

Figura 39 – Exemplo de configuração do arquivo *physicalLayer*.

```
{
  "activeQoT":true,
  "activeQoTForOther":true,
  "activeASE":true,
  "activeNLI":true,
  "rateOfFEC":0.07,
  "typeOfTestQoT":0,
  "power":-6.0,
  "spanLength":100.0,
  "fiberLoss":0.2,
  "fiberNonlinearity":0.0013,
  "fiberDispersion":1.6E-5,
  "centerFrequency":1.9355E14,
  "constantOfPlanck":6.626E-34,
  "noiseFigureOfOpticalAmplifier":6.0,
  "powerSaturationOfOpticalAmplifier":16.0,
  "noiseFactorModelParameterA1":100.0,
  "noiseFactorModelParameterA2":4.0,
  "typeOfAmplifierGain":0,
  "amplificationFrequency":1.9355E14,
  "switchInsertionLoss":5.0,
  "fixedPowerSpectralDensity":true,
  "referenceBandwidthForPowerSpectralDensity":1.25E10,
  "polarizationModes":2.0
}
```

Figura 40 – Exemplo de configuração do arquivo *others*.

```
{
  "variables":{"sigma":0.5,"k":3}
}
```

reads de processamento que serão utilizadas para executar as simulações ("threads"). A Figura 41 apresenta um exemplo de configuração do arquivo *simulation*.

Figura 41 – Exemplo de configuração do arquivo *simulation*.

```
{
  "requests":100000,
  "rmlsaType":1,
  "integratedRmlsa":"completesharing",
  "modulationSelection":"modulationbyqotsigma",
  "grooming":"notrafficgrooming",
  "loadPoints":5,
  "replications":10,
  "activeMetrics":
  {
    "BlockingProbability":true,
    "BandwidthBlockingProbability":true,
    "SpectrumUtilization":true,
    "SpectrumSizeStatistics":true,
    "ExternalFragmentation":true,
    "RelativeFragmentation":false,
    "TransmittersReceiversRegeneratorsUtilization":true,
    "EnergyConsumption":true,
    "ModulationUtilization":true,
    "ConsumedEnergy":true,
    "GroomingStatistics":true
  },
  "threads":10
}
```