



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

ALEXANDRE CARDOSO FONTINELE

**Algoritmos RMLSA Cientes de Imperfeições de Camada Física em Redes Ópticas
Elásticas**

Recife

2022

ALEXANDRE CARDOSO FONTINELE

**Algoritmos RMLSA Cientes de Imperfeições de Camada Física em Redes Ópticas
Elásticas**

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

Área de Concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Orientador: Divanilson Rodrigo de Sousa Campelo

Coorientador: Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo

Recife

2022

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

F684a Fontinele, Alexandre Cardoso
Algoritmos RMLSA cientes de imperfeições de camada física em redes ópticas elásticas / Alexandre Cardoso Fontinele. – 2022.
113 f.: il., fig.

Orientador: Divanilson Rodrigo de Sousa Campelo.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2022.

Inclui referências e anexo.

1. Redes de computadores. 2. Rede óptica. 3. Consumo de energia. I. Campelo, Divanilson Rodrigo de Sousa (orientador). II. Título.

004.6 CDD (23. ed.) UFPE - CCEN 2022-110

Alexandre Cardoso Fontinele

**“Algoritmos RMLSA cientes de Imperfeições de Camada Física 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: 31/08/2021.

Orientador: Prof. Dr. Divanilson Rodrigo de Sousa Campelo

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Nelson Souto Rosa
Centro de Informática / UFPE

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

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

Prof. Dr. Gustavo Bittencourt Figueiredo
Departamento de Ciência da Computação / UFBA

Dedico este trabalho a minha família que foi meu porto seguro perante as dificuldades enfrentadas durante este percurso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pois sem ele eu não chegaria a lugar algum.

Agradeço aos meus pais, Elias Pereira Fontinele e Albertina Sales Cardoso Fontinele, por sempre terem acreditado em mim e pelo exemplo que me foi dado desde criança.

Agradeço ao meu orientador, Divanilson Rodrigo de Sousa Campelo, por ter me guiado em mais uma fase, pela paciência e ajuda nesse período.

Agradeço ao meu colega de trabalho, Iallen Gábio de Sousa Santos, pelas ideias trocadas e pela parceria nas pesquisas científicas realizadas.

Agradeço também ao pessoal do *Distributed Systems and Networks Laboratory* (DiSNeL) e do *Connected Systems Lab* pelas discussões enriquecedoras sobre os assuntos de pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática (CIn) que de forma direta ou indireta, contribuíram para a minha formação e de outros colegas.

Ao Instituto de Telecomunicações (IT-Lisboa), pelo apoio dado à realização deste trabalho através da co-orientação do Professor Adolfo Cartaxo.

À CAPES e UFPE pelo apoio financeiro para realização deste trabalho de pesquisa.

E por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

"Educação é uma descoberta progressiva de nossa própria ignorância." (DURANT, 1965)

RESUMO

Redes ópticas elásticas são uma tecnologia promissora para o futuro das redes de transporte de alta capacidade. Suas características proporcionam flexibilidade e escalabilidade na alocação de espectro, acompanhando a demanda crescente do tráfego de Internet. Para este tipo de rede é necessário prover mecanismos que garantam a sua disponibilidade mesmo após a ocorrência de uma falha. É importante também garantir a qualidade do sinal óptico, que tende a se degradar pelos efeitos de camada física. Esta tese aborda o problema de roteamento, seleção de formato de modulação e alocação de espectro (RMLSA - Routing, Modulation Level, and Spectrum Assignment) em redes ópticas elásticas considerando capacidade de sobrevivência, limitações de camada física e consumo de energia nestas redes. Nesta tese, são propostos três algoritmos que levam em consideração imperfeições de camada física (IA-RMLSA - Impairment-Aware RMLSA) em redes ópticas elásticas. O primeiro deles, Spectrum Assignment with Interference Minimization (SAIM), consiste em um novo algoritmo de alocação de espectro, que busca selecionar faixas de espectro livre que causem menos interferências nos outros circuitos já ativos na rede. O segundo algoritmo, Energy Aware Modulation Dedicated Path Protection (EAMDPP), consiste em uma proposta de um novo algoritmo de proteção dedicada ciente do consumo de energia. O algoritmo busca selecionar os formatos de modulação que deixam os circuitos mais resistentes à interferência de outros circuitos e que consomem menos energia. O terceiro algoritmo proposto, Power Assignment by Binary Search (PABS), baseia-se no método de busca binária para realizar a atribuição de potência por circuito. Foram realizadas avaliações de desempenho mediante simulação computacional para comparar os algoritmos propostos nesta tese com outros algoritmos presentes na literatura. Os resultados da avaliação de desempenho mostram que os três algoritmos propostos nesta tese alcançaram desempenho superior em relação aos outros algoritmos presentes na literatura em termos de probabilidade de bloqueio de banda. O algoritmo SAIM levou a uma redução na probabilidade de bloqueio de banda em relação aos outros algoritmos que varia de 2% a 55%. O algoritmo EAMDPP alcançou uma redução que varia de 5% a 43%. A redução alcançada pelo PABS varia de 39% a 83%.

Palavras-chaves: rede óptica elástica; RMLSA; sobrevivência; consumo de energia; camada física.

ABSTRACT

Elastic optical networks are a promising technology for the future of high-capacity transport networks. Their features provide flexibility and scalability to spectrum assignment, in line with the increasing traffic demand on the Internet. For this type of network, it is necessary to provide mechanisms that guarantee its availability even after the occurrence of a failure. It is also important to ensure the quality of the optical signal, which tends to degrade due to physical layer effects. This work addresses the problem of routing, modulation format level selection, and spectrum assignment (RMLSA) considering survivability, physical layer constraints, and energy consumption in elastic optical networks. In this work, three algorithms are proposed that take into account physical layer imperfections (IA-RMLSA - Impairment-Aware RMLSA) in elastic optical networks. The first one, Spectrum Assignment with Interference Minimization (SAIM), consists of a new spectrum assignment algorithm, which seeks to select free spectrum bands that cause less interference in other circuits already active in the network. The second algorithm, Energy-Aware Modulation Dedicated Path Protection (EAMDPP), consists of a proposal for a new energy-aware dedicated protection algorithm. The algorithm seeks to select the modulation formats that make the circuits more resistant to interference from other circuits and that consume less energy. The third proposed algorithm, Power Assignment by Binary Search (PABS), is based on the binary search method to perform a per-circuit power assignment. Performance evaluations using computer simulations were carried out to compare the algorithms proposed in this work with other algorithms present in the literature. The results of the performance evaluation show that the three algorithms proposed in this work achieved superior performance in relation to the other algorithms present in the literature in terms of bandwidth blocking probability. The SAIM algorithm led to a reduction in bandwidth blocking probability compared to other algorithms ranging from 2% to 55%. The EAMDPP algorithm achieved a reduction ranging from 5% to 43%. The reduction achieved by PABS ranges from 39% to 83%.

Keywords: elastic optical network; RMLSA; survival; energy consumption; physical layer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de divisão do espectro óptico em <i>slots</i> de frequência.	23
Figura 2 – Arquitetura da rede óptica elástica.	24
Figura 3 – Cenário com fragmentação do espectro.	25
Figura 4 – Arquitetura de uma rota.	27
Figura 5 – Comparação entre (a) os resultados apresentados na Figura 3 do artigo (JOHANNISSON; AGRELL, 2014) e (b) os resultados gerados pelo SNetS.	34
Figura 6 – Comparação entre (a) os resultados apresentados na Figura 13 do artigo (POGGIOLINI; JIANG, 2017) e (b) os resultados gerados pelo SNetS.	34
Figura 7 – Figura para demonstração do consumo de potência.	35
Figura 8 – Demonstração do controle de admissão de requisição de circuito.	37
Figura 9 – Seleção de rota considerando o consumo de energia.	42
Figura 10 – Seleção de rota considerando a OSNR.	43
Figura 11 – Exemplo de proteção dedicada.	46
Figura 12 – Níveis de potência e suas respectivas OSNR.	47
Figura 13 – Cenário para a demonstração da aplicação dos métodos de alocação de espectro.	50
Figura 14 – Ilustração da aplicação do algoritmo SAIM.	54
Figura 15 – Topologias consideradas neste trabalho: (a) NSFNet e (b) Cost239. O número em cada enlace corresponde ao comprimento do enlace em km.	58
Figura 16 – PBB como uma função da potência (dBm) para as topologias (a) NSFNet e (b) Cost239.	59
Figura 17 – PBB como uma função do limiar de taxa de bits para os algoritmos (a) FLF e (b) SAIM.	59
Figura 18 – (a) PBB como uma função do limiar de distância para o algoritmo AFLF e (b) PBB como uma função de diferentes combinações de δ e η para o algoritmo MSWRR.	60
Figura 19 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Taxa média de fragmentação externa obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia Cost239 considerando DJK.	62

Figura 20 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Taxa média de fragmentação externa obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia Cost239 considerando KSP.	62
Figura 21 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Taxa média de fragmentação externa obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia NSFNet considerando DJK.	63
Figura 22 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Taxa média de fragmentação externa obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia NSFNet considerando KSP.	63
Figura 23 – Percentagens das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia Cost239 na carga de 1200 Erlangs para DJK.	65
Figura 24 – Percentagens das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia Cost239 na carga de 1425 Erlangs para KSP.	65
Figura 25 – Percentagens das componentes da PBB obtidos pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia NSFNet na carga de 530 Erlangs para DJK.	66
Figura 26 – Percentagens das componentes da PBB obtidos pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia NSFNet na carga de 650 Erlangs para KSP.	66
Figura 27 – A importância de selecionar com ponderação um valor para a margem de segurança (σ).	72
Figura 28 – PBB como uma função da potência para as topologias NSFNet e Cost239.	74
Figura 29 – PBB para cinco valores de σ nas topologias (a) Cost239 e (b) NSFNet. . .	75
Figura 30 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Eficiência energética efetiva para a topologia Cost239.	75
Figura 31 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Eficiência energética efetiva para a topologia NSFNet.	76
Figura 32 – Porcentagem das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de proteção dedicada para a topologia Cost239 na carga de 800 Erlangs.	77
Figura 33 – Porcentagem das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de proteção dedicada para a topologia NSFNet na carga de 300 Erlangs.	78

Figura 34 – Níveis de potência, e suas respectivas OSNRs, que são utilizados pelo algoritmo PABS.	83
Figura 35 – Probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos (a) CPA e (b) CPSD em função da potência.	86
Figura 36 – Probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos (a) APA e (b) PABS em função do parâmetro ajustável de cada algoritmo.	86
Figura 37 – Probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para a topologia NSFNet. (a) Escala normal e (b) Escala logarítmica.	87
Figura 38 – Probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para a topologia Cost239. (a) Escala normal e (b) Escala logarítmica.	88
Figura 39 – Percentagens das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para a topologia NSFNet na carga de 600 Erlangs.	89
Figura 40 – Percentagens das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para a topologia Cost239 na carga de 1550 Erlangs.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Notação usada para os dispositivos de uma rota.	27
Tabela 2 – Consumo de potência de um BVT com um único <i>slot</i> (12,5 GHz) para diferentes formatos de modulação.	30
Tabela 3 – Informações sobre os circuitos da Figura 7.	36
Tabela 4 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.	58
Tabela 5 – Diferentes combinações de δ e η que foram usadas pelo algoritmo MSWRR.	61
Tabela 6 – Redução mínima em PBB alcançada pelo algoritmo SAIM em relação aos outros algoritmos considerando todas as cargas testadas.	64
Tabela 7 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.	74
Tabela 8 – Redução mínima na PBB alcançada pelo algoritmo EAMDPP em relação à PBB dos outros algoritmos para todas as cartas testadas.	77
Tabela 9 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.	85
Tabela 10 – Redução mínima na PBB alcançada pelo algoritmo PABS em relação a PBB dos outros algoritmos.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEL	<i>Ausência de Espectro Livre</i>
AFLF	<i>Adaptive First Last Fit</i>
APA	<i>Adaptive Power Assignment</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BF	<i>BestFit</i>
BOSNRDPP	<i>Best OSNR Dedicated Path Protection</i>
BV-WXC	<i>Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connects</i>
BVT	<i>Bandwidth Variable Transponder</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CLP	<i>Constant Launch Power</i>
CPA	<i>Constant Power Assignment</i>
CPSD	<i>Constant Power Spectral Density</i>
DAFLF	<i>Dispersion Adaptive First Last Fit</i>
DGC	<i>Dynamic Graph Coloring</i>
DPP	<i>Dedicated Path Protection</i>
EAMDPP	<i>Energy Aware Modulation Dedicated Path Protection</i>
EAMGSP	<i>Energy Aware Multigraph Shortest Path</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EE	<i>Eficiência Energética</i>
EEE	<i>Eficiência Energética Efetiva</i>
EERDPP	<i>Energy Efficiency Routing Dedicated Path Protection</i>
EERMDPP	<i>Energy Efficiency Routing and Modulation Dedicated Path Protection</i>
EF	<i>ExactFit</i>
EGN	<i>Exhaustive Gaussian Noise</i>

EnPA	<i>Enough Power Assignment</i>
EPA	<i>Egoistic Power Assignment</i>
FA	<i>Fragmentation-Aware RMLSA</i>
FA-CA	<i>Fragmentation-Aware RMLSA with Congestion Avoidance</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FEF	<i>FirstExactFit</i>
FF	<i>FirstFit</i>
FLEF	<i>FirstLastExactFit</i>
FLF	<i>FirstLastFit</i>
GN	<i>Gaussian Noise</i>
IA-RMLSA	<i>Impairmetn-Aware RMLSA</i>
KSP-RQoTO	<i>K-Shortest Path with Reduction of QoTO</i>
KS-PC	<i>K-Shortest Path Computation</i>
LEF	<i>LastExactFit</i>
LF	<i>LastFit</i>
LMCI	<i>Low-Margin With Circuit Invigorating</i>
MD-PC	<i>Modified Dijkstra Path Computation</i>
MSWRR	<i>Minimum Sum of Weighted Resource Reductions</i>
NF	<i>Noise Figure</i>
NLI	<i>Nonlinear Impairment</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OLP	<i>Optimum Launch Power</i>
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
PABS	<i>Power Assignment by Binary Search</i>
PBB	<i>Probabilidade de Bloqueio de Banda</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PRMLSA	<i>Power, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment</i>

PSD	<i>Power Spectral Density</i>
QoT	<i>Quality of Transmission</i>
QoTN	QoT inadequada para o Novo circuito
QoTO	QoT inadequada para um ou mais circuitos já ativos na rede
RF	<i>RandomFit</i>
RMLSA	<i>Routing, Modulation level and Spectrum Allocation</i>
SAIM	<i>Spectrum Assignment with Interference Minimization</i>
SDM	<i>Space Division Multiplexing</i>
SNetS	<i>Slice Network Simulator</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPF	<i>Shortest Path First</i>
TBSA	<i>Traffic Balancing Spectrum Assignment</i>
TMFE	Taxa Média de Fragmentação Externa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	20
1.2	CONTRIBUIÇÕES	20
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE	21
2	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	23
2.1	ARQUITETURA DA REDE ÓPTICA ELÁSTICA	23
2.2	MODELO DA CAMADA FÍSICA	26
2.3	MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA	29
2.4	MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	31
2.5	SIMULADOR	32
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	37
3	PROBLEMA RMLSA	38
3.1	ROTEAMENTO, SELEÇÃO DE MODULAÇÃO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO	38
3.1.1	RMLSA sequencial	38
3.1.2	RMLSA integrado	41
3.2	RMLSA CIENTE DO CONSUMO DE ENERGIA	42
3.3	RMLSA CIENTE DE IMPERFEIÇÕES DE CAMADA FÍSICA	43
3.4	PROTEÇÃO DEDICADA DE CAMINHO	45
3.5	PROBLEMA DE ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA POR CIRCUITO	46
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	48
4	PROPOSTA DE ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE ESPECTRO COM REDUÇÃO DE INTERFERÊNCIAS ENTRE CIRCUITOS	49
4.1	TRABALHOS RELACIONADOS	49
4.2	ALGORITMO PROPOSTO	52
4.3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	56
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	67
5	PROPOSTA DE ALGORITMO DE PROTEÇÃO DEDICADA CIENTE DE CONSUMO DE ENERGIA	68
5.1	TRABALHOS RELACIONADOS	68

5.2	ALGORITMO PROPOSTO	69
5.3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	73
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	78
6	PROPOSTA DE ALGORITMO DE ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA	
	POR CIRCUITO	79
6.1	TRABALHOS RELACIONADOS	79
6.2	ALGORITMO PROPOSTO	81
6.3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	84
6.3.1	Ajuste dos Parâmetros dos Algoritmos CPA, CPSD, APA e PABS .	85
6.3.2	Comparação entre os Algoritmos	87
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	90
7	CONCLUSÃO	92
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
7.2	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	93
7.3	TRABALHOS GERADOS	93
7.4	TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS	97
	ANEXO A – ARTIGO SOBRE O SNETS	103

1 INTRODUÇÃO

Os serviços emergentes (tais como realidade virtual/realidade aumentada, rede móvel 5G, serviços de vídeo de alta definição, serviços de computação em nuvem, etc.) têm estimulado o desenvolvimento e transformação das tecnologias de comunicação óptica (WU; NING; GUO, 2017; ZHU et al., 2017). As redes ópticas elásticas têm atraído o interesse de pesquisas nos últimos anos, pois podem melhorar significativamente a eficiência espectral da camada óptica com alocação flexível de largura de banda (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). As redes ópticas elásticas permitem a divisão do espectro óptico em pequenos intervalos de frequência chamados de *slots*. Assim, cada novo circuito que é estabelecido para atender a requisição de um cliente da rede pode alocar uma quantidade diferente de *slots*. A quantidade de *slots* selecionada vai depender da sua demanda de largura de banda solicitada pelo cliente.

Otimizar a utilização dos recursos e, conseqüentemente, melhorar o desempenho da rede, é uma tarefa que envolve a resolução de uma série de problemas. No contexto das redes ópticas elásticas, um dos principais desafios para o estabelecimento de um circuito óptico é o problema *Routing, Modulation level and Spectrum Allocation* (RMLSA) (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011). O problema RMLSA consiste em i) definir uma rota para um par de nós origem e destino; ii) selecionar um formato de modulação adequado para essa rota e iii) escolher uma faixa de espectro livre (conjunto de *slots* contíguos e contínuos) na rota definida.

Outro desafio no planejamento e operação de redes ópticas elásticas é reduzir os impactos das imperfeições de camada física na qualidade do sinal óptico. Nas redes ópticas elásticas transparentes, objeto de investigação deste trabalho, os dados são transmitidos da fonte para o destino como um sinal óptico. Toda a operação de roteamento é realizada no domínio óptico sem qualquer conversão para o domínio eletrônico. O sinal óptico sofre degradação à medida que se propaga da origem para o destino devido às imperfeições da camada física. O acúmulo das degradações no sinal óptico ao longo de uma rota pode tornar a *Bit Error Rate* (BER) intolerável no receptor, inviabilizando a comunicação. Algoritmos RMLSA que levam em consideração as imperfeições de camada física são chamados de *Impairment-Aware RMLSA* (IA-RMLSA) (BEYRANVAND; SALEHI, 2013).

As redes ópticas elásticas permitem transportar grandes volumes de informação e fornecem serviços para aplicações que exigem rigorosos requisitos de qualidade de serviço. Entre os

requisitos pode-se ter a sensibilidade ao atraso e as interrupções de suas conexões. Estas aplicações geralmente funcionam 24 horas por dia, exigindo uma alta disponibilidade de serviços da rede. A falha de um enlace da rede óptica representa a interrupção de todos os circuitos ópticos que utilizam tal enlace. Isto pode provocar a perda de uma grande quantidade de informação e a parada de serviços críticos. Diante disto, as redes ópticas elásticas precisam de implementar mecanismos para garantir que suas conexões sejam recuperadas de maneira rápida e eficiente. Esta capacidade de continuar operando na eventualidade de ocorrência de falhas é conhecida como sobrevivência em redes ópticas (SHEN; GUO; BOSE, 2016).

Tais técnicas de sobrevivência podem ser classificadas em: proteção ou restauração. A proteção é uma técnica proativa, que consiste na computação e reserva prévia de recursos redundantes antes da ocorrência de falhas. A restauração é uma técnica reativa, que trata a falha apenas após o acontecimento da mesma. A restauração apesar de consumir menos recursos em relação à proteção, não garante que haverá recursos livres no momento da falha para alocar um segundo circuito (SHEN; GUO; BOSE, 2016).

Dado o crescimento do tráfego da Internet, o consumo de energia das redes de transporte é uma preocupação importante, tanto por razões econômicas quanto ambientais. O desenvolvimento contínuo da tecnologia de rede oferece a chance de melhorar a eficiência energética e, assim, reduzir o crescimento do consumo de energia em comparação com o crescimento do tráfego (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012). Reduzir o consumo de energia da rede óptica com capacidade de sobrevivência é, portanto, um outro tema de pesquisa importante. Para a maioria dos estudos, as abordagens para a redução do consumo de energia são principalmente implementadas ajustando dinamicamente as taxas de dados dos transponders de acordo com a quantidade de tráfego realmente transportado (SHEN; GUO; BOSE, 2016).

Os provedores de serviços buscam pela obtenção de maior lucro e isso está diretamente relacionado com a capacidade de atendimento de requisições dos clientes da rede. Quanto mais requisições forem atendidas e novos circuitos forem estabelecidos, maior é a quantidade de clientes transmitindo dados e utilizando os recursos da rede. Dessa forma, otimizar a utilização dos recursos fornecidos pela rede é uma forma de maximizar os lucros obtidos.

Para cada um dos problemas mencionados, têm sido propostas diferentes abordagens e estratégias (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; SHEN; GUO; BOSE, 2016; WU; NING; GUO, 2017; ZHU et al., 2019; BEHERA et al., 2019; COSTA; BRASILEIRO; DRUMMOND, 2020; PAIRA et al., 2020; ZHU et al., 2021) na tentativa de aumentar o desempenho das redes ópticas elásticas. É comum nos trabalhos que tratam os problemas relacionados com consumo de energia e

sobrevivência associar os impactos das imperfeições de camada física apenas com o alcance da rota selecionada para o estabelecimento de um novo circuito. Dessa forma o impacto do estabelecimento de um novo circuito nos demais circuitos já ativos na rede não é considerado. Este tese aborda todos esses problemas em um mesmo cenário que segue uma modelagem em que os efeitos de camada física são modelados por meio de expressões analíticas e o impacto do estabelecimento de um circuito nos demais circuitos já ativos na rede também é levado em consideração para o estabelecimento de um circuito óptico.

1.1 OBJETIVOS

A pesquisa desenvolvida nesta tese busca contribuir com a área de algoritmos IA-RMLSA considerando sobrevivência e consumo de energia em redes ópticas elásticas. O objetivo é desenvolver novos algoritmos IA-RMLSA que reduzam a probabilidade de bloqueio geral e o consumo de energia das redes ópticas elásticas. O objetivo geral pode ser dividido nos seguintes objetivos específicos:

- Implementar na ferramenta de simulação selecionada o cenário de rede óptica elástica que considera limitações de camada física, consumo de energia e capacidade de sobrevivência;
- Propor novos algoritmos IA-RMLSA visando reduzir o bloqueio gerado pela degradação da *Quality of Transmission* (QoT) dos circuitos já ativos na rede e reduzir o bloqueio geral da rede;
- Avaliar o desempenho dos algoritmos IA-RMLSA propostos comparando-os com outros algoritmos da literatura por meio de simulações computacionais;
- Analisar o impacto do estabelecimento de um circuito nos outros circuitos já ativos na rede através do estudo das componentes da probabilidade de bloqueio geral.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

Com intuito de alcançar o objetivo já citado, foram propostos três algoritmos que levam em consideração imperfeições de camada física (IA-RMLSA) em redes ópticas elásticas:

- O primeiro algoritmo consiste em um novo algoritmo de alocação de espectro ciente de imperfeições de camada física, chamado de *Spectrum Assignment with Interference*

Minimization (SAIM). O SAIM busca selecionar faixas de espectro livre que causem menos interferências nos outros circuitos já ativos na rede;

- O segundo algoritmo consiste em uma proposta de um novo algoritmo de proteção dedicada ciente do consumo de energia, chamada de *Energy Aware Modulation Dedicated Path Protection* (EAMDPP). O EAMDPP busca selecionar os formatos de modulação que deixam os circuitos mais resistentes à interferência de outros circuitos e que consomem menos energia. Ele também busca selecionar rotas que consomem menos energia;
- O terceiro algoritmo proposto baseia-se no método de busca binária para realizar a atribuição de potência por circuito e é chamado de *Power Assignment by Binary Search* (PABS).

Foram realizadas avaliações de desempenho mediante simulação computacional para comparar os algoritmos propostos nesta tese com outros algoritmos presentes na literatura. Os resultados da avaliação de desempenho mostram que os três algoritmos propostos nesta tese alcançaram desempenho superior em relação aos outros algoritmos presentes na literatura em termos de probabilidade de bloqueio.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O restante desta tese está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** exibe a arquitetura das redes ópticas elástica e seus principais componentes. São discutidos os modelos de camada física e consumo de energia. É feita uma introdução sobre a ferramenta de simulação utilizada nos experimentos. Também são apresentadas as métricas de avaliação de desempenho que foram consideradas nos estudos;
- **Capítulo 3:** discute os principais conceitos sobre o problema de roteamento, seleção de formato de modulação e alocação de espectro. Apresenta o conceito de algoritmo RMLSA ciente de imperfeições de camada física. Apresenta os conceitos de sobrevivência;
- **Capítulo 4:** apresenta a proposta de um novo algoritmo de alocação de espectro (SAIM) para redes ópticas elásticas e apresenta alguns trabalhos relacionados. Também exibe

os resultados do estudo de avaliação de desempenho comparando o algoritmo proposto com outros algoritmos de alocação de espectro propostos na literatura;

- **Capítulo 5:** apresenta a proposta de um novo algoritmo de proteção de caminho dedicado (EAMDPP) para redes ópticas elásticas e apresenta alguns trabalhos relacionados. São exibidos os resultados do estudo de avaliação de desempenho comparando o algoritmo proposto com outros algoritmos de proteção de caminho dedicado;
- **Capítulo 6:** apresenta a proposta de um novo algoritmo de atribuição de potência por circuito (PABS) para redes ópticas elásticas e apresenta alguns trabalhos relacionados. São discutidos os resultados de um estudo de avaliação de desempenho comparando o algoritmo proposto com outros algoritmos de atribuição de potência por circuito da literatura;
- **Capítulo 7:** discute as conclusões sobre o trabalho e apresenta as contribuições, trabalhos gerados e possíveis trabalhos futuros.

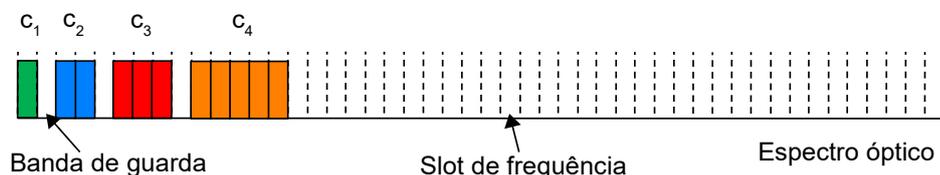
2 REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Este Capítulo aborda os principais aspectos das redes ópticas elásticas. A Seção 2.1 descreve a arquitetura das redes ópticas elásticas e os seus principais componentes. Na Seção 2.2 são discutidos os efeitos de camada física e apresentado o modelo de camada física adotado neste trabalho. O modelo de consumo de energia adotado neste trabalho é descrito na Seção 2.3. A Seção 2.4 apresenta as métricas de avaliação de desempenho que foram consideradas para a realização dos estudos. Por fim, a ferramenta de simulação que foi utilizada para conduzir os experimentos é apresentada na Seção 2.5.

2.1 ARQUITETURA DA REDE ÓPTICA ELÁSTICA

A incorporação da tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) nas redes ópticas permitiu o surgimento de um novo tipo de rede óptica de transporte chamada de rede óptica elástica, proposta em (JINNO et al., 2009). A tecnologia OFDM permite a divisão do espectro óptico em uma granularidade fina, também denominada de *slots* de frequência. Em uma rede óptica, para que haja comunicação, é necessário que sejam estabelecidos circuitos ópticos. Nas redes ópticas elásticas os circuitos ópticos são constituídos por um ou mais *slots* de frequência. A quantidade de *slots* de frequência depende da largura de banda requerida para cada circuito óptico. A Figura 1 apresenta um exemplo de divisão do espectro óptico em *slots* de frequência.

Figura 1 – Exemplo de divisão do espectro óptico em *slots* de frequência.



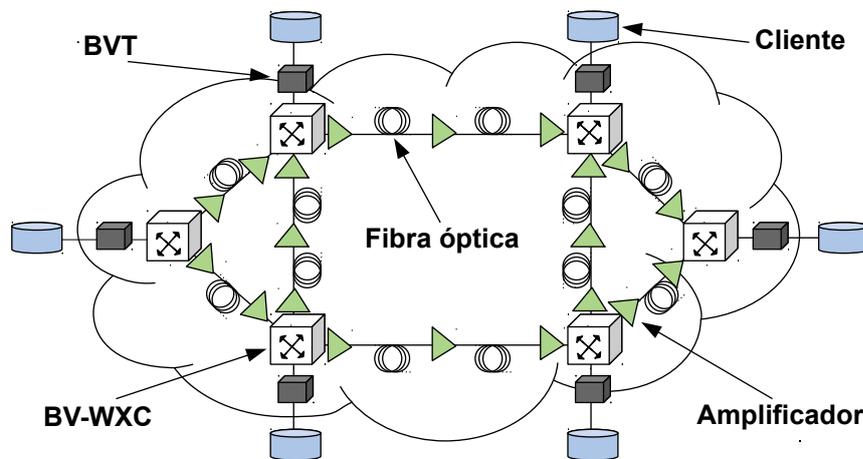
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Na Figura 1, os *slots* brancos representam *slots* livres e os *slots* coloridos representam *slots* ocupados por circuitos. Os *slots* livres entre os *slots* ocupados por circuitos representam a banda de guarda. A banda de guarda é usada para reduzir a interferência entre circuitos adjacentes (ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015). Ilustra-se ainda na Figura 1, a alocação de quatro circuitos com larguras de banda distintas. A alocação dos *slots* de frequência é ajustada

para atender a largura de banda requisitada. Por exemplo, o circuito c_1 ocupa apenas um *slot* de frequência, enquanto o circuito c_4 ocupa cinco *slots* de frequência.

Para garantir a flexibilidade na utilização do espectro óptico as redes ópticas elásticas utilizam tecnologias que permitem largura de banda variável. Dentre os dispositivos utilizados nas redes ópticas elásticas encontram-se: Transponder com largura de banda variável (*Bandwidth Variable Transponder* (BVT)) e comutador óptico com largura de banda variável (*Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connects* (BV-WXC)). Os BVTs são alguns dos dispositivos responsáveis por garantir a flexibilidade na utilização dos recursos espectrais na transmissão e recepção de dados nos nós de origem e destino. Os BVTs são utilizados para ajustar a largura de banda conforme a taxa de bits de transmissão e o formato de modulação adotados. Os BV-WXCs permitem a comutação óptica de circuitos com largura de espectro ajustada dinamicamente (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). A Figura 2 ilustra a disposição dos BVTs, BV-WXCs, amplificadores e fibras ópticas em uma rede óptica elástica.

Figura 2 – Arquitetura da rede óptica elástica.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Como pode ser observado na Figura 2, os BVTs se localizam nos nós de borda da rede elástica, permitindo a transmissão e recepção dos dados dos clientes. Depois do processo de admissão de uma requisição, o circuito óptico é estabelecido a partir de um BVT no nó de origem. Este circuito atravessa de forma transparente os BV-WXCs nos nós intermediários (sinais transientes), e termina em um BVT no nó de destino.

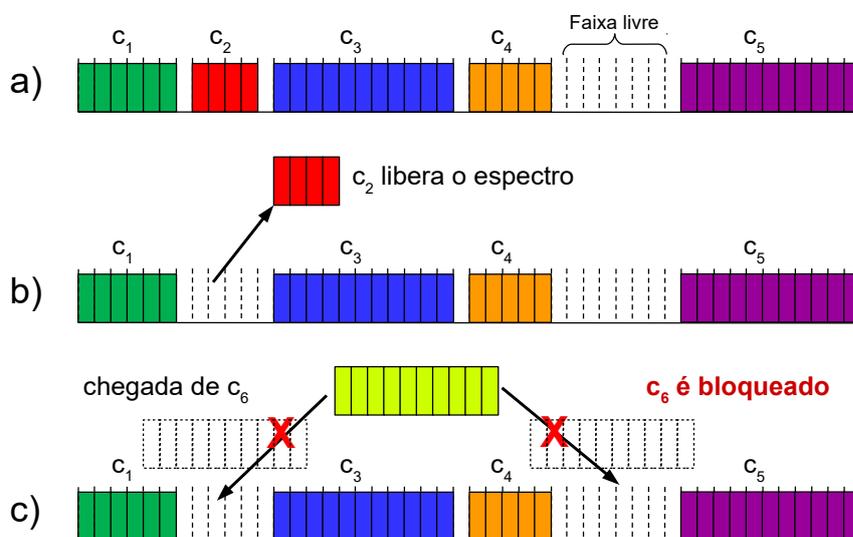
Nas redes óptica elásticas transparentes a comutação de circuitos é feita inteiramente no domínio óptico. Para isso é necessário cumprir alguns requisitos provenientes do meio óptico, denominados de restrições de continuidade e contiguidade espectral (WANG; MUKHER-

JEE, 2014). Na restrição de continuidade torna-se obrigatória a permanência do sinal óptico no mesmo intervalo espectral entre os nós de origem e destino. Ao alocar um conjunto de *slots*, este deve estar livre em todos os enlaces da rota selecionada. Na restrição de contiguidade é preciso alocar um conjunto de *slots* dispostos de forma adjacente no espectro óptico em todos os enlaces da rota.

A medida que circuitos são estabelecidos e desligados, surgem pequenas lacunas de *slots* livres no espectro, que devido as restrições de continuidade e contiguidade espectral não são utilizados para o estabelecimento de nenhum circuito. Estes *slots* que ficam dispersos no espectro óptico e são impedidos de serem alocados devido as restrições de continuidade e contiguidade espectral caracterizam o problema de fragmentação de espectro. O problema da fragmentação do espectro influencia diretamente na eficiência das redes ópticas elásticas (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Na Figura 3 é apresentado um exemplo de fragmentação do espectro. Primeiro é apresentado um cenário com cinco circuitos já estabelecidos (*slots* coloridos) e uma faixa de *slots* livres (Figura 3(a)). O *slot* livre entre os circuitos é chamado de banda de guarda (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). Em um dado momento o circuito c_2 libera os *slots* que estava utilizando, ficando agora duas faixas de *slots* livres (Figura 3(b)). A Figura 3(c) apresenta o momento da chegada da requisição do circuito c_6 . O circuito c_6 precisa de dez *slots* para ser estabelecido, mas acaba sendo bloqueado porque as faixas de *slots* livres não possuem *slots* contíguos suficientes para o estabelecimento de c_6 .

Figura 3 – Cenário com fragmentação do espectro.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

2.2 MODELO DA CAMADA FÍSICA

O sinal óptico ao ser transmitido por enlaces e dispositivos ópticos perde qualidade devido aos efeitos de camada física. As degradações causadas pelos efeitos da camada física são classificadas em (RAHBAR, 2012): efeitos lineares e efeitos não lineares.

Os efeitos lineares são independentes da potência do sinal e afetam cada circuito separadamente. Dentre os efeitos lineares estão (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009): Atenuação na fibra, Dispersão Cromática (*Chromatic Dispersion* (CD)), Dispersão dos Modos de Polarização (*Polarization Mode Dispersion* (PMD)) e Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* (ASE)).

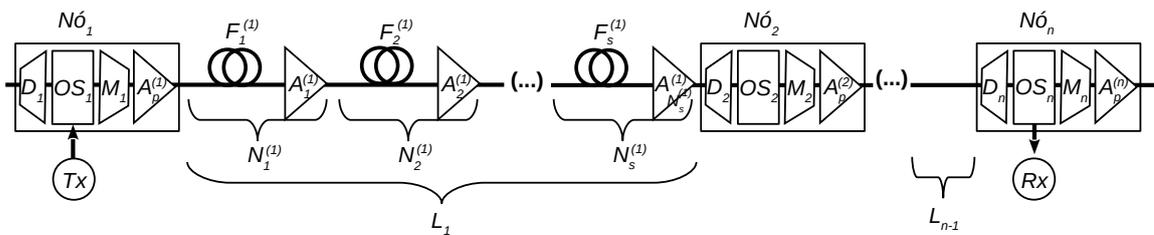
Já os efeitos não lineares (*Nonlinear Impairments* (NLIs)) são fortemente dependentes da potência do sinal, causando interferências nos circuitos individualmente e entre eles. Dentre os efeitos não lineares estão (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009): Auto-Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), Modulação de Fase Cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*) e Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*).

Durante a transmissão do sinal óptico, quanto maior a distância percorrida na fibra, maior será a atenuação da potência de sinal. Isso ocorre de tal forma que gera uma necessidade em amplificar o sinal óptico para que este restabeleça sua potência e assim possa ser detectado no destino. Os amplificadores também são utilizados para compensar perdas do sinal óptico inseridas pelos BV-WXCs. Usualmente, a amplificação óptica é realizada pelo equipamento amplificador *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA). No momento da amplificação, os EDFAs introduzem o ruído ASE (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009).

Além disso, ainda ocorrem os efeitos NLIs quando o sinal se propaga pelas fibras. A SPM ocorre porque o índice de refração da fibra possui uma componente dependente de intensidade. Isso provoca um deslocamento de fase induzida que é proporcional à intensidade do pulso e faz com que diferentes partes do pulso sofram diferentes deslocamentos de fase (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009). A XPM é o deslocamento de fase de um sinal causado pelas flutuações de intensidade de outros canais que compartilham a mesma fibra a diferentes frequências ópticas (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009). A FWM é a interação não linear entre três sinais com frequências ópticas (f_i , f_j e f_k) dando origem a um sinal com uma quarta frequência ($f_{ijk} = f_i \pm f_j \pm f_k$). Se a quarta frequência (f_{ijk}) for igual ou próxima à frequência de um circuito tal que o espectro do sinal resultante caia dentro da largura de banda do circuito, haverá penalidade na transmissão (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009).

A Figura 4 apresenta a arquitetura de uma rota com n nós, ilustrando os dispositivos que o sinal passa através da origem até ao destino. Observa-se pela Figura 4 que a rota é composta de (da esquerda para a direita): i) transmissor (Tx), comutador óptico (OS_1) e multiplexador (M_1) no nó de origem ($Nó_1$), e correspondente pós-amplificador ($A_p^{(1)}$); ii) primeiro enlace (L_1) com $N_s^{(1)}$ spans de amplificação abrangendo a fibra ($F_i^{(1)}$) e o amplificador óptico ($A_i^{(1)}$) do i -ésimo span; iii) desmultiplexador (D_2), comutador óptico (OS_2) e multiplexador (M_2) no segundo nó ($Nó_2$), e correspondente pós-amplificador ($A_p^{(2)}$); iv) outros $n - 3$ nós ($Nó_3, \dots, Nó_{n-1}$) e $n-2$ enlaces (L_2, \dots, L_{n-1}) com similar composição (possivelmente com um diferente número de spans) ao $Nó_2$ e L_1 , respectivamente; v) desmultiplexador (D_n), comutador óptico (OS_n) e receptor (Rx) no nó de destino ($Nó_n$). A Tabela 1 mostra a notação usada para representar os dispositivos apresentados.

Figura 4 – Arquitetura de uma rota.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 1 – Notação usada para os dispositivos de uma rota.

Símbolo	Definição
Tx	Transmissor
Rx	Receptor
L_l	Enlace l
n	Número de nós da rota r
$N_s^{(l)}$	Número de spans em um enlace
OS_i	Comutador óptico no nó i ($1 \leq i \leq n$)
M_i	Multiplexador no nó i ($1 \leq i \leq n$)
D_i	Desmultiplexador no nó i ($1 \leq i \leq n$)
$A_p^{(i)}$	Pós-amplificador no nó i ($1 \leq i \leq n$)
$A_i^{(l)}$	Amplificador de linha do i -ésimo span do enlace l ($1 \leq i \leq N_s^{(l)}$)
$F_i^{(l)}$	Fibra óptica do i -ésimo span do enlace l ($1 \leq i \leq N_s^{(l)}$)

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os ganhos dos amplificadores são configurados para compensarem todas as perdas da fibra e dos dispositivos que precedem cada amplificador até o amplificador anterior. O pós-

amplificador ($A_p^{(i)}$) é responsável por compensar as perdas de inserção do multiplexador (M_i), comutador óptico (OS_i) e demultiplexador (D_i). Isto é, o pós-amplificador é responsável por compensar todas as perdas do nó. Os amplificadores de linha ($A_1^{(l)}, A_2^{(l)}, \dots, A_{N_s^{(l)}}^{(l)}$) são responsáveis por compensar as perdas causadas pela fibra no *span* onde o amplificador de linha está localizado.

Neste trabalho foi adotado o modelo de camada física apresentado em (JOHANNISSON; AGRELL, 2014; YAN et al., 2015) para mensurar os impactos dos ruídos ASE e NLIs na relação sinal-ruído óptico (*Optical Signal-to-Noise Ratio* (OSNR)). A OSNR para um circuito i usando uma rota r_i é dada por

$$OSNR_i = \frac{I_i}{I_i^{ASE} + I_i^{NLI}} \quad (2.1)$$

em que a variável I_i é a densidade espectral da potência (*Power Spectral Density* (PSD)) de sinal do circuito i , I_i^{ASE} é a PSD do ruído ASE e I_i^{NLI} é a PSD da NLI. A PSD do sinal do circuito i pode escrever-se como $I_i = P_i/B_i$, em que P_i é potência de sinal do circuito i e B_i é a largura de banda do circuito i .

A largura de banda do circuito (B_i) é calculada assumindo um sinal com uma forma de espectro de cosseno elevado com um fator de *roll-off* aproximadamente igual a zero. Neste caso, a largura de banda do circuito i é fornecida por (ESSIAMBRE et al., 2010):

$$B_i = \frac{R_i (1 + R_{FEC})}{p \log_2 M}, \quad (2.2)$$

em que R_i é a taxa de bits de informação do circuito i , R_{FEC} é o *overhead* de código de correção de erros (*Forward Error Correction* (FEC)), p é o número de polarizações de sinal usadas para transportar informação e M é o número de símbolos diferentes do formato de modulação. É assumido que os formatos de modulação utilizam multiplexagem na polarização, portanto $p = 2$ (ESSIAMBRE et al., 2010).

Para todos os *spans* com amplificadores com o mesmo ganho e que compensam exatamente a perda da fibra do *span*, o acúmulo do ruído ASE para todos os enlaces na rota r_i leva a PSD do ruído ASE dada por:

$$I_i^{ASE} = (N_n^{r_i} - 1) I_{amp,p}^{ASE} + \sum_{l \in r_i} N_s^l I_{amp,s}^{ASE}, \quad (2.3)$$

em que $N_n^{r_i}$ é o número de nós da rota r_i , N_s^l é o número de *spans* do enlace l da rota r_i , $I_{amp,p}^{ASE}$ é a PSD do ruído ASE no pós-amplificador e $I_{amp,s}^{ASE}$ é a PSD do ruído ASE no

amplificador de linha. A PSD do ruído ASE no pós-amplificador e no amplificador de linha é dada por (FERRARI; VIRGILLITO; CURRI, 2020):

$$I_{amp}^{ASE} = (G_{amp} - 1) F h v, \quad (2.4)$$

em que F é a figura de ruído (*Noise Figure* (NF)) do amplificador, h é a constante de Planck, v é a frequência central da banda de espectro e G_{amp} é o ganho do amplificador em unidades lineares.

A PSD da NLI acumulada ao longo de todos os enlaces na rota r_i é dada por

$$I_i^{NLI} = \sum_{l \in r_i} N_s^l I_s^{NLI}, \quad (2.5)$$

em que I_s^{NLI} , a PSD da NLI gerada em cada *span* do enlace l da rota r_i , é expressa por (JOHAN-
NISSON; AGRELL, 2014)

$$I_s^{NLI} = \frac{3\gamma^2 I_i}{2\pi\alpha|\beta_2|} \left[I_i^2 \ln \left(\frac{\pi^2 |\beta_2| B_i^2}{\alpha} \right) + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c^l} I_j^2 \ln \left(\frac{\Delta f_{ij} + \frac{B_j}{2}}{\Delta f_{ij} - \frac{B_j}{2}} \right) \right], \quad (2.6)$$

em que γ é o coeficiente não linear da fibra, β_2 é o parâmetro de dispersão de velocidade de grupo, α é o coeficiente atenuação de fibra, N_c^l é o número de circuitos (novo e outros já estabelecidos) no enlace l , B_i e B_j são as larguras de bandas dos circuitos i e j , respectivamente, e $\Delta f_{ij} = |f_i - f_j|$, em que f_i e f_j são as frequências centrais dos circuitos i e j . Esses parâmetros são apresentados para o enlace l . O seu valor pode variar de enlace para enlace, dependendo da ocupação espectral de cada enlace.

Para este trabalho, a OSNR é usada como critério de QoT. Caso o valor de OSNR não esteja acima ou igual a um limiar de OSNR pré-estabelecido, o estabelecimento do circuito pode ser bloqueado por baixa QoT. Um bloqueio por baixa QoT pode acontecer de duas formas: i) QoT inadequada para o Novo circuito (QoTN) ou ii) QoT inadequada para um ou mais circuitos já ativos na rede (QoTO). O QoTN é o bloqueio sofrido caso um novo circuito não atinja os níveis adequados de QoT. Mesmo que um novo circuito atinja tal requisito, ele ainda poderá sofrer bloqueio caso o estabelecimento do novo circuito impacte na QoT dos circuitos já estabelecidos, ocasionando assim o QoTO (FONTINELE et al., 2017).

2.3 MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA

O modelo de consumo de energia adotado é bastante utilizado na literatura de redes ópticas elásticas (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012; JU et al., 2016; ZHU et al., 2021; COSTA; BRASILEIRO;

Tabela 2 – Consumo de potência de um BVT com um único *slot* (12,5 GHz) para diferentes formatos de modulação.

Formato de modulação	Taxa de transmissão (Gbps)	Consumo de potência (W)
BPSK	12,5	112,37
4QAM	25,0	133,41
8QAM	37,5	154,45
16QAM	50,0	175,48
32QAM	62,5	196,52

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

DRUMMOND, 2021) e considera a contribuição dos principais dispositivos da rede: BVTs, BV-WXCs e EDFAs.

O consumo de potência de um BVT pode ser expresso como uma função da sua taxa de transmissão como mostra a Equação 2.7. O consumo de potência é expresso em Watts (W) na Equação 2.7, em que TR (Gbps) corresponde a taxa de transmissão do transponder e s é a quantidade de *slots* de frequência utilizados. 91,333 W corresponde a um consumo de potência adicional realizada pelos BVTs. A Tabela 2 apresenta o consumo de potência de um BVT utilizando um único *slot* considerando diferentes formatos de modulação.

$$PC_{BVT}(W) = s \cdot TR \text{ (Gbps)} \cdot 1,683 \text{ (W/Gbps)} + 91,333 \text{ (W)}. \quad (2.7)$$

O consumo de potência de um BV-WXC é expresso como na Equação 2.8, em que N^n corresponde ao grau do nó e N^a corresponde ao número de circuitos que o BV-WXC pode adicionar ou remover. 150 W corresponde a um consumo de potência adicional por nó.

$$PC_{BV-WXC}(W) = N^n \cdot 85 \text{ (W)} + N^a \cdot 100 \text{ (W)} + 150 \text{ (W)}. \quad (2.8)$$

O consumo de potência de um amplificador é considerado como 100 W. A Equação 2.9 calcula a quantidade de amplificadores em um enlace l com distância d (km) e comprimento de *span* de amplificação L_s (km). O consumo de potência de todos os amplificadores ao longo de um enlace l é calculado pela Equação 2.10.

$$N_a^l = (\lceil d/L - 1 \rceil + 2), \quad (2.9)$$

$$PC_{AMPs}(W) = N_a^l \cdot 100 \text{ (W)}. \quad (2.10)$$

Os autores em (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012) apresentam equações (Equações 2.11 e 2.12) para mensurar o consumo de potência de um circuito i em uma dada rota r_i . A Equação

2.11 corresponde ao consumo de potência do circuito i ao longo dos enlaces da rota r_i e a Equação 2.12 corresponde ao consumo de potência total do circuito i utilizando a rota r_i , determinado pelo consumo de espectro relativo.

$$PC_{PATH}(W) = \sum_{n \in r_i} PC_{BV-WXC}(W) + \sum_{l \in r_i} PC_{AMP_s}(W), \quad (2.11)$$

$$MetricPC_i(W) = PC_{BVT_{s_i}}(W) + \frac{slotsRequired_i}{totalSlots_l} \cdot PC_{PATH}(W). \quad (2.12)$$

A variável $slotsRequired_i$ corresponde à quantidade de $slots$ requisitados para o estabelecimento de um circuito i . Já $totalSlots_l$ corresponde à quantidade total de $slots$ em um enlace da rede. $PC_{BVT_{s_i}}(W)$ corresponde ao consumo de potência dos transponders do transmissor e do receptor utilizados pelo circuito i .

A Equação 2.13 é utilizada para mensurar o consumo total de potência de uma rede g . Observa-se pela Equação 2.13, que o consumo total de potência de uma rede g é calculado pela soma da potência total consumida pelos BVTs, BV-WXCs e amplificadores da rede g .

$$PC_{TOTAL}(W) = \sum_{t \in g} PC_{BVT}(W) + \sum_{n \in g} PC_{BV-WXC}(W) + \sum_{l \in g} PC_{AMP_s}(W). \quad (2.13)$$

2.4 MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Com o objetivo de comparar o desempenho dos algoritmos propostos nesta tese com outros presentes na literatura as seguintes métricas de avaliação de desempenho foram consideradas nos estudos apresentados nesse trabalho: Probabilidade de Bloqueio de Banda (PBB), Taxa Média de Fragmentação Externa (TMFE) e Eficiência Energética Efetiva (EEE).

A PBB é calculada pela Equação 2.14. Em que NBB representa a largura de banda total bloqueada (somatório de todas as larguras de banda requisitadas que foram bloqueadas) e NBG representa a largura de banda total gerada (somatório de todas as larguras de banda requisitadas) (RUAN; ZHENG, 2014). Quanto maior for o valor da PBB, menos clientes são atendidos e pior é o desempenho da rede.

$$PBB = \frac{NBB}{NBG}. \quad (2.14)$$

Os trabalhos (CHATTERJEE; BA; OKI, 2018; PEDERZOLLI et al., 2019; LECHOWICZ et al., 2020) apresentam algumas métricas para avaliar o nível de fragmentação do espectro em uma rede óptica elástica. O foco deste trabalho é em bloqueios que ocorrem devido as imperfeições

de camada física, por isto a métrica TMFE foi selecionada. É uma métrica mais simplificada e é utilizada para explicar alguns comportamentos mas não é decisiva para escolher um ou outro algoritmo. A TMFE mede o nível médio de fragmentação externa de todos os enlaces da rede durante o tempo de simulação. Para medir o nível de fragmentação externa é utilizada a Equação 2.15 (ROSA et al., 2012).

$$TMFE = 1 - \frac{largestFreeBlock}{totalFree}. \quad (2.15)$$

Na Equação 2.15, *largestFreeBlock* é a quantidade de *slots* do maior espaço contíguo livre e *totalFree* é a quantidade total de *slots* disponíveis. Quando a fragmentação externa está próxima a um (100%) significa que o espaço disponível está todo dividido em pequenos fragmentos. Em caso do espaço estar todo disponível a fragmentação externa é 0%.

A Eficiência Energética (EE) da rede é definida na Equação 2.18 como a razão entre o total de dados transmitidos (*TotalDataTr*) pelo total de energia consumida na rede (*TotalEC*). *TotalDataTr* é obtido pela soma dos dados transmitidos com sucesso nos diferentes fluxos de dados durante todo o tempo de operação da rede (Equação 2.16). *TotalEC* é calculado pela soma da energia total consumida pelos BVTs, BV-WXCs e amplificadores durante todo o tempo de operação da rede (Equação 2.17).

$$TotalDataTr(bits) = TR_F(bits/s) \cdot Duration(s), \quad (2.16)$$

$$TotalEC(W \cdot s) = EC_{TOTAL}(W) \cdot Duration(s), \quad (2.17)$$

$$EE(bits/Joule) = \frac{TotalDataTr(bits)}{TotalEC(W \cdot s)}. \quad (2.18)$$

Os autores em (COSTA; BRASILEIRO; DRUMMOND, 2021) apresentam uma métrica baseada na EE e na PBB chamada de EEE. A métrica EEE representa um *trade-off* entre a eficiência energética e a eficiência da rede, e é calculada pela Equação 2.19. Valores mais altos para EEE significam um algoritmo mais eficaz.

$$EEE = EE(bits/Joule) \cdot (1 - PBB). \quad (2.19)$$

2.5 SIMULADOR

A literatura aponta que a avaliação de desempenho de sistema pode ser realizada de três formas: i) medição no sistema real, ii) modelagem analítica e iii) simulação (JAIN, 1991).

A medição torna-se uma alternativa de difícil acesso uma vez que as redes ópticas elásticas ainda apresentam barreiras tecnológicas que tornam cara sua implementação, além da indisponibilidade de alguns componentes de hardware no mercado. A modelagem analítica requer a simplificação do cenário de estudo, o que pode impossibilitar a observação de várias características de uma rede óptica elástica que seriam importantes para os cenários considerados neste trabalho. Já a simulação computacional permite estudar cenários mais sofisticados mantendo o baixo custo. Em decorrência disto, este trabalho, assim como a maioria dos trabalhos da literatura na atualidade, utiliza a técnica de simulação para o estudo de avaliação de desempenho em redes ópticas elásticas (WAN et al., 2011; ROSA et al., 2012; WANG; MUKHERJEE, 2012; BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015; REN et al., 2016; HADI; PAKRAVAN, 2018; BEHERA et al., 2019; VALE; ALMEIDA, 2019; COSTA; BRASILEIRO; DRUMMOND, 2021).

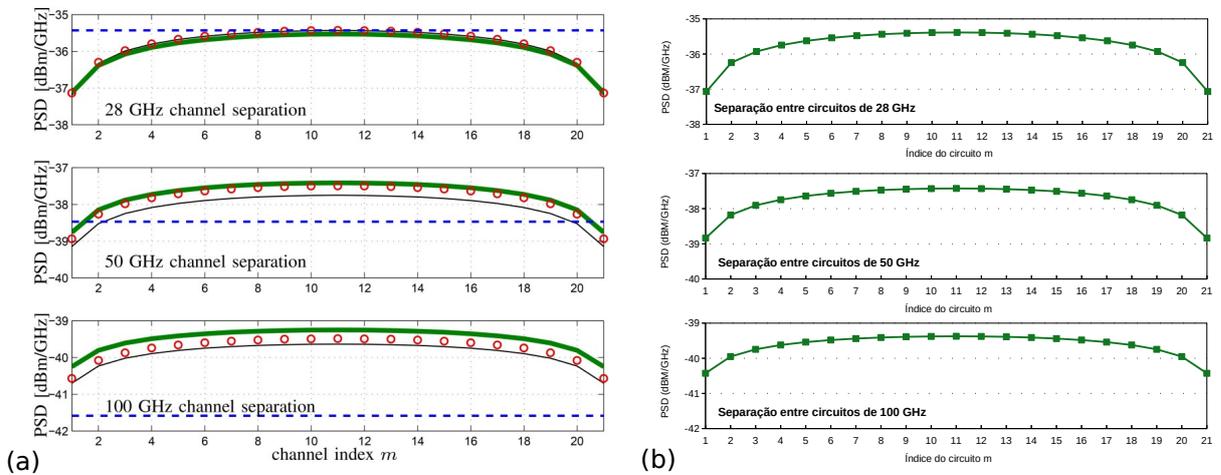
Para a realização dos estudos apresentados neste trabalho foi utilizado o simulador *Slice Network Simulator* (SNetS) (FONTINELE et al., 2017; ARAÚJO et al., 2018; SANTOS et al., 2021). O SNetS é um simulador de redes ópticas elásticas desenvolvido na linguagem Java. O SNetS permite o estudo de avaliação de desempenho de algoritmo de alocação de recursos como: roteamento, atribuição de espectro, seleção de formato de modulação, alocação de regeneradores, técnicas de sobrevivência e agregação de tráfego. Além disso, permite o estudo de redes elásticas ópticas sob diversas métricas, tais como: probabilidade de bloqueio de requisição, probabilidade de bloqueio de banda, fragmentação óptica, utilização de recursos e consumo de energia.

Na Anexo A é apresentada uma comparação do SNetS com outros simuladores de redes ópticas elásticas. A comparação demonstra que o SNetS cobre um maior número de funcionalidades e métricas em relação aos outros simuladores listados. Devido a isto e a facilidade de se implementar novas funcionalidades, o SNetS foi escolhido para dar suporte as estudos desse trabalho.

Os modelos de camada física e consumo de energia apresentados neste Capítulo foram implementados no SNetS para a realização dos experimentos presentes neste trabalho. Foram realizados estudos de comparação entre os resultados gerados pelo SNetS e resultados apresentados em artigos científicos. As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados dos estudos de comparação com os artigos (JOHANNISSON; AGRELL, 2014) e (POGGIOLINI; JIANG, 2017), respectivamente.

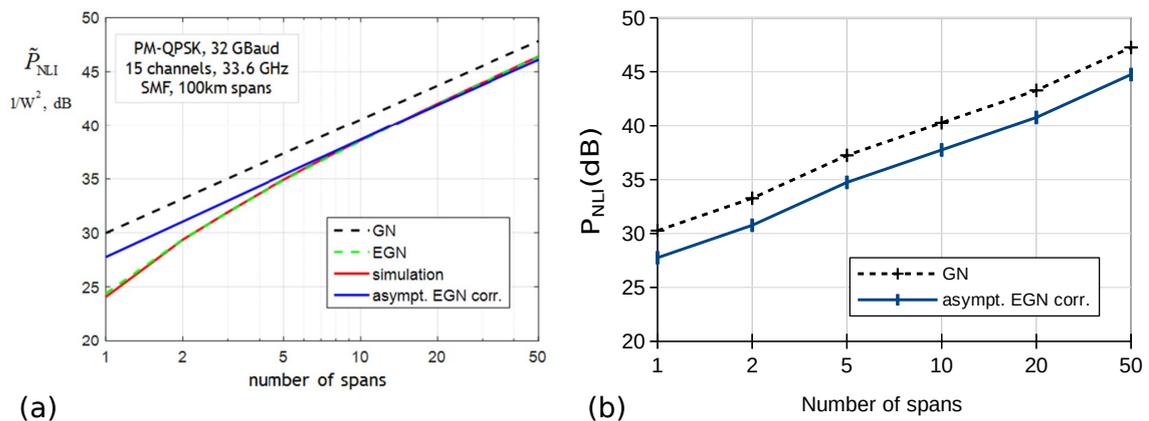
Na Figura 5 é apresentada a PSD do NLI calculada para o cenário da Figura 3 do artigo

Figura 5 – Comparação entre (a) os resultados apresentados na Figura 3 do artigo (JOHANNISSON; AGRELL, 2014) e (b) os resultados gerados pelo SNetS.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 6 – Comparação entre (a) os resultados apresentados na Figura 13 do artigo (POGGIOLINI; JIANG, 2017) e (b) os resultados gerados pelo SNetS.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

(JOHANNISSON; AGRELL, 2014). Este cenário consiste de 21 circuitos estabelecidos em uma fibra com 80 km de comprimento, com α é igual a 0,2 dB/km, γ é igual a 1,3 (Wkm)⁻¹ e o parâmetro de dispersão da fibra (D) é igual a 16 ps/(nm·km). Os 21 circuitos possuem largura de banda de 28 GHz e 0 dBm de potência e são igualmente separados por 28, 50 ou 100 GHz, como pode ser observado na Figura 5 de cima para baixo.

Já na Figura 6 é apresentada a potência acumulada de NLI (P_{NLI}) para o cenário da Figura 13 do artigo (POGGIOLINI; JIANG, 2017). Este cenário consiste de 15 circuitos com largura de banda de 32 GHz, 0 dBm de potência, com espaçamento entre circuitos de 33,6 GHz e spans de amplificação com 100 km. A fibra possui α é igual a 0,2 dB/km, γ é igual a 1,3 (Wkm)⁻¹

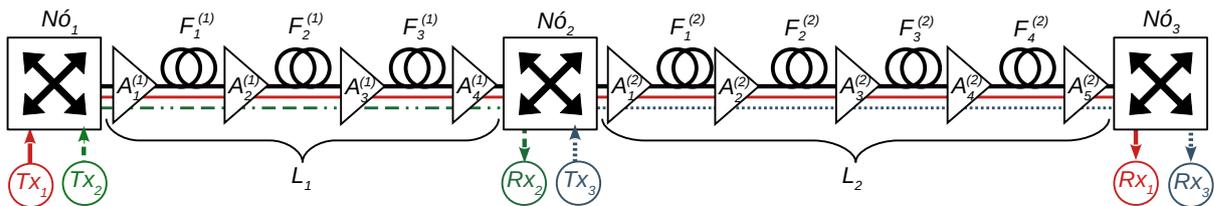
e D é igual a 16,7 ps/(nm·km). A potência de NLI é normalizada com P_i^3 .

No artigo 6 é apresentado o modelo *Exhaustive Gaussian Noise* (EGN). Neste modelo, a suposição de gaussianidade do sinal é removida adicionando-se um termo de correção à fórmula do modelo de ruído gaussiano (*Gaussian Noise* (GN)). Esse termo, na verdade, reduz a superestimação do modelo GN e leva em consideração também o formato de modulação do sinal. O modelo EGN também foi implementado no SNetS para realizarmos os estudos de comparação com os resultados da Figura 6.

Observa-se pelas Figuras 5 e 6 que os resultados gerados pelo SNetS foram similares aos resultados apresentados nas figuras dos artigos (JOHANNISSON; AGRELL, 2014) e (POGGIOLINI; JIANG, 2017), respectivamente. Buscamos reproduzir o comportamento da curva verde na Figura 5(a) com o SNetS, Figura 5(b). A curva verde demonstra os diferentes impactos dos efeitos não lineares sobre os diferentes circuitos. Os circuitos nas bordas sofrem um menor impacto em comparação com os circuitos no centro. Já na Figura 6(b), buscamos reproduzir o comportamento das curvas dos modelos GN, linha pontilhada preta, e EGN, linha sólida azul, presentes na Figura 6(a). As linhas demonstram como a potência acumulada de NLI cresce com o aumento do número de spans de amplificação.

A Figura 7 apresenta um cenário simples para demonstrarmos como é computado o consumo de potência. Neste cenário, assumimos uma rede com apenas três nós e dois enlaces. Com distâncias de 300 km para o enlace L_1 e 400 km para o enlace L_2 , e com 100 km de comprimento para cada *span* de amplificação. Assumimos, para este exemplo, que um enlace possui 20 *slots* disponíveis no total e que cada nó pode adicionar ou remover 10 circuitos. Nesta rede temos três circuitos estabelecidos: c_1 , c_2 e c_3 (representados pelas cores vermelha, verde e azul, respectivamente). Na Tabela 3 são apresentadas informações sobre os circuitos c_1 , c_2 e c_3 .

Figura 7 – Figura para demonstração do consumo de potência.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O consumo de potência para cada um dos circuitos, que está presente na coluna "Consumo de potência" da Tabela 3, foi calculado com a Equação 2.12. Observa-se pela Tabela 3, que

Tabela 3 – Informações sobre os circuitos da Figura 7.

Circuito	Modulação	Número de <i>slots</i>	Rota (Nós)	Consumo de potência
c_1	4QAM	10	1, 2 e 3	4869,17 W
c_2	32QAM	3	1 e 2	1557,04 W
c_3	16QAM	5	2 e 3	2287,92 W

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

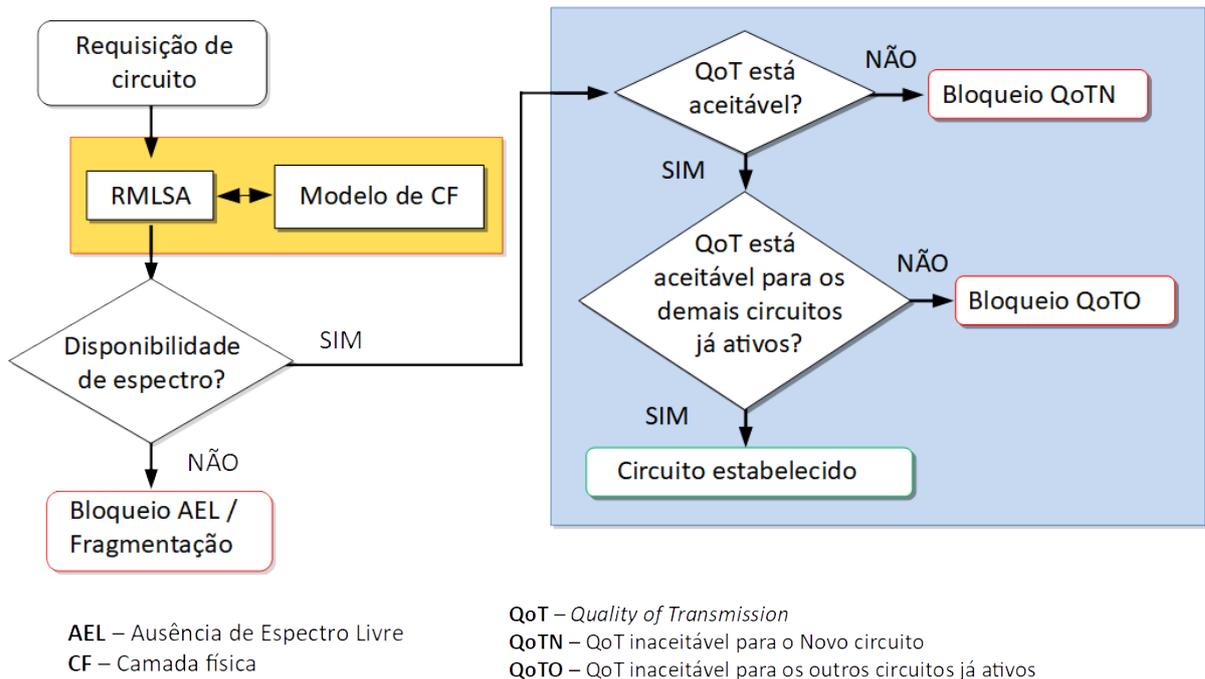
o circuito c_1 possui a rota com maior distância (700 km) e foi o circuito que consumiu mais potência. Enquanto o circuito c_2 , que é o circuito com a rota com menor distância (300 km), consumiu menos potência em comparação aos outros circuitos. O consumo total de potência da rede é igual a 10552,12 W e foi calculado com a Equação 2.13. Nota-se que a soma do consumo de potência dos três circuitos é igual a 8714,12 W e que é inferior ao consumo total de potência da rede. Isto acontece porque a Equação 2.12 calcula o consumo de potência de um circuito considerando o consumo de espectro relativo deste circuito.

Para os estudos apresentados nesse trabalho, a carga de tráfego foi distribuída uniformemente entre todos os pares de nós. A geração de requisições é um processo de Poisson de taxa de chegada λ , e o tempo de duração das conexões requisitadas é distribuído exponencialmente com média $1/\mu$. A intensidade de tráfego na rede em Erlangs é dada por $\rho = \lambda/\mu$.

A Figura 8 apresenta o controle de admissão de requisição de circuito. O controle de admissão de requisição de circuito decide sobre o bloqueio ou aceitação de uma solicitação de circuito. Ele também identifica qual foi o tipo de bloqueio que a requisição de circuito sofreu. Observa-se pela Figura 8 que o modelo de camada física é aplicado em conjunto com os algoritmos RMLSA.

O controle de admissão de requisição de circuito verifica primeiro os tipos de bloqueios relacionados com a disponibilidade de espectro: fragmentação e Ausência de Espectro Livre (AEL). O bloqueio por fragmentação já foi comentado no exemplo da Figura 3. O bloqueio por AEL ocorre quando não há *slots* livres em algum enlace da rota selecionada para o estabelecimento do novo circuito. Depois verifica-se os tipos de bloqueios relacionados com QoT: QoTN e QoTO. Os bloqueios por QoTN e QoTO já foram discutidos na Seção 2.2. No Anexo A são apresentadas mais informações sobre o simulador SNetS.

Figura 8 – Demonstração do controle de admissão de requisição de circuito.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foram apresentados os principais dispositivos ópticos utilizados em uma rede óptica elástica. Foram apresentados os modelos de camada física e consumo de energia adotados neste trabalho. Foram mostradas as principais métricas de avaliação de desempenho consideradas nos estudos apresentados neste trabalho. E por fim, foi apresentado o simulador que deu suporte para a realização dos experimentos.

No próximo Capítulo é discutido o problema de roteamento, seleção de formato de modulação e alocação de espectro. Também são apresentados os conceitos de sobrevivência e do problema de atribuição de potência por circuito.

3 PROBLEMA RMLSA

Este Capítulo discute o problema RMLSA. Na Seção 3.1 são tratados os principais conceitos sobre o problema RMLSA e como os algoritmos que são propostos para solucionar o problema RMLSA podem ser classificados em duas categorias: sequencial e integrado. As Seções 3.2 e 3.3 apresentam os conceitos de RMLSA ciente do consumo de energia e de imperfeições de camada física. As técnicas de sobrevivência são discutidas na Seção 3.4. Por fim, o problema de atribuição de potência por circuito é apresentado na Seção 3.5.

3.1 ROTEAMENTO, SELEÇÃO DE MODULAÇÃO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO

Um dos principais problemas a ser tratado em redes ópticas elásticas é o problema RMLSA (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011). O problema RMLSA consiste em: i) definir uma rota para um par de nós origem e destino; ii) selecionar um formato de modulação capaz de percorrer toda a rota com QoT aceitável e a maior eficiência espectral possível; iii) alocar uma faixa de espectro livre na rota selecionada para estabelecer o circuito óptico.

Embora o problema RMLSA seja um problema *NP-completo* (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011), ele pode ser resolvido de maneira integrada ou sequencial. O problema RMLSA resolvido de maneira separada consiste em um primeiro momento definir uma rota para o estabelecimento do circuito óptico. Em um segundo momento selecionar o formato de modulação adequado. E em por fim, definir a quantidade e quais serão os *slots* de frequência alocados para o estabelecimento do circuito óptico.

3.1.1 RMLSA sequencial

Para o subproblema de roteamento, três abordagens podem ser amplamente encontradas na literatura: roteamento fixo, fixo alternativo e adaptativo (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). O roteamento fixo é o mais simples e sempre devolve a mesma rota, que é pré-computada, para um dado par origem e destino. Para o cálculo da rota para um dado par origem e destino geralmente utiliza-se um algoritmo de menor caminho, tal como o algoritmo *Shortest Path First* (SPF) de *Dijkstra* (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

No roteamento fixo alternativo, cada nó da rede mantém uma tabela de roteamento, que

contém uma lista ordenada com um número fixo de rotas. Essas rotas são computadas *off-line*. Quando uma conexão é requisitada, a primeira rota da lista é verificada. Caso não seja possível encontrar um conjunto de *slots* de frequência, as próximas rotas da lista serão verificadas até que seja encontrada uma rota com espectro disponível. Caso não seja possível utilizar nenhuma das rotas, a requisição é bloqueada.

No roteamento adaptativo, as rotas entre os pares origem e destino são formadas dinamicamente, dependendo da informação do estado atual da rede. A informação do estado atual da rede é determinada pelo conjunto de todos os circuitos que estão atualmente ativos. Por exemplo, supondo que no estado inicial uma rede teria o custo um associado a cada enlace. Cada vez que um novo circuito é estabelecido, o custo de cada enlace da rota selecionada para o novo circuito seria incrementado. E cada vez que um circuito é encerrado o custo de cada enlace seria decrementado. Assim, um algoritmo de roteamento adaptativo utilizaria esse custo, que é alterado dinamicamente com o estabelecimento e encerramento de circuitos, para definir suas rotas.

Na literatura são apresentadas duas abordagens para o subproblema de seleção de formato de modulação: seleção pelo alcance máximo de transmissão e seleção pela QoT. O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo para a seleção do formato de modulação pelo alcance máximo de transmissão (JINNO et al., 2010; CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011; ZHU et al., 2013; HADI; PAKRAVAN, 2018).

Algorithm 1 Seleção do formato de modulação pelo alcance máximo de transmissão.

```

1: Input: Req {Requisição de um novo circuito}
2: Output: M {Modulação escolhida}
3:  $M \leftarrow \emptyset$ 
4:  $SM \leftarrow sortedModulations()$  {Lista de modulações ordenadas de maneira
   decrescente em função do alcance óptico}
5:  $R \leftarrow routing(Req)$ 
6: for  $m \in SM$  do
7:   if  $m.maximumReach \geq R.distance$  then
8:      $M \leftarrow m$ 
9:   end if
10: end for
11: return  $M$ 

```

O Algoritmo 1 busca pelo formato de modulação adequado de forma decrescente em alcance máximo de transmissão dos formatos de modulação disponíveis. O Algoritmo 1 verifica se o alcance máximo de transmissão de um formato de modulação é suficiente para o estabelecimento do circuito de acordo com a distância da rota selecionada (Linha 6). Se o Algoritmo

1 retornar vazio, significa que nenhum dos formatos de modulação disponíveis possuem alcance máximo de transmissão suficiente para o estabelecimento do circuito. Caso contrário, o algoritmo retornará o formato de modulação adequado.

O Algoritmo 2 apresenta o pseudocódigo para a seleção do formato de modulação pela QoT (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; YAN et al., 2015; FONTINELE et al., 2017). O Algoritmo 2, assim como o Algoritmo 1, busca o formato de modulação adequado de forma decrescente em alcance máximo de transmissão dos formatos de modulação disponíveis. O diferencial, é que o Algoritmo 2 verifica a QoT do circuito e não o alcance máximo de transmissão (Linha 9). Para verificar se a QoT de um circuito está aceitável ou não é preciso calcular o OSNR e verificar se ele está de acordo com o limiar de OSNR do formato de modulação em verificação. Se o Algoritmo 2 retornar vazio, significa que nenhum dos formatos de modulação disponíveis alcançaram QoT aceitável para o estabelecimento do circuito. Caso contrário, o algoritmo retornará o formato de modulação adequado.

Algorithm 2 Seleção do formato de modulação pela QoT.

```

1: Input: Req {Requisição de um novo circuito}
2: Output: M {Modulação escolhida}
3:  $M \leftarrow \emptyset$ 
4:  $SM \leftarrow sortedModulations()$  {Lista de modulações ordenadas de maneira
   decrescente em função do alcance óptico}
5: for  $m \in SM$  do
6:    $S \leftarrow RMLSA(Req, m)$  {Buscar uma solução RMLSA para Req considerando
   a modulação m}
7:   if  $S.route \neq \emptyset$  then
8:     if  $S.spectrum \neq \emptyset$  then
9:       if  $S.OSNR \geq m.OSNR_{th}$  then
10:         $M \leftarrow m$ 
11:       end if
12:     end if
13:   end if
14: end for
15: return M

```

Para o subproblema de alocação de espectro existem várias heurísticas apresentadas pela literatura e cada uma delas pode ser utilizada em conjunto com qualquer estratégia de roteamento e seleção de formato de modulação (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). O algoritmo de alocação de espectro deve selecionar o conjunto de *slots* de frequência adequado para o estabelecimento de um novo circuito. Os *slots* de frequência devem ser alocados adjacentes uns aos outros para atender a restrição de contiguidade de espectro. Além disso, a continuidade

desses *slots* de frequência em cada enlace da rota deverá ser garantida.

3.1.2 RMLSA integrado

Diferentes trabalhos presentes na literatura consideram roteamento e alocação de espectro ao mesmo tempo, o que é chamado de RMLSA integrado (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). Geralmente utilizam uma matriz para descrever o estado do espectro no enlace ou caminho, considerando as restrições de continuidade e contiguidade. Depois escolhem a matriz candidata disponível com o melhor desempenho. De maneira geral, algoritmos RMLSA sequenciais são computacionalmente mais simples que os algoritmos RMLSA integrados.

Os autores em (ZHOU et al., 2012) propõem um algoritmo genético para resolver o problema RMLSA. Em (YIN et al., 2013b), é investigado como o estabelecimento de circuitos em um cenário de tráfego dinâmico fragmenta o espectro óptico ao longo de uma rota. Ainda em (YIN et al., 2013b), são propostos dois algoritmos, *Fragmentation-Aware RMLSA* e *Alignment-Aware RMLSA*, para resolver o problema RMLSA e aliviar a fragmentação na rede.

Em (YIN et al., 2013a) o problema da fragmentação do espectro em redes ópticas elásticas é estudado em duas dimensões: i) fragmentação do espectro em cada enlace e ii) fragmentação espacial entre os enlaces candidatos e seus vizinhos. São propostos dois algoritmos RMLSA integrados chamados *Fragmentation-Aware RMLSA (FA)* e *Fragmentation-Aware RMLSA with Congestion Avoidance (FA-CA)* para aliviar a fragmentação espectral no processo de provisionamento de circuitos ópticos.

Em (LEIVA et al., 2014) é proposto um algoritmo RMLSA integrado chamado de *Dynamic Graph Coloring (DGC)*. O algoritmo DGC cria um sub grafo da rede com apenas as unidades de *slots* de frequência disponíveis. Depois é executado o algoritmo de menor caminho de *Dijkstra* sobre o sub grafo. O resultado da busca é o menor caminho possível com espectro disponível suficiente para estabelecer um dado circuito.

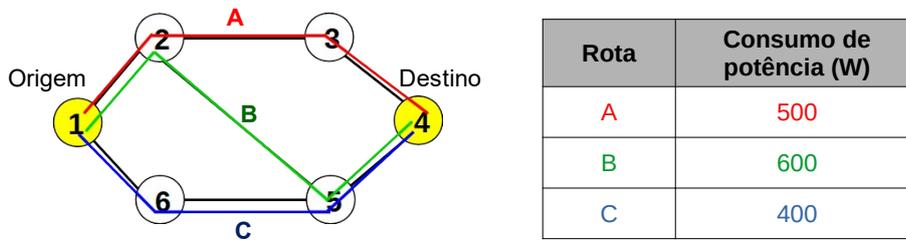
O algoritmo *Energy Aware Multigraph Shortest Path (EAMGSP)*, que é um RMLSA integrado que utiliza multigrafo para representar a disponibilidade de espectro da rede, é proposto em (MOURA; SCARAFICCI; FONSECA, 2015). O algoritmo EAMGSP usa uma função de custo que considera o consumo de energia dos caminhos para selecionar o caminho com o menor consumo de energia e que tenha o alcance de transmissão necessária para atender uma dada requisição de conexão.

3.2 RMLSA CIENTE DO CONSUMO DE ENERGIA

A eficiência energética das redes ópticas elásticas pode ainda ser influenciada pela estratégia RMLSA adotada, desse modo o desenvolvimento do algoritmos RMLSA também precisa considerar o consumo de energia. Por exemplo, o algoritmo de roteamento pode buscar por rotas que geram o menor consumo de energia (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012) ou o algoritmo de seleção de modulação pode buscar selecionar formatos de modulação que consumem menos energia (REN et al., 2016). A Figura 9 apresenta um exemplo de seleção de rota pelo consumo de energia.

Figura 9 – Seleção de rota considerando o consumo de energia.

Qual a melhor rota para o par (1, 4) em termos de consumo de potência?



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

No exemplo da Figura 9, o algoritmo de roteamento deve selecionar uma rota dentre três rotas candidatas (*A*, *B* e *C*) para o estabelecimento de um circuito para o par (1, 4). Na tabela, a direita da Figura 9, são apresentados os consumos de potência para cada rota candidata. O algoritmo de roteamento selecionará a rota *C* pois ela possui o menor consumo de potência dentre as três rotas, 400 W. O Algoritmo 3 apresenta o pseudocódigo para a seleção do formato de modulação pelo consumo de energia.

O Algoritmo 3 busca pelo formato de modulação adequado de forma crescente de eficiência espectral dos formatos de modulação disponíveis. O Algoritmo 3 verifica para cada formato de modulação se é possível alocar espectro e se a QoT está aceitável. Se o Algoritmo 3 retornar vazio, significa que nenhum dos formatos de modulação disponíveis conseguirá estabelecer o circuito. Caso contrário, o algoritmo retornará o formato de modulação adequado.

Algorithm 3 Seleção do formato de modulação pelo consumo de energia.

```

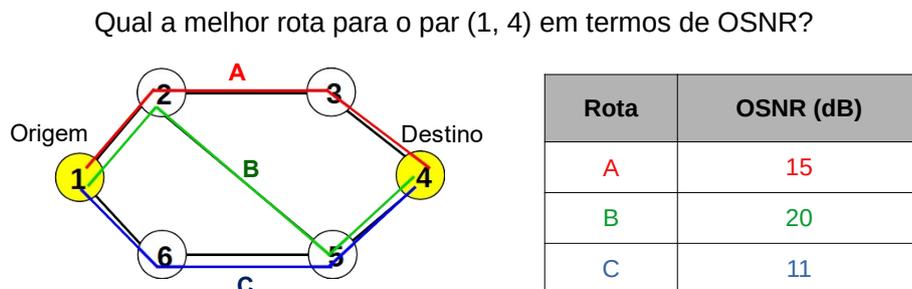
1: Input: Req {Requisição de um novo circuito}
2: Output: M {Modulação escolhida}
3:  $M \leftarrow \emptyset$ 
4:  $lowerEC \leftarrow \infty$ 
5:  $SM \leftarrow sortedModulations()$  {Lista de modulações ordenadas de acordo
   com a eficiência espectral.}
6: for  $m \in SM$  do
7:    $S \leftarrow RMLSA(Req, m)$  {Buscar uma solução RMLSA para Req considerando
   a modulação  $m$ }
8:   if  $S.route \neq \emptyset$  then
9:     if  $S.spectrum \neq \emptyset$  then
10:      if  $S.OSNR \geq m.OSNR_{th}$  then
11:        if  $S.energyConsumption < lowerEC$  then
12:           $M \leftarrow m$ 
13:           $lowerEC \leftarrow S.energyConsumption$ 
14:        end if
15:      end if
16:    end if
17:  end if
18: end for
19: return M

```

3.3 RMLSA CIENTE DE IMPERFEIÇÕES DE CAMADA FÍSICA

Os algoritmos RMLSA que utilizam informações da camada física para tomar decisões sobre a alocação dos recursos da rede são chamados de IA-RMLSA. O conceito de algoritmos IA-RMLSA é importante devido aos efeitos prejudiciais da coexistência de vários circuitos ópticos com diferentes formatos de modulações e taxas de bits (BEYRANVAND; SALEHI, 2013). A Figura 10 apresenta um exemplo de seleção de rota pela OSNR.

Figura 10 – Seleção de rota considerando a OSNR.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

No exemplo da Figura 10, o algoritmo de roteamento deve selecionar uma rota dentre três

rotas candidatas (A , B e C) para o estabelecimento de um circuito para o par (1, 4). Na tabela, a direita da Figura 10, são apresentados os valores de OSNR alcançados para cada rota candidata. Neste caso, o maior valor de OSNR será melhor para o estabelecimento do novo circuito. O algoritmo de roteamento selecionará a rota B pois ela possui o maior valor de OSNR dentre as três rotas, 20 dB.

Os autores em (BEYRANVAND; SALEHI, 2013) propõem um esquema de RMLSA ciente de QoT para redes ópticas elásticas. O esquema emprega três etapas: i) cálculo das rotas viáveis, ii) seleção de uma rota e iii) alocação de espectro. O artigo apresenta um modelo analítico (expressões matemáticas) para calcular a OSNR de uma dada rota. Baseado no esquema proposto são apresentados dois algoritmos IA-RMLSA: *Modified Dijkstra Path Computation* (MD-PC) e *K-Shortest Path Computation* (KS-PC).

O algoritmo MD-PC é uma versão modificada do algoritmo de menor caminho de *Dijkstra*. O MD-PC computa as menores rotas possíveis entre um dado par de nós origem e destino, e determina o formato de modulação adequado para cada rota. No momento em que um nó é visitado, o algoritmo só marca para serem visitados os vizinhos deste nó em que os enlaces possuem espectro livre contínuo que dão suporte à taxa de bits requisitada.

No algoritmo KS-PC, o algoritmo de k -menores caminhos de *Yen* (YEN, 1971) é utilizado para obter as k rotas candidatas. Para cada rota do conjunto de rotas candidatas é determinado um formato de modulação adequado. A rota é retirada do conjunto de rotas candidatas se não for possível encontrar um formato de modulação para a rota em questão. A próxima etapa é determinar a rota mais qualificada, referenciada como rota dominante, em termos das métricas de QoT e eficiência espectral.

Em (FONTINELE et al., 2017) é proposto um algoritmo IA-RMLSA para redes ópticas elásticas chamado de *K-Shortest Path with Reduction of QoTO* (KSP-RQoTO). O objetivo do algoritmo é reduzir a probabilidade de bloqueio causada pela degradação da qualidade de transmissão proveniente do estabelecimento de novos circuitos. O algoritmo KSP-RQoTO utiliza um parâmetro denominado de σ para selecionar formatos de modulação buscando estabelecer circuitos mais resistentes a interferências de novos circuitos. A estratégia de seleção de rotas do algoritmo KSP-RQoTO é selecionar aquelas que evitem uma degradação maior em termos de OSNR dos circuitos já ativos na rede.

Em (COSTA; BRASILEIRO; DRUMMOND, 2020) é proposto um algoritmo RMLSA que categoriza as margens mínimas que devem ser adotadas para o estabelecimento de novos circuitos, tendo como base a sua degeneração esperada e o impacto causado aos circuitos ópticos já esta-

belecidos. O algoritmo proposto é chamado de *Low-Margin With Circuit Invigorating* (LMCI). Resultados de simulação mostram que as margens mínimas propostas associada a tonificação dos circuitos apresentam resultados melhores que algoritmos que propõem uma margem mais justa ou que avaliam o QoT por meio do alcance máximo transparente.

3.4 PROTEÇÃO DEDICADA DE CAMINHO

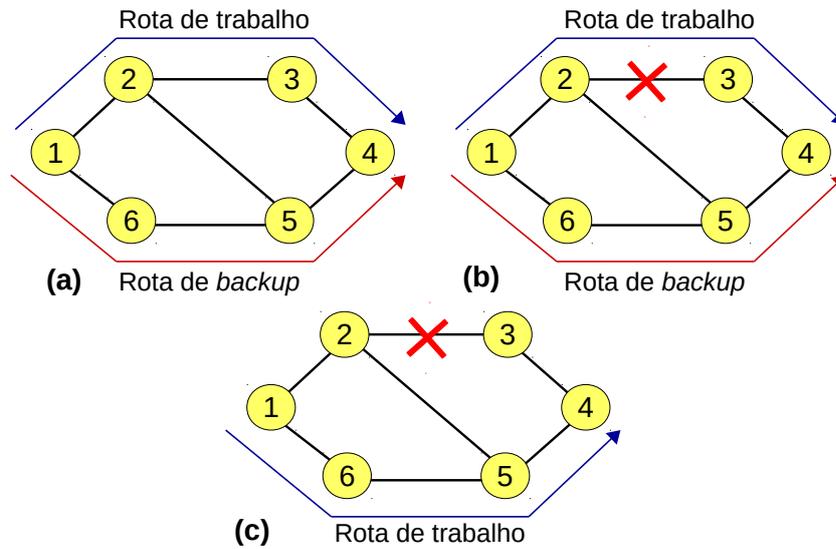
Garantir a sobrevivência de uma rede implica desenvolver técnicas para manter a rede operante mesmo após a ocorrência de uma falha. As técnicas de sobrevivência em redes ópticas podem ser divididas em duas categorias: proteção ou restauração. A restauração é uma técnica reativa que tratará a falha após a ocorrência da mesma. Já a proteção é uma técnica proativa, ou seja, trata a falha antes da sua ocorrência (SHEN; GUO; BOSE, 2016).

Este trabalho tem como escopo a classe de proteção. A escolha de técnicas de proteção em detrimento a restauração deve-se à proatividade da proteção. Com esta característica tem-se uma garantia de sobrevivência maior em modelos de falha única quando comparado a técnicas de restauração, pois o recurso de *backup* é alocado de forma prévia. No caso da restauração, que busca proporcionar uma economia no uso de recursos, não existe garantia que haverá recursos disponíveis no momento da falha.

As duas principais formas de proteção são proteção dedicada e proteção compartilhada. Na proteção dedicada, ao se alocar a rota principal, denominada rota de trabalho, também é alocada uma rota de *backup*. A rota de *backup* é construída de tal forma que o recurso torna-se dedicado e exclusivo para atender, em caso de necessidade, a requisição que alocou a rota de trabalho ligada a essa rota de *backup*. Com isso tal rota torna-se indisponível para outras requisições (mesmo não estando em uso efetivo). Já na proteção compartilhada, a rota de *backup* pode ser compartilhada entre outras requisições disjuntas entre si. Isso diminui o desperdício no uso dos recursos da rede. A Figura 11 ilustra um exemplo de proteção dedicada para a topologia A6NET (6 nós e 7 enlaces).

No exemplo da Figura 11 pode-se observar de forma simples o funcionamento da técnica de proteção dedicada. Neste caso, a proteção é realizada em relação a toda a rota de trabalho, sendo conhecida como proteção dedicada de caminho. A Figura 11(a) exemplifica o momento da alocação das duas rotas para uma conexão do nó 1 para o nó 4. Neste caso a rota 1-2-3-4 foi escolhida como rota de trabalho e a rota 1-6-5-4, disjunta em relação à rota de trabalho, foi alocada como rota de *backup*. No momento exemplificado na Figura 11(b),

Figura 11 – Exemplo de proteção dedicada.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

ocorre uma falha no enlace 2-3, que faz parte da rota de trabalho. Para a rede continuar operante, automaticamente o recurso alocado como *backup* passa a funcionar como a nova rota de trabalho, como mostrado na Figura 11(c). Com esta técnica, garante-se que a rede continuará operante, mesmo após a ocorrência de falha simples. Quando se trabalha com a técnica de proteção para prover sobrevivência deve-se resolver o problema RMLSA para a rota de trabalho e para a rota de *backup*.

3.5 PROBLEMA DE ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA POR CIRCUITO

Os efeitos da camada física degradam o sinal óptico quando ele se propaga ao longo do caminho óptico. Amplificadores ópticos (geralmente EDFA) adicionam ruído de emissão espontânea amplificada (ASE) ao sinal. Além disso, a interferência não linear (NLI) também é gerada durante a propagação do sinal na fibra óptica. As NLIs fazem com que os circuitos causem interferência entre si (VALE; ALMEIDA, 2019).

A potência de NLI depende das características do sinal (potência, largura de banda e posição no espectro). Por outro lado, a potência de ruído ASE depende da distância percorrida pelo sinal óptico e não é influenciada pelos níveis de potência de sinal. Entretanto, altos níveis de potência de sinal aumentam a potência de NLI na rede. Desta forma, a OSNR alcançada por um circuito depende, entre outros fatores, do nível de potência de sinal atribuída ao circuito (VALE; ALMEIDA, 2019).

nível de potência P_σ vão ser estabelecidos.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi discutido o problema RMLSA, que é um dos principais problemas em redes ópticas elásticas. Foi mostrado que os algoritmos que são propostos para solucionar o problema RMLSA podem ser classificados em sequenciais ou integrados. Apesar das soluções integradas serem mais complexas computacionalmente do que as soluções sequenciais, as soluções integradas geralmente apresentam os melhores desempenhos em termos de probabilidade de bloqueio.

Também foi apresentado o conceito de IA-RMLSA e foram apresentados trabalhos que propõe soluções para o problema IA-RMLSA. Foi discutida a estratégia de proteção que é a técnica de sobrevivência foco deste trabalho. Por fim foi apresentado o problema de atribuição de potência por circuito.

O próximo capítulo apresenta a proposta de um novo algoritmo de alocação de espectro ciente de imperfeições de camada física para redes ópticas elásticas.

4 PROPOSTA DE ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE ESPECTRO COM REDUÇÃO DE INTERFERÊNCIAS ENTRE CIRCUITOS

Neste Capítulo são apresentados os estudos referentes a alocação espectral em redes ópticas elásticas. Na Seção 4.1 são apresentados os trabalhos relacionados. O algoritmo proposto é apresentado na Seção 4.2. Uma avaliação de desempenho comparando o algoritmo proposto com outros trabalhos da literatura é apresentada na Seção 4.3. Por fim, as considerações finais deste Capítulo são apresentadas na Seção 4.4.

4.1 TRABALHOS RELACIONADOS

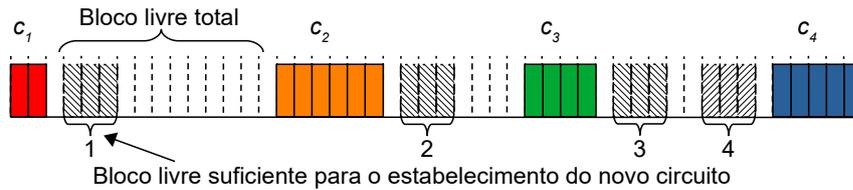
Dentre os métodos de alocação de espectro de fácil implementação e com baixa complexidade computacional tem-se o *FirstFit* (FF), *RandomFit* (RF), *LastFit* (LF), *BestFit* (BF) e *ExactFit* (EF) (ROSA et al., 2012; LEIVA et al., 2014; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; OLSZEWSKI, 2017). O método FF é o mais utilizado na literatura. Nele, os *slots* são indexados e mantidos em uma lista com os *slots* disponíveis. No momento do estabelecimento de um circuito é escolhida um bloco de *slots* disponíveis com os menores índices presentes na lista. Assim como no FF, o método RF, também mantém uma lista com os *slots* disponíveis. Porém no momento do estabelecimento de um circuito ele busca escolher aleatoriamente um bloco de *slots* disponíveis.

O método LF escolhe um bloco de *slots* disponíveis com os maiores índices presentes na lista de *slots* disponíveis. O método BF escolhe o bloco de *slots* disponíveis cuja quantidade de *slots* é a mais próxima da quantidade de *slots* requisitadas. O método EF busca alocar um bloco de *slots* livres com a quantidade de *slots* igual à solicitada para o estabelecimento do novo circuito. Caso contrário, busca alocar o bloco com a maior diferença entre *slots* livres e solicitados.

A Figura 13 apresentada um cenário para a demonstração da aplicação dos métodos de alocação de espectro. Considera-se a chegada de uma requisição de circuito com taxa de transmissão de 40 Gbps, rota com 3000 km de distância e que requer três *slots*. Na Figura 13, os blocos de *slots* coloridos representam *slots* já ocupados por circuitos (c_i). Os blocos de *slots* livres (contíguos e contínuos) que são suficientes para acomodar o estabelecimento do novo circuito estão representadas por números.

Aplicando os métodos de alocação de espectro já discutidos no cenário apresentado pela

Figura 13 – Cenário para a demonstração da aplicação dos métodos de alocação de espectro.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 13 tem-se as seguintes escolhas. O método FF seleciona o bloco de *slots* livres representado pelo número 1. O método RF, para o exemplo, aloca aleatoriamente o bloco de *slots* livres representado pelo número 3. E o método LF escolhe o bloco de *slots* livres representado pelo número 4. Enquanto o método BF seleciona o bloco de *slots* livres representado pelo número 2. Já o método EF não encontra um bloco de *slots* livres total com o mesmo número de *slots* solicitados. Então o bloco de *slots* livres selecionado pelo EF é também representado pelo número 1.

Alguns trabalhos propõem a combinação de FF e LF (*FirstLastFit* (FLF)) para evitar a fragmentação do espectro (TALEBI et al., 2014; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; LIU et al., 2017). Nesses trabalhos os *slots* nos enlaces são divididos em partições. O método FF sempre tenta escolher os *slots* livres com os menores índices na partição de número ímpar. Enquanto o método LF escolhe os *slots* livres com os maiores índices na partição de número par. Quando chega uma requisição de circuito é utilizado algum mecanismo para decidir em qual partição será selecionado o bloco de *slots* livres para o estabelecimento do circuito. Geralmente o mecanismo de decisão é baseado nas taxas de transmissão solicitadas pelas requisições. Por exemplo, supondo um cenário em que as granularidades de taxas de transmissão requisitadas são 10, 40, 60, 80 e 100 Gbps. As requisições de taxas de transmissão 80 e 100 Gbps seriam alocadas na partição que utiliza o FF. Enquanto as requisições de taxas de transmissão 10, 40 e 60 Gbps seriam alocadas na partição que utiliza o LF. Aplicando o FLF no cenário apresentado pela Figura 13, o bloco de *slots* livres selecionado é a representado pelo número 4.

Os autores em (BEYRANVAND; SALEHI, 2013) propõem um método de alocação de espectro chamado de *Traffic Balancing Spectrum Assignment* (TBSA). O método TBSA busca alocar os *slots* de frequência de forma a distribuir a carga de tráfego sobre o espectro. O TBSA busca pelos intervalos de espectro livres que possuem quantidade de *slots* maior ou igual à quantidade de *slots* solicitados para o estabelecimento do circuito. Depois separa os intervalos encontrados em duas partes, chamadas de W_1 e W_2 . Verifica a quantidade de *slots* em cada

parte e seleciona a parte que possuir mais *slots*. Repete o processo de divisão, contagem e seleção até que a parte W_i que sobrar contenha apenas um intervalo.

Aplicando o TBSA no cenário da Figura 13, ele consideraria os dois primeiros blocos livres totais como sendo a parte W_1 e o terceiro bloco livre total como sendo a parte W_2 . O TBSA selecionaria a parte W_1 para continuar a investigar, já que W_1 possui mais *slots* livres que W_2 . Depois o primeiro bloco livre total passaria a representar a nova parte W_1 e o segundo bloco livre total seria a nova parte W_2 . A parte W_1 seria selecionada para dar continuidade no processo de busca por possui mais *slots* livres que W_2 . Por fim, o método TBSA seleciona o bloco de *slots* livre representado pelo número 1 para o estabelecimento do novo circuito.

Os autores em (CHATTERJEE; FADINI; OKI, 2016) propõem um novo algoritmo de alocação de espectro baseado na combinação de FF, LF e EF (*FirstLastExactFit* (FLEF)). O objetivo da proposta é aumentar o número de *slots* disponíveis (contíguos e contínuos) e evitar pequenas quantidades de *slots* disponíveis contíguos que são gerados quando esses métodos são aplicados separadamente. O FLEF utiliza a definição de circuitos disjuntos e não disjuntos para decidir qual método de alocação de espectro vai ser aplicado. Circuitos disjuntos são circuitos que não possuem rotas com enlaces em comum entre si. Circuitos com rotas disjuntas são alocados usando o método *FirstExactFit* (FEF). Enquanto circuitos com rotas não disjuntas são alocados usando o método *LastExactFit* (LEF). Os autores apresentam uma heurística para a criação do grupo de circuitos disjuntos. No exemplo da Figura 13, se o novo circuito for classificado como não pertencente ao grupo de circuitos disjuntos, o bloco de *slots* livres selecionado é representado pelo número 4.

Em (CHATTERJEE; OKI, 2016), os autores propõem um algoritmo de alocação de espectro ciente dos efeitos de camada física. O método chamado de *Dispersion Adaptive First Last Fit* (DAFLF) busca alocar espectro reduzindo o efeito de dispersão. O método DAFLF utiliza um parâmetro chamado de ω para determinar se a alocação de espectro vai utilizar o FF ou o LF. Se a distância do circuito requisitado for maior ou igual ao valor de ω é aplicado o FF. Caso contrário é aplicado o LF. Depois de decidir qual método de alocação de espectro vai ser utilizado, o algoritmo busca o bloco de *slots* livres que acomoda a quantidade de *slots* requisitados e que possua QoT aceitável. Considerando que o ω seja igual a 1000 km para o cenário apresentado pela Figura 13, o DAFLF escolhe o bloco de *slots* livres representado pelo número 1.

O trabalho (YUAN et al., 2019) propõe um algoritmo de alocação de espectro para selecionar um bloco de espectro com a soma mínima da redução ponderada de recursos para

cada requisição de conexão. O algoritmo proposto é chamado de *Minimum Sum of Weighted Resource Reductions* (MSWRR). Os autores propõem um método para calcular a redução de recursos em um caminho após a alocação de um bloco de espectro, que pode refletir mudanças de continuidade e contiguidade no caminho ao mesmo tempo. Uma função de pesos é aplicada para amenizar a injustiça entre caminhos com diferentes números de saltos. Um dos pesos é aplicado pelo parâmetro δ ($0 < \delta < 1$), que é usado para ajustar o impacto de um bloco de espectro ocioso. O outro peso é aplicado pelo parâmetro η , que ajusta o impacto do comprimento do caminho. Se $\eta > 0$, a métrica será mais influenciada pelos caminhos mais longos; se $\eta < 0$, então os caminhos mais curtos têm mais efeito na métrica; finalmente, se $\eta = 0$, nenhuma medida de equilíbrio é adotada.

A complexidade computacional dos algoritmos de alocação de espectro FF, LF, BF, EF, RF, FLF, TBSA e DAFLF é igual a $O(|E| * |S|)$, em que E é o conjunto de enlaces da rede e S é o conjunto de *slots* em cada enlace da rede (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; CHATTERJEE; OKI, 2016; LIU et al., 2017). O algoritmo FLEF possui duas fases (CHATTERJEE; FADINI; OKI, 2016). Na primeira fase, o algoritmo cria o grupo de circuitos disjuntos. Essa primeira fase pode ser executada apenas uma vez se o conjunto de rotas para todos os pares já foi predeterminado. Assim, a complexidade computacional da primeira fase é igual a $O(|P| * |R|)$, em que P é o conjunto de pares de nós origem e destino da rede e R é o conjunto de rotas por par. Na segunda fase é verificado se o circuito em estabelecimento pertence ou não ao grupo de circuitos disjuntos e é aplicado o método apropriado como foi explicado na Seção 3.1.1. A complexidade computacional da segunda fase é igual a $O(|E| * |S|)$ (CHATTERJEE; FADINI; OKI, 2016).

A complexidade computacional total do algoritmo MSWRR não é maior que $O(|N|^2 * |K|^2 * |S| * ((|K| * |N|) + S_{max}))$, conforme mostrado em (YUAN et al., 2019). K é o conjunto de caminhos candidatos, N é o conjunto de nós na rede e S_{max} é o número máximo de *slots* necessários para uma solicitação de conexão.

4.2 ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo de alocação de espectro proposto é chamado de *Spectrum Assignment with Interference Minimization* (SAIM). O algoritmo SAIM busca alocar um bloco de *slots* livres que causa menor interferência na qualidade de transmissão dos outros circuitos já ativos na rede. O algoritmo SAIM utiliza um limiar de taxa de bits para decidir se uma requisição de

circuito deve ser estabelecida a partir dos *slots* livres com os menores índices (FF) ou com os maiores índices (LF). Com esse mecanismo o algoritmo SAIM busca evitar a fragmentação do espectro. O Algoritmo 4 apresenta o procedimento do algoritmo SAIM para decidir o bloco de *slots* livres para um novo circuito.

Algorithm 4 *Spectrum Assignment with Interference Minimization (SAIM)*

```

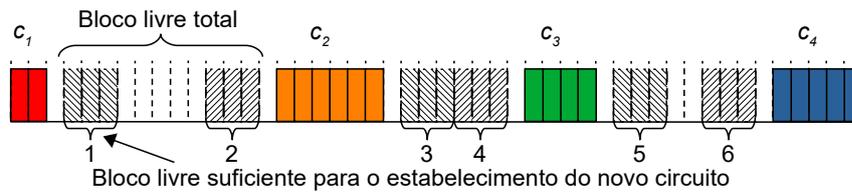
1: Input: Req {Requisição de um novo circuito}
2: Output: chosenBlock {Bloco de slots livres}
3:  $R \leftarrow routing(Req)$ 
4:  $ASB \leftarrow availableSlotBlocs(R)$  {Computa os blocos de slots livres respeitando as
   restrições de continuidade e contiguidade nos enlaces da rota  $R$ }
5: if  $Req.TR < bitrateThreshold$  then
6:    $ASB \leftarrow reverseOrder(ASB)$  {Para o LastFit}
7: end if
8:  $M \leftarrow selectModulation(Req)$ 
9:  $chosenBlock \leftarrow \emptyset$ 
10:  $minimumDeltaOSNR \leftarrow 0$ .
11: for  $b \in ASB$  do
12:   if  $b.size \geq M.quantityOfSlots(Req.TR)$  then
13:      $NC \leftarrow neighboringCircuits(R)$  {Circuitos que compartilham algum enlace
       com a rota  $R$ }
14:      $mdo \leftarrow \infty$ 
15:     for  $nc \in NC$  do
16:        $dOSNR \leftarrow deltaOSNR(nc, b)$  {Calcula a diferença entre o OSNR atual do
         circuito  $nc$  e o novo OSNR caso o o bloco  $b$  seja escolhido para  $Req$ }
17:       if  $dOSNR < mdo$  then
18:          $mdo \leftarrow dOSNR$  {Buscando o circuito mais frágil}
19:       end if
20:     end for
21:     if  $mdo > minimumDeltaOSNR$  then
22:        $minimumDeltaOSNR \leftarrow mdo$ 
23:        $chosenBlock \leftarrow b$ 
24:     end if
25:   end if
26: end for
27: return  $chosenBlock$ .

```

A Figura 14 ilustra a aplicação do algoritmo SAIM no mesmo cenário apresentado na Seção 3.1.1. Uma requisição de circuito (c_5) com taxa de bit de 40 Gbps e que precisa de três *slots* para ser estabelecida é considerada. Na Figura 14, os blocos de *slots* coloridos representam *slots* já ocupados por circuitos (c_i). Os blocos de *slots* livres (contíguos e contínuos) que são suficientes para acomodar o estabelecimento do novo circuito estão representadas por números. O limiar de taxa de bits utilizado pelo mecanismo de decisão de partição é 80 Gbps.

Ao aplicar o SAIM no cenário da Figura 14, ele procura pelo bloco de *slots* livres que

Figura 14 – Ilustração da aplicação do algoritmo SAIM.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

causa a menor interferência nos circuitos c_1 , c_2 , c_3 e c_4 . Se o algoritmo aplicar o método FF os blocos de *slots* livres serão avaliadas na seguinte ordem: 1, 2, 3, 4, 5 e 6. No caso do algoritmo aplicar o método LF os blocos de *slots* livres serão avaliadas na seguinte ordem: 6, 5, 4, 3, 2 e 1. Como a taxa de bits da nova requisição de circuito, c_5 , é inferior ao limiar de taxa de bits, o método LF será selecionado para ser aplicado nos blocos de *slots* livres (linha 6 do Algoritmo 4). Na linha 12 do Algoritmo 4, o algoritmo seleciona apenas os blocos de *slots* livres com um número de *slots* maior ou igual ao número de *slots* solicitado por c_5 .

Antes de abordar a próxima etapa, é importante notar que o plano de controle compreende um conjunto de protocolos responsáveis pelo provisionamento dinâmico dos circuitos (SÓCRATES-DANTAS et al., 2014). No caso deste trabalho, o plano de controle é responsável por aplicar os algoritmos de roteamento, seleção de modulação e alocação de espectro. Ele também armazena informações sobre a arquitetura da rede e seu estado atual.

Da linha 13 até a linha 18 do Algoritmo 4, o algoritmo SAIM solicita que o plano de controle retorne informações dos OSNRs dos circuitos ativos com rotas que tenham enlaces em comum com a rota em análise para o circuito que está sendo estabelecido. O plano de controle executa uma verificação de pré-estabelecimento do novo circuito c_5 . Para isso, o plano de controle usa um gráfico auxiliar com o estado atual da rede e simula o estabelecimento do circuito c_5 . Assim, o plano de controle pode retornar as informações dos OSNRs atualizados dos circuitos já ativos na rede para o algoritmo SAIM. Com essas informações, o algoritmo SAIM pode verificar o nível de interferência do novo circuito nos demais circuitos já ativos na rede.

A interferência é medida pelo valor de ΔOSNR dos circuitos ativos que possuem rotas com enlaces em comum com a rota em análise para estabelecer c_5 (linha 16 do Algoritmo 4). ΔOSNR representa a diferença entre o OSNR do circuito e o limiar de OSNR do formato de modulação usado pelo circuito. Valores baixos de ΔOSNR significam que esses circuitos são mais frágeis à interferência de outros circuitos. O bloco de *slots* livres que causa a menor

interferência nos outros circuitos é selecionado (*chosenBlock*) para estabelecer o novo circuito (linha 23). Pode acontecer que para alguns blocos o menor valor ΔOSNR seja negativo. Blocos com valores negativos de ΔOSNR significam que algum circuito ativo possui QoT inaceitável. Por esse motivo, a variável *minimumDeltaOSNR* é inicializada com valor zero para selecionar apenas o bloco com o menor valor positivo ΔOSNR . Ou seja, os blocos que levam a algum circuito ativo com QoT inaceitável não são selecionados.

Vale ressaltar que o objetivo do algoritmo SAIM é selecionar um bloco de *slots* livres levando em consideração seu impacto no desempenho dos circuitos já ativos na rede. O impacto no desempenho de outros circuitos ativos é medido pelo ΔOSNR deles. Por este motivo, o SAIM não leva em consideração o OSNR do novo circuito. O algoritmo SAIM deixa a responsabilidade de verificar a QoT do novo circuito para o algoritmo de seleção de formato de modulação. O Algoritmo 5 apresenta o procedimento de seleção do formato de modulação pela QoT utilizado nos estudos desta seção.

Algorithm 5 Seleção do formato de modulação pela QoT (Versão 2)

```

1: Input: Req {Requisição de um novo circuito}
2: Output: M {Modulação escolhida}
3:  $M \leftarrow \emptyset$ 
4:  $SM \leftarrow \text{sortedModulations}()$  {Lista de modulações ordenadas de maneira
   decrescente em função da eficiência espectral}
5: for  $m \in SM$  do
6:    $S \leftarrow \text{RMLSA}(Req, m)$  {Buscar uma solução RMLSA para Req considerando
   a modulação m}
7:   if  $S.\text{route} \neq \emptyset$  then
8:     if  $S.\text{spectrum} \neq \emptyset$  then
9:       if  $S.\text{OSNR} \geq m.\text{OSNR}_{th}$  then
10:         $M \leftarrow m$ 
11:        break
12:       end if
13:     end if
14:   end if
15: end for
16: return M

```

Uma rota e um bloco de *slots* livres devem ser definidos primeiro para só depois podermos calcular a QoT de um novo circuito. Por esta razão, na linha 6 do Algoritmo 5 é realizada uma busca por uma solução RMLSA. Sabendo uma rota e o bloco de *slots* livres que o novo circuito usará, seu QoT pode ser calculado.

A complexidade computacional do algoritmo SAIM é igual a $O(|S|*(|E|+|P|))$, em que P é o conjunto de pares de nós origem e destino. P está associado ao conjunto de circuitos ativos

que possuem rotas com enlaces em comum com a rota selecionada para o estabelecimento de um dado circuito. A estratégia aplicada pelo algoritmo SAIM para a seleção do bloco de *slots* livres contribui para o aumento do tempo de execução do algoritmo. Além disso, a complexidade computacional do algoritmo SAIM é maior do que os outros algoritmos de atribuição de espectro apresentados neste trabalho.

4.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Com o objetivo de comparar o desempenho do SAIM com outras propostas da literatura, foi realizado um estudo de avaliação de desempenho considerando as métricas: PBB e TMFE. Também são apresentados resultados com as componentes da PBB. O bloqueio ocorre devido à Fragmentação do espectro, AEL, QoTN e QoTO.

O algoritmo proposto SAIM foi comparado com os algoritmos BF, FF, EF, RF, FLF, FLEF, TBSA, *Adaptive First Last Fit* (AFLF) e MSWRR. Foi realizada uma modificação na implementação do algoritmo DAFLF e o renomeamos para AFLF. A modificação foi necessária porque o modelo da camada física adotado no trabalho que propõe o DAFLF é diferente do modelo da camada física que consideramos neste trabalho. O algoritmo AFLF é implementado conforme descrito no Algoritmo 1 em (CHATTERJEE; OKI, 2016). A única diferença é que o DAFLF verifica a dispersão da fibra da rota e o AFLF verifica se a QoT do novo circuito é aceitável. Isso pode ser observado na linha 13 do Algoritmo 6.

A comparação do algoritmo SAIM em relação aos demais algoritmos de alocação de espectro é uma das contribuições deste trabalho. Por esse motivo, para o roteamento e seleção do formato de modulação, foram adotados algoritmos comumente utilizados na literatura. No estudo de avaliação de desempenho, foi utilizado o roteamento fixo e o roteamento fixo alternativo. O roteamento fixo usa o algoritmo de menor caminho de *Dijkstra* (DJK) (DIJKSTRA, 1959), enquanto o roteamento fixo alternativo usa o algoritmo *k* menores caminhos de *Yen* (KSP) (YEN, 1971). Os algoritmos de roteamento computam as menores rotas pelo comprimento. A seleção do formato de modulação é realizada pelo Algoritmo 5. O problema RMLSA é resolvido sequencialmente ao considerar o roteamento fixo. Por outro lado, resolvemos o problema RMLSA de forma integrada ao considerar o roteamento fixo alternativo.

Em cada simulação, 100.000 requisições de circuitos foram geradas com sete níveis de granularidade de taxa de bits de informação: 100, 150, 200, 250, 300, 350 e 400 Gbps, com proporções 7:6:5:4:3:2:1, respectivamente. Para cada simulação, foram realizadas dez

Algorithm 6 Adaptive First Last Fit (AFLF)

```

1: Input: Req {Requisição de um novo circuito}
2: Output: chosenBlock {Bloco de slots livres}
3:  $R \leftarrow routing(Req)$ 
4:  $M \leftarrow selectModulation(Req)$ 
5:  $qs \leftarrow M.quantityOfSlots(Req.TR)$  {Quantidade necessária de slots para atender
   à requisição Req}
6:  $ASB \leftarrow availableSlotBlocs(R)$  {Computa os blocos de slots livres respeitando as
   restrições de continuidade e contiguidade nos enlaces da rota R}
7: if  $R.distance \leq \omega$  then
8:    $ASB \leftarrow reverseOrder(ASB)$  {Para o LastFit}
9: end if
10:  $chosenBlock \leftarrow \emptyset$ 
11: for  $b \in ASB$  do
12:   if  $b.size \geq M.quantityOfSlots(Req.TR)$  then
13:     if  $computeOSNR(R, M, b) \geq M.OSNR_{th}$  then
14:        $chosenBlock \leftarrow b$ 
15:       break
16:     end if
17:   end if
18: end for
19: return  $chosenBlock$ .

```

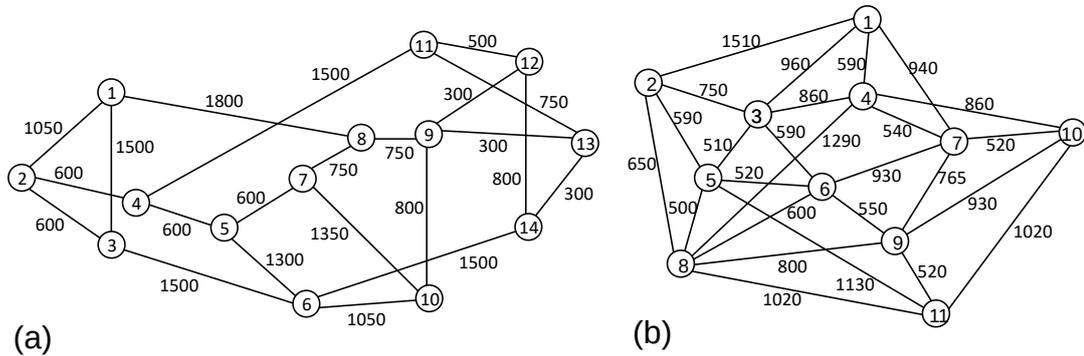
replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados são apresentados com estimativa pontual e estimativa intervalar considerando o nível de confiança de 95%, com uma margem de erro (ou erro máximo de estimativa) de 0,002.

Duas topologias reais, esboçadas na Figura 15, foram escolhidas para o estudo de avaliação de desempenho: NSFNet (National Science Foundation Network) e Cost239 (Pan-European Cost239 Network) (ZHAO et al., 2018). A topologia NSFNet possui 14 nós com conectividade média de 3,14 enlaces por nó e 22 enlaces com comprimento médio de 918,18 km. A topologia Cost239 possui 11 nós com conectividade média de 4,73 enlaces por nó e 26 enlaces com comprimento médio de 786,35 km.

Os formatos de modulação considerados neste estudo são BPSK, 4QAM, 8QAM, 16QAM e 32QAM. Seus respectivos limiares de *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) são 5,5, 8,5, 12,5, 15,1 e 18,1 dB (IVES; BAYVEL; SAVORY, 2015). Os limiares de SNR para os formatos de modulação foram calculados para atingir um BER pré-FEC de $4 \cdot 10^{-3}$ e inclui um *overhead* de 12% para FEC (IVES; BAYVEL; SAVORY, 2015). Ressaltamos que os valores de limite de OSNR são iguais aos valores de limite de SNR.

Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem largura de banda do espectro dividida em 320 *slots* de frequência. Cada *slot* de frequência tem uma largura de banda de

Figura 15 – Topologias consideradas neste trabalho: (a) NSFNet e (b) Cost239. O número em cada enlace corresponde ao comprimento do enlace em km.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

12,5 GHz e um *slot* é usado para banda de guarda. A perda de inserção causada pelo multiplexador, demultiplexador e switch é de 5 dB (BEHERA et al., 2019). Os valores de figura de ruído do amplificador de 6 dB e 4,5 dB foram usados para as topologias Cost239 e NSF-Net, respectivamente. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela 4 (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; JOHANNISSON; AGRELL, 2014; YAN et al., 2015). Vale destacar que o modelo de camada física considerado neste Capítulo é o EGN que foi discutido na Seção 2.5 e é apresentado em (POGGIOLINI; JIANG, 2017; Habibi; Beyranvand, 2019).

Tabela 4 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

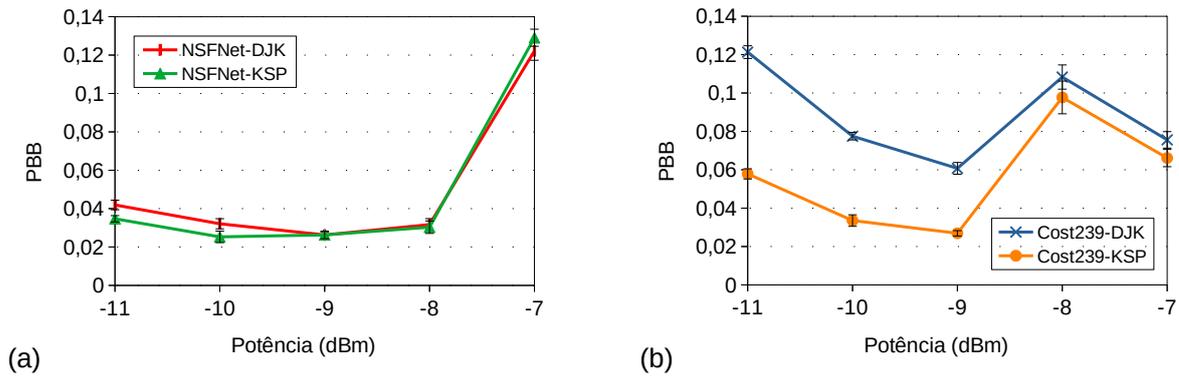
Descrição	Valor
Atenuação da fibra (α)	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra (D)	16 ps/(nm·km)
Coefficiente não linear da fibra (γ)	1,3 (Wkm) ⁻¹
Comprimento de um <i>span</i> (L_s)	80 km

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Foi utilizado o método *Constant Power Spectral Density* (CPSD) para a atribuição de potência por circuito, Capítulo 6.1. A Figura 16 apresenta os resultados para o estudo do nível de potência realizado com o algoritmo CPSD para as duas topologias considerando os dois algoritmos de roteamento e FF. Para realizar a busca da melhor densidade espectral de potência pelo algoritmo CPSD foi utilizada a maior potência igual a -7 dBm e a menor potência igual a -11 dBm, com incremento de 1 dB, Figura 16. Para encontrar a densidade espectral de potência foi, utilizada a largura de banda de referência igual à largura de banda de um *slot*.

Observa-se pela Figura 16 que a potência -9 dBm alcançou os melhores desempenhos,

Figura 16 – PBB como uma função da potência (dBm) para as topologias (a) NSFNet e (b) Cost239.

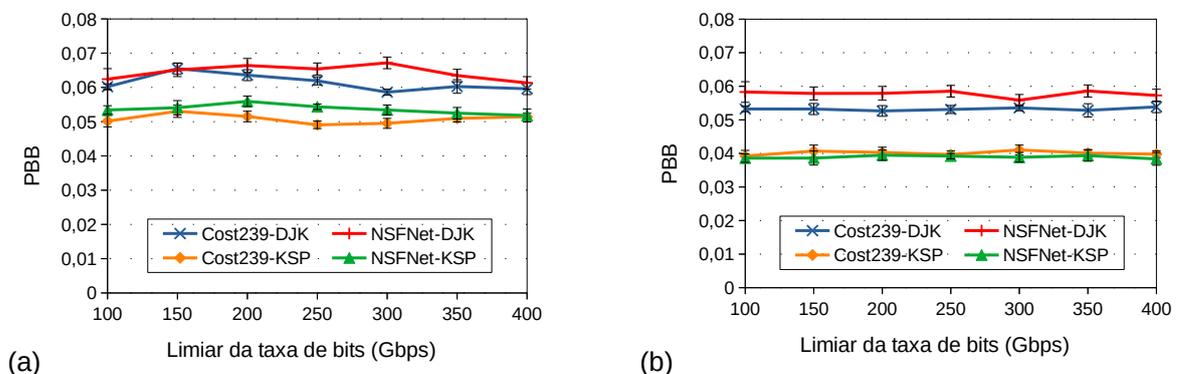


Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

principalmente na topologia Cost239 (Figura 16(b)). Nota-se que a PBB diminui da potência -8 dBm para a potência -7 dBm. Isto ocorre porque o algoritmo de seleção de modulação escolheu modulações que contribuíram para a redução da PBB quando os circuitos usavam a potência -7 dBm. A potência -9 dBm foi utilizada para a atribuição de potência por circuitos para as duas topologias nas simulações deste capítulo.

Foram realizados estudos para encontrar os melhores valores para os parâmetros usados nos mecanismos de decisão dos algoritmos FLF, SAIM, AFLF e MSWRR. A Figura 17 apresenta os resultados dos estudos realizados com os algoritmos FLF e SAIM, e a Figura 18 mostra os resultados dos estudos com os algoritmos AFLF e MSWRR. Na Figura 17, o PBB obtido com FLF e SAIM nas topologias Cost239 e NFSNet é apresentado como uma função do limiar de taxa de bits usado para a seleção da partição do espectro (explicado na Seção 3.1.1) considerando o roteamento fixo (DJK) e o roteamento alternativo fixo (KSP).

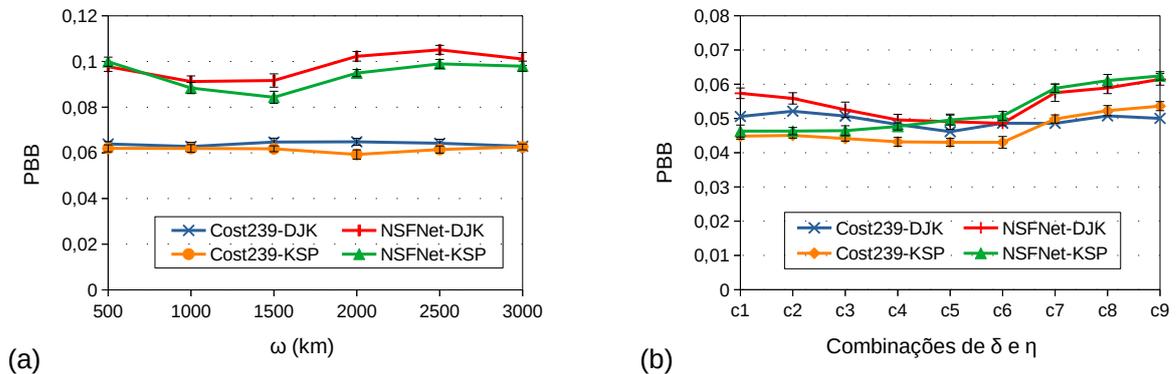
Figura 17 – PBB como uma função do limiar de taxa de bits para os algoritmos (a) FLF e (b) SAIM.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A Figura 17 mostra que o desempenho da PBB dos algoritmos FLF e SAIM não mudou

Figura 18 – (a) PBB como uma função do limiar de distância para o algoritmo AFLF e (b) PBB como uma função de diferentes combinações de δ e η para o algoritmo MSWRR.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

significativamente em função do limiar de taxa de bits usado para o mecanismo de seleção de partição. O limiar de taxa de bits selecionado para ser usado pelos algoritmos FLF e SAIM na comparação com os outros algoritmos foi o que levou a mínima PBB nas Figuras 17(a) e 17(b), respectivamente. A Figura 17(a) mostra que FLF apresenta o melhor desempenho de PBB na topologia Cost239 quando usa o limiar de taxa de bits de 300 Gbps para o mecanismo de seleção de partição, considerando DJK. Mas o FLF tem a menor PBB ao usar o limiar da taxa de bits de 250 Gbps ao considerar KSP. Na topologia NSFNet, o FLF tem o melhor desempenho de PBB quando o limiar da taxa de bits de 400 Gbps é usado para DJK e KSP.

Como já mencionado, o algoritmo SAIM mede a interferência entre os circuitos usando o valor ΔOSNR . Porém, nos cenários analisados neste trabalho, é incomum encontrar valores iguais para o ΔOSNR dos circuitos ao verificar diferentes blocos de *slots* livres. Como consequência, a BBP do algoritmo SAIM depende ligeiramente do limiar da taxa de bits. Os valores de 200 e 100 Gbps são considerados como o limiar da taxa de bits usado na topologia Cost239 para DJK e KSP, respectivamente. Na topologia NSFNet, os valores de 300 e 400 Gbps são considerados como limiares da taxa de bits para DJK e KSP, respectivamente.

A Figura 18(a) apresenta a PBB alcançada com AFLF em função de ω nas topologias Cost239 e NSFNet considerando DJK e KSP. Também mostra que o desempenho do AFLF depende do valor usado para ω . Da Figura 18(a), pode ser visto que o melhor desempenho de PBB do algoritmo AFLF na topologia Cost239 ocorre com ω igual a 1000 km para DJK e 2000 km para KSP. Na topologia NSFNet, o melhor desempenho de PBB é obtido com ω igual a 1000 km e 1500 km para DJK e KSP, respectivamente.

A Figura 18(b) apresenta a PBB como uma função de diferentes combinações de δ e η

para o algoritmo MSWRR. A tabela 5 mostra as combinações δ e η que foram consideradas. Escolhemos valores para δ de $\{0, 1, 0, 5, 0, 9\}$ e η de $\{-1, 0, 1\}$ (YUAN et al., 2019). Na topologia Cost239, as combinações $c5$ e $c6$ atingem a PBB mínima ao considerar DJK e KSP, respectivamente. Na topologia NSFNet, os resultados mostram que a PBB é mínima com as combinações $c6$ e $c1$ ao considerar DJK e KSP, respectivamente.

Tabela 5 – Diferentes combinações de δ e η que foram usadas pelo algoritmo MSWRR.

Combinações	δ	η
c1	0.1	-1
c2	0.1	0
c3	0.1	1
c4	0.5	-1
c5	0.5	0
c6	0.5	1
c7	0.9	-1
c8	0.9	0
c9	0.9	1

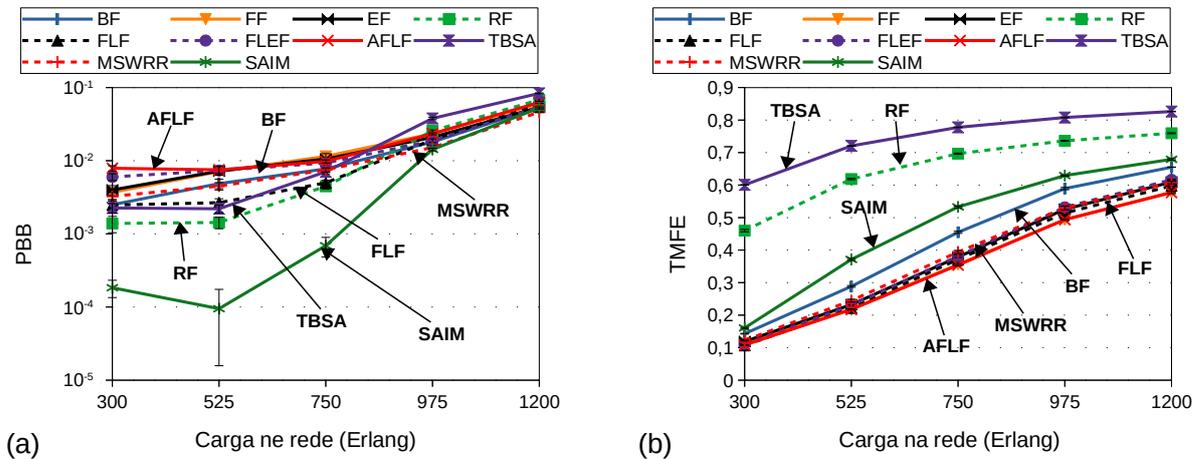
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A topologia Cost239 tem conectividade média mais alta do que a topologia NSFNet. Essa conectividade média mais alta permite mais rotas alternativas disponíveis na topologia Cost239. O maior número de rotas alternativas disponíveis na topologia Cost239 favorece a redução do bloqueio por fragmentação do espectro com o uso de roteamento fixo alternativo (KSP) em relação ao roteamento fixo (DJK).

As Figuras 19 e 20 apresentam a PBB e a TMFE obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia Cost239. As Figuras 21 e 22 são semelhantes às Figuras 19 e 20, respectivamente, mas para a topologia NSFNet. As Figuras 19 e 21 consideram o roteamento fixo (DJK) e as Figuras 20 e 22 consideram o roteamento fixo alternativo (KSP). As Figuras 19(a), 20(a), 21(a), e 22(a) mostram que o SAIM apresenta o melhor desempenho de PBB em relação aos outros algoritmos de atribuição de espectro para ambas as topologias e ambos os tipos de roteamento na maioria das cargas analisadas.

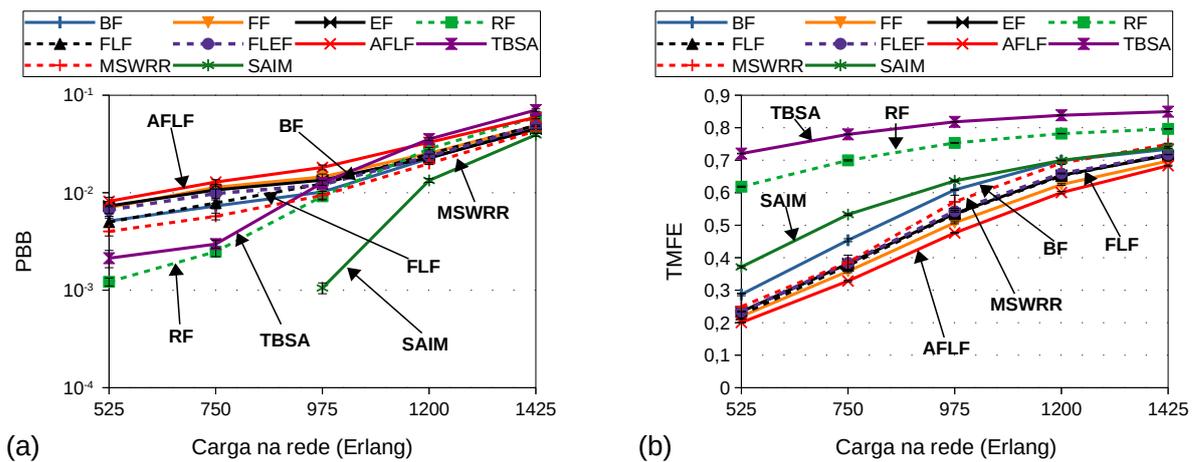
As Figuras 19(a), 20(a), 21(a) e 22(a) mostram que, entre os algoritmos que utilizam estratégias simples de alocação de espectro (BF, FF, EF e RF), o RF apresenta inicialmente o melhor desempenho de PBB para DJK e KSP nas duas topologias. No entanto, à medida que a carga aumenta, o RF eventualmente tem desempenho pior do que os algoritmos BF,

Figura 19 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Taxa média de fragmentação externa obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia Cost239 considerando DJK.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 20 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Taxa média de fragmentação externa obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia Cost239 considerando KSP.

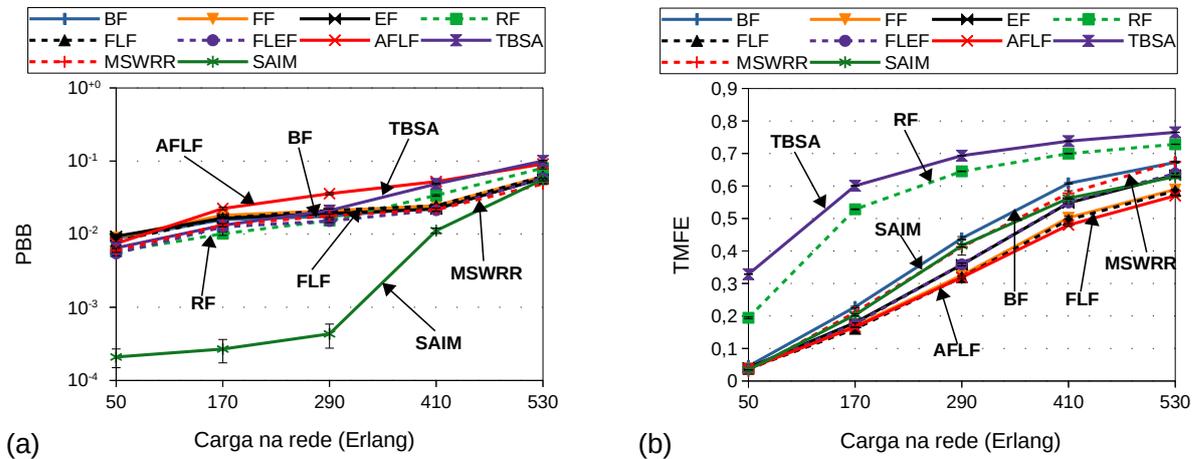


Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

FF e EF. Isto ocorre porque o RF espalha os circuitos nos blocos de espectro, gerando alto TMFE em comparação com os algoritmos BF, FF e EF (Figuras 19(b), 20(b), 21(b) e 22(b)). Isso contribui para a redução da interferência entre os circuitos e a geração de uma PBB menor nas primeiras cargas. Porém, a falta de recursos espectrais em cargas maiores prejudica a estratégia RF, gerando uma PBB maior.

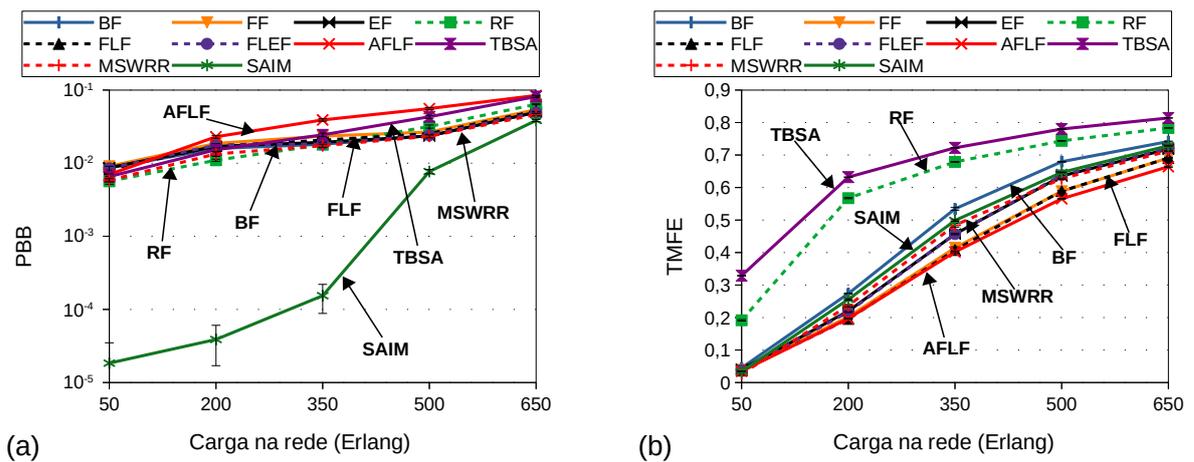
O algoritmo TBSA apresentou comportamento semelhante ao do RF. O algoritmo TBSA apresentou TMFE maior que BF, FF e EF e PBB menor que os algoritmos BF, FF e EF nas primeiras cargas. Semelhante ao RF, o TBSA também tem um desempenho pior em comparação com outros algoritmos para cargas maiores. Os algoritmos BF, FF, EF, FLF, FLEF,

Figura 21 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Taxa média de fragmentação externa obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia NSFNet considerando DJK.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 22 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Taxa média de fragmentação externa obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia NSFNet considerando KSP.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

AFLF e MSWRR alcançam a TMFE mais baixa em relação aos algoritmos RF e TBSA (Figuras 19(b), 20(b), 21(b) e 22(b)). Esses algoritmos alocam circuitos de uma forma mais densa no espectro, tornando a OSNR desses circuitos mais suscetível a interferências de outros circuitos. Circuitos frágeis em uma rede tendem a criar uma probabilidade maior de que novas requisições sejam bloqueadas por QoTo. Como o algoritmo SAIM busca minimizar a interferência entre os circuitos, ele atinge uma PBB mais baixa do que outros algoritmos na maioria das cargas analisadas.

A Tabela 6 mostra a redução mínima de PBB alcançada pelo algoritmo SAIM em relação aos outros algoritmos de alocação de espectro. A Tabela 6 mostra os menores valores de

redução do PBB considerando a faixa de cargas testadas para as topologias Cost239 e NSFNet, e para os dois tipos de roteamento. Os dois valores negativos na Tabela 6 significam que o algoritmo SAIM apresentou pior desempenho em termos de PBB em relação ao algoritmo MSWRR na última carga analisada para as topologias Cost239 e NSFNet considerando DJK. Para as outras cargas analisadas, o algoritmo SAIM atinge uma redução de PBB que excede 6% na topologia Cost239 e 48% na topologia NSFNet considerando DJK quando comparado ao algoritmo MSWRR. Considerando KSP, o algoritmo SAIM atinge uma redução de PBB que excede 9% na topologia Cost239 e 17% na topologia NSFNet quando comparado ao algoritmo MSWRR.

Tabela 6 – Redução mínima em PBB alcançada pelo algoritmo SAIM em relação aos outros algoritmos considerando todas as cargas testadas.

Topologia	Roteamento	BF	FF	EF	RF	FLF	FLEF	AFLF	TBSA	MSWRR
Cost239	DJK	3%	13%	2%	23%	10%	3%	16%	37%	-14%
	KSP	18%	19%	13%	34%	20%	19%	34%	44%	9%
NSFNet	DJK	2%	9%	5%	30%	9%	5%	39%	44%	-15%
	KSP	23%	29%	23%	40%	26%	22%	55%	53%	17%

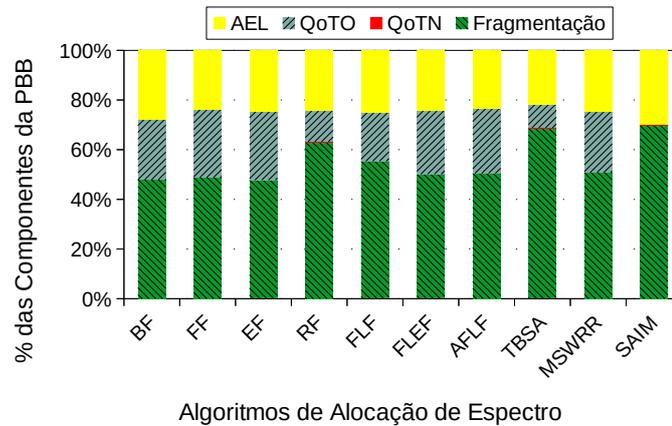
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Comparando com outros algoritmos (sem MSWRR), pode ser visto na Tabela 6 que, na topologia Cost239, o algoritmo SAIM usando DJK atinge uma redução de PBB que excede 2% e, usando KSP, a redução excede 13%. Ainda considerando os outros oito algoritmos (sem MSWRR), na topologia NSFNet, a redução de PBB alcançada por SAIM usando DJK é superior a 2%, e usando KSP a redução é superior a 22%.

Pode-se observar na Tabela 6 que os maiores valores entre as reduções mínimas em PBB alcançadas pelo algoritmo SAIM em relação aos demais algoritmos na topologia Cost239 foram 37% usando DJK e 44% usando KSP. Na topologia NSFNet, os maiores valores entre as reduções mínimas em PBB alcançadas pelo algoritmo SAIM foram 44% para DJK e 55% para KSP.

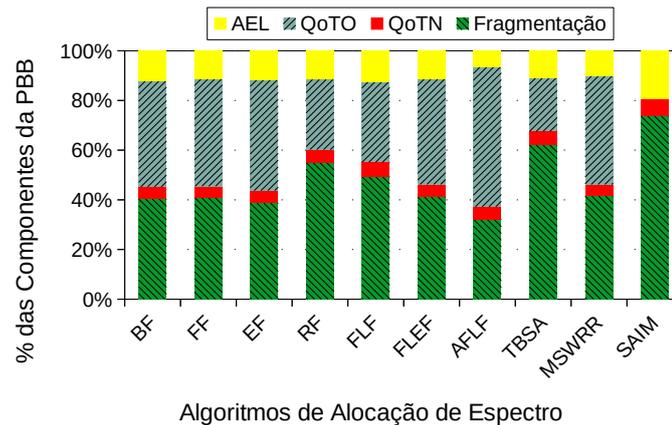
As Figuras 23, 24, 25 e 26 apresentam as percentagens das componentes da PBB obtidos com os algoritmos de alocação de espectro para as topologias Cost239 e NSFNet na carga mais alta analisada. As Figuras 23 e 25 apresentam os resultados para roteamento fixo (DJK) e as Figuras 24 e 26 para roteamento fixo alternativo (KSP). As Figuras 23, 24, 25 e 26 mostram que as componentes que mais impactam o desempenho da PBB dos algoritmos BF, FF, EF, RF, FLF, FLEF, AFLF, TBSA e MSWRR são a Fragmentação e QoTO nas duas topologias e para os dois tipos de roteamento.

Figura 23 – Percentagens das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia Cost239 na carga de 1200 Erlangs para DJK.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 24 – Percentagens das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia Cost239 na carga de 1425 Erlangs para KSP.

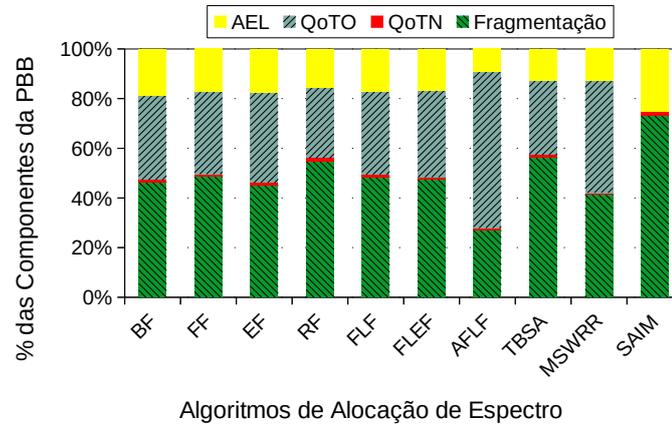


Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

As Figuras 23, 24, 25 e 26 mostram que o algoritmo SAIM consegue reduzir a interferência entre circuitos e, como resultado, consegue reduzir o bloqueio por QoTO. A componente que mais afeta o desempenho do algoritmo SAIM na topologia Cost239 é a Fragmentação do espectro, para ambos os tipos de roteamento. Na topologia NSFNet, semelhante à topologia Cost239, o componente que mais afeta o desempenho do algoritmo SAIM é a Fragmentação do espectro, para ambos os tipos de roteamento.

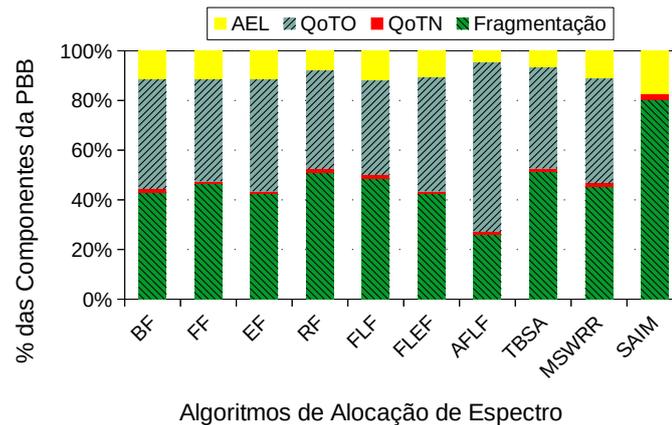
O algoritmo SAIM alcança uma redução maior na PBB em comparação aos outros algoritmos ao usar KSP (ver a Tabela 6). O algoritmo SAIM atinge maior justiça no atendimento de diferentes requisições de taxas de bits em comparação com outros algoritmos de alocação de espectro. O algoritmo SAIM atinge um desempenho ainda melhor em termos de PBB

Figura 25 – Percentagens das componentes da PBB obtidos pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia NSFNet na carga de 530 Erlangs para DJK.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 26 – Percentagens das componentes da PBB obtidos pelos algoritmos de alocação de espectro para a topologia NSFNet na carga de 650 Erlangs para KSP.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

em comparação com outros algoritmos de alocação de espectro quando usado junto com o roteamento fixo alternativo (KSP).

Como pode ser visto nos resultados mostrados nas Figuras 23, 24, 25 e 26, a estratégia adotada pelo algoritmo SAIM contribui para a redução dos bloqueios do tipo QoTO em comparação aos demais algoritmos para ambas as topologias e ambos os tipos de roteamento. Isso indica que o algoritmo SAIM estabelece circuitos mais resistentes à interferência de outros circuitos, o que contribui para uma redução considerável da probabilidade de bloqueio geral do algoritmo SAIM. Além disso, o SAIM atinge o melhor desempenho PBB em relação aos outros algoritmos na maioria das cargas analisadas.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou o algoritmo SAIM, que realiza a alocação de espectro considerando imperfeições de camada física em redes ópticas elásticas. O objetivo do algoritmo SAIM é selecionar blocos de espectro livre que causem menor interferências nos outros circuitos já ativos na rede. Foi realizado um estudo de avaliação de desempenho comparado o algoritmo SAIM com os algoritmos BF, FF, EF, RF, FLF, FLEF, TBSA, AFLF e MSWRR. O algoritmo AFLF também é um algoritmo de alocação de espectro ciente dos efeitos de camada física. Os algoritmos foram comparados considerando as métricas de PBB e TMFE nas topologias Cost239 e NSFNet. Os algoritmos ainda foram comparados com dois tipos de roteamentos: fixo (DJK) e fixo alternativo (KSP).

Os resultados do estudo de avaliação de desempenho mostraram que o algoritmo SAIM apresentou o melhor desempenho em termos de PBB em comparação aos outros algoritmos nas topologias Cost239 e NSFNet considerando os roteamentos DJK e KSP nas maioria das cargas analisadas. Na faixa de cargas testadas, na topologia Cost239, o algoritmo SAIM atinge uma redução de PBB que varia entre 2% e 37% usando DJK, e entre 9% e 44% usando KSP. Na topologia NSFNet, a redução de PBB alcançada pelo algoritmo SAIM varia entre 2% e 44% para DJK, e entre 17% e 55% para roteamento KSP.

A estratégia SAIM não gera alto TMFE e consegue reduzir os bloqueios do tipo QoTO em comparação aos outros algoritmos. Isso contribui para o melhor desempenho da PBB do algoritmo proposto em relação aos outros algoritmos na maioria das cargas analisadas.

O próximo capítulo apresenta a proposta de um novo algoritmo de proteção dedicada ciente de imperfeições de camada física e de consumo de energia para redes ópticas elásticas.

5 PROPOSTA DE ALGORITMO DE PROTEÇÃO DEDICADA CIENTE DE CONSUMO DE ENERGIA

Neste Capítulo são apresentados os estudos referentes aos algoritmos de proteção em redes ópticas elásticas. Na Seção 5.1 são apresentados os trabalhos relacionados. O algoritmo proposto é apresentado na Seção 5.2. Uma avaliação de desempenho comparando o algoritmo proposto com outros trabalhos da literatura é apresentada na Seção 5.3. Por fim, as considerações finais deste Capítulo são apresentadas na Seção 5.4.

5.1 TRABALHOS RELACIONADOS

A *Dedicated Path Protection* (DPP) é a estratégia clássica de proteção de caminho dedicado (SHEN; GUO; BOSE, 2016). Nesta estratégia, uma rota de *backup*, totalmente disjunta à rota de trabalho, é alocada para garantir disponibilidade mesmo após uma falha na rede. Como a rota de *backup* é totalmente disjunta em relação a rota de trabalho, a DPP garante 100% de sobrevivência em caso de falha simples de enlace. No âmbito desta Tese, o algoritmo DPP utiliza o Algoritmo 2 para a seleção de formato de modulação e escolhe o primeiro par de rotas trabalho e *backup* que conseguir estabelecer o circuito.

Os autores em (VIZCAÍNO et al., 2014) trabalham com proteção dedicada e proteção compartilhada. A solução RMLSA proposta em (VIZCAÍNO et al., 2014) trabalha com k rotas candidatas e utilizam a Equação 2.13, apresentada na Seção 2.3, para mensurar o consumo de energia da rota de trabalho e da rota de *backup*. Assim, eles buscam selecionar o conjunto de rota de trabalho e rota de *backup* que consome menos energia.

Os autores em (REN et al., 2016) propõem algoritmos RMLSA junto com a proteção dedicada e proteção compartilhada. Os algoritmos RMLSA propostos em (REN et al., 2016) buscam fazer um *trade-off* entre consumo de energia e fragmentação do espectro no momento da seleção do formato de modulação.

Buscando adequar os trabalhos relacionados ao cenário de avaliação desta tese, algumas adaptações tiveram que ser feitas. Neste contexto, as seguintes estratégias foram criadas mesclando características dos trabalhos apresentados em (VIZCAÍNO et al., 2014; REN et al., 2016; BEYRANVAND; SALEHI, 2013):

- O *Energy Efficiency Routing Dedicated Path Protection* (EERDPP): esse algoritmo também utiliza o Algoritmo 2 para a seleção de formato de modulação, porém escolhe

- o par de rotas trabalho e *backup* com o menor consumo de energia (VIZCAÍNO et al., 2014);
- O *Energy Efficiency Routing and Modulation Dedicated Path Protection* (EERMDPP): utiliza o Algoritmo 3 para a seleção de formato de modulação e seleciona o par de rotas trabalho e *backup* com o menor consumo de energia (VIZCAÍNO et al., 2014; REN et al., 2016);
 - O *Best OSNR Dedicated Path Protection* (BOSNRDPP): O algoritmo BOSNRDPP usa o Algoritmo 3 para a seleção de formato de modulação e escolhe o par de rotas trabalho e *backup* com o maior valor de OSNR (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; REN et al., 2016).

5.2 ALGORITMO PROPOSTO

Este Capítulo apresenta um novo algoritmo de proteção dedicada chamado de *Energy Aware Modulation Dedicated Path Protection* (EAMDPP). O algoritmo EAMDPP busca estabelecer circuitos na rota de trabalho e na rota de *backup* mais resistentes a interferências de outros circuitos e que consomem menos energia. O Algoritmo 7 apresenta o funcionamento do EAMDPP.

Logo após a chegada de uma requisição de conexão, o algoritmo EAMDPP computa k rotas candidatas para as rotas de trabalho (Linha 6 do Algoritmo 7). O passo seguinte é selecionar um formato de modulação para cada rota candidata. Para encontrar o formato de modulação adequado é chamado o Algoritmo 8, linha 8 do Algoritmo 7. Depois de selecionar um formato de modulação é aplicado o algoritmo de alocação de espectro. Em seguida é verificado se foi selecionada uma modulação e se é possível alocar espectro. Se esses critérios não forem atendidos, o algoritmo tenta verificar a próxima rota candidata. Caso contrário, o algoritmo vai buscar por uma rota de *backup* para a rota candidata em análise.

Na linha 11 do Algoritmo 7 é computada uma rota disjunta da rota de trabalho (rota candidata em análise) para ser usada como rota de *backup*. Se for possível encontrar uma rota disjunta (*backup*) da rota de trabalho, é aplicado novamente o Algoritmo 8 para selecionar um formato de modulação para a rota de *backup*. Em seguida é aplicado o algoritmo de alocação de espectro na rota de *backup*. Se foi selecionada uma modulação e existe espectro livre na rota de *backup*, verifica se a QoT do circuito está aceitável na rota de trabalho e na rota de *backup*. QoT está aceitável significa que a OSNR alcançada pelo circuito está acima ou igual

Algorithm 7 *Energy Aware Modulation Dedicated Path Protection (EAMDPP)*

```

1: Input:  $Req$  {Requisição de um novo circuito}
2: Output:  $R_{main}, R_{backup}$  {Rota de trabalho e rota de backup}
3:  $R_{main} \leftarrow \emptyset$ 
4:  $R_{backup} \leftarrow \emptyset$ 
5:  $lowestPC \leftarrow \infty$  {Para buscar pelo menor consumo de energia}
6:  $mainCandidates \leftarrow KSP(Req)$  {Computa  $k$  menores rotas}
7: for  $r \in mainCandidates$  do
8:    $m \leftarrow EAMDPPMod(r, Req)$ 
9:    $b \leftarrow SpectrumAllocation(r, m.quantityOfSlots(Req.TR))$  {O algoritmo de
    alocação de espectro busca um bloco de slots}
10:  if  $m \neq \emptyset$  and  $b \neq \emptyset$  then
11:     $r_d \leftarrow disjointRoute(r)$ 
12:    if  $r_d \neq \emptyset$  then
13:       $m_d \leftarrow EAMDPPMod(r_d, Req)$ 
14:       $b_d \leftarrow SpectrumAllocation(r_d, m_d.quantityOfSlots(Req.TR))$ 
15:      if  $m_d \neq \emptyset$  and  $b_d \neq \emptyset$  then
16:        if  $acceptableQoT(r, m, b)$  and  $acceptableQoT(r_d, m_d, b_d)$  then
17:          {QoT aceitável para a rota principal ( $r$ ) e a rota disjunta ( $r_d$ )}
18:           $pc \leftarrow computePC(r, m, b)$  {Computa o consumo de energia}
19:           $pc_d \leftarrow computePC(r_d, m_d, b_d)$ 
20:           $pc_t \leftarrow pc + pc_d$ 
21:          if  $pc_t < lowestPC$  then
22:             $lowestPC \leftarrow pc_t$ 
23:             $R_{main} \leftarrow r$ 
24:             $R_{backup} \leftarrow r_d$ 
25:          end if
26:        end if
27:      end if
28:    end if
29:  end if
30: end for
31: return  $R_{main}, R_{backup}$ 

```

ao limiar de OSNR do formato de modulação selecionado. O limiar de OSNR caracteriza o limite mínimo de OSNR tolerado pelo receptor.

Se a QoT não estiver aceitável para as rotas de trabalho e *backup*, o algoritmo tenta encontrar outro par de rotas de trabalho e *backup*. No caso da QoT estar aceitável, o algoritmo computa a soma do consumo de energia das duas rotas e busca encontrar o par de rotas de trabalho e *backup* com o menor consumo de energia. Os passos seguintes do Algoritmo 7 são para selecionar uma rota de trabalho e uma rota de *backup* com o menor consumo de energia. Se o algoritmo não conseguir encontrar uma rota de *backup* para ao menos uma rota candidata ou não conseguir estabelecer ao menos um par de rotas de trabalho e *backup*, a

Algorithm 8 EAMDPMod.

```

1: Input:  $R, Req$  {Rota e requisição para o novo circuito}
2: Output:  $M$  {Modulação escolhida}
3:  $M \leftarrow \emptyset$ 
4:  $M_{aux} \leftarrow \emptyset$ 
5:  $L \leftarrow 0$ 
6:  $lowerCE \leftarrow 0$ 
7:  $quantityOfSlots \leftarrow \infty$ 
8:  $SM \leftarrow sortedModulations()$  {Lista de modulações ordenadas de maneira crescente
em função da eficiência espectral}
9: for  $m \in SM$  do
10:    $qs \leftarrow m.quantityOfSlots(Req.TR)$ 
11:    $b \leftarrow SpectrumAllocation(R, m.quantityOfSlots(Req.TR))$ 
12:   if  $b \neq \emptyset$  then
13:     if  $acceptableQoT(R, m, b)$  then
14:        $\Delta OSNR \leftarrow computeOSNR(R, m, b) - m.OSNR_{th}$ 
15:        $ce \leftarrow computePC(R, m, b)$ 
16:       if  $\Delta OSNR \geq \sigma$  then
17:         if  $qs < quantityOfSlots$  then
18:            $quantityOfSlots \leftarrow qs$ 
19:            $lowerCE \leftarrow ce$ 
20:            $M \leftarrow m$ 
21:         else if  $qs = quantityOfSlots$  and  $ce < lowerCE$  then
22:            $lowerCE \leftarrow ce$ 
23:            $M \leftarrow m$ 
24:         end if
25:       end if
26:       if  $L < m.Level$  then
27:          $M_{aux} \leftarrow m$ 
28:          $L \leftarrow m.Level$ 
29:       end if
30:     end if
31:   end if
32: end for
33: if  $M = \emptyset$  then
34:    $M \leftarrow M_{aux}$ 
35: end if
36: return  $M$ 

```

requisição é bloqueada.

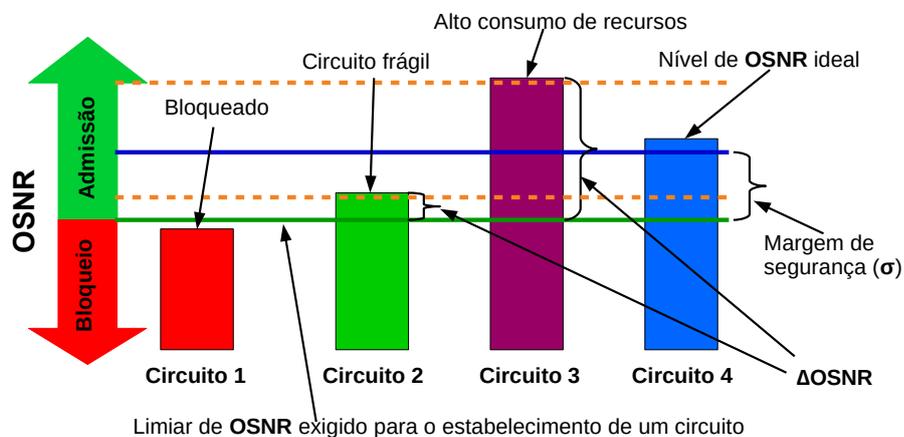
No Algoritmo 8, os formatos de modulação são ordenados de maneira crescente em eficiência espectral. Depois de selecionar um formato de modulação é aplicado o algoritmo de alocação de espectro. Logo em seguida é verificado se é possível alocar espectro e se a QoT do circuito está aceitável. Se for a QoT do circuito está aceitável com o formato de modulação escolhido, então é calculado o $\Delta OSNR$ e o consumo de energia do circuito (linhas 14 e 15,

respectivamente). Depois é verificado se o ΔOSNR é maior ou igual ao valor de σ . O ΔOSNR representa a diferença entre o OSNR atual do circuito e o limiar de OSNR do formato de modulação utilizado pelo circuito.

Os passos seguintes do Algoritmo 8 são em busca do formato de modulação que necessita de menos *slots* para estabelecer o novo circuito e que possua o menor consumo de energia, respeitando o valor do σ . Caso contrário, o algoritmo escolherá o formato de modulação com a maior eficiência espectral possível. A fase de seleção de formato de modulação é realizada até que todos os formatos de modulação disponíveis sejam avaliados.

O σ representa uma margem de segurança para a seleção de um formato de modulação. A escolha de um valor para σ deve ser feita durante a fase de planejamento da rede ou durante uma alteração da configuração da rede. O valor ideal para o σ tem como objetivo estabelecer circuitos mais resistentes às degradações causadas pelo estabelecimento de novos circuitos e deve ser escolhido de maneira a reduzir a probabilidade de bloqueio geral. A Figura 27 apresenta a importância de selecionar com ponderação um valor para a margem de segurança (σ).

Figura 27 – A importância de selecionar com ponderação um valor para a margem de segurança (σ).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Observa-se na Figura 27 que, se o valor para o σ for muito pequeno, o circuito estabelecido pode ser frágil a interferências de outros circuitos (Circuito 2). E o estabelecimento de novos circuitos que afetem significativamente um circuito frágil pode deixar o seu OSNR abaixo do limiar de OSNR exigido para o estabelecimento de um circuito (Circuito 1). No entanto, não se deve escolher um valor muito grande para o σ , pois o circuito pode consumir muitos recursos (espectro) para ser estabelecido (Circuito 3). Isso pode fazer o circuito sofrer um bloqueio por fragmentação ou falta de recursos livres. Assim, o ideal é buscar por um valor de σ que

torne o circuito resistente a interferências de outros circuitos e não consuma muitos recursos da rede (Circuito 4).

Como o algoritmo EAMDPP busca a criação de um novo circuito para a rota de trabalho e um novo circuito para a rota de *backup*, a complexidade computacional da criação do novo circuito para a rota de trabalho é igual para a rota de *backup*. O algoritmo avalia a possibilidade de criação de um novo circuito para o conjunto de rotas candidatas K , para o conjunto de modulações M , conjuntos de enlaces das rotas candidatas E e o conjunto de *slots* em cada enlace S . Portanto a complexidade de pior caso do algoritmo EAMDPP, considerando as rotas de trabalho e *backup*, é igual a $O(|K| * |M| * |E| * |S|)$.

5.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Com o objetivo de comparar o desempenho do algoritmo proposto (EAMDPP) com outras propostas da literatura, foi realizado um estudo de avaliação de desempenho considerando as métricas: PBB e EEE. Também são apresentados resultados com as componentes da PBB. O algoritmo EAMDPP foi comparado com os algoritmos DPP, EERDPP, EERMDPP e BOSNRDPP. Todos os algoritmos utilizam o mesmo método para computar as rotas de trabalho e *backup* do algoritmo EAMDPP e também utilizaram o FF para a alocação de espectro.

Em cada simulação, 100.000 requisições de circuitos foram geradas com sete níveis de granularidade de taxa de bits de informação: 100, 150, 200, 250, 300, 350 e 400 Gbps, com proporções 7:6:5:4:3:2:1, respectivamente. Foram utilizadas as topologias NSFNet e Cost239 (Figura 15). Para cada simulação, foram realizadas cinco replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados são apresentados com estimativa pontual e estimativa intervalar considerando o nível de confiança de 95%, com uma margem de erro (ou erro máximo de estimativa) de 0,002.

Os formatos de modulação considerados neste estudo foram BPSK, 4QAM, 8QAM, 16QAM e 32QAM e os seus respectivos limiares de OSNR são 5,5 dB, 8,5 dB, 12,5 dB, 15,1 dB e 18,1 dB (IVES; BAYVEL; SAVORY, 2015). Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem largura de banda do espectro dividida em 320 *slots* de frequência. Um *slot* de frequência possui largura de banda de 12,5 GHz. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela 7.

Foi utilizado o método CPSD para a atribuição de potência por circuito, Capítulo 6.1. A

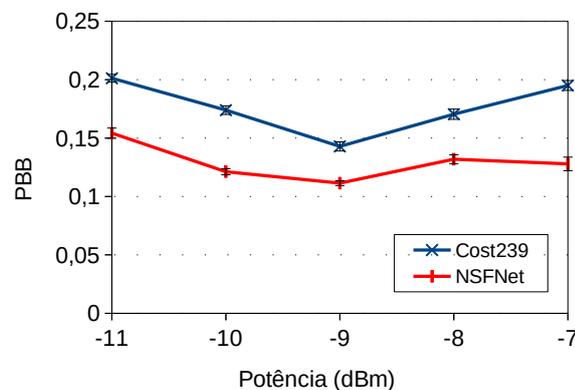
Tabela 7 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

Descrição	Valor
Atenuação da fibra (α)	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra (D)	16 ps/(nm·km)
Coefficiente não linear da fibra (γ)	1,3 (Wkm) ⁻¹
Tamanho de um <i>span</i> (L_s)	80 km
Figura de ruído do amplificador (NF)	6 dB

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 28 apresenta os resultados para o estudo do nível de potência realizado com o algoritmo CPSD para as duas topologias considerando o algoritmo DPP. Para realizar a busca da melhor densidade espectral de potência pelo algoritmo CPSD foi utilizada a maior potência igual a -7 dBm e a menor potência igual a -11 dBm, com intervalos de 1 dB, Figura 28. Para encontrar a densidade espectral de potência foi utilizada a largura de banda de referência igual à largura de banda de um *slot*. Observa-se pela Figura 28 que a potência -9 dBm alcançou os melhores desempenhos. A potência -9 dBm foi utilizada para a atribuição de potência por circuitos para as duas topologias nas simulações deste capítulo.

Figura 28 – PBB como uma função da potência para as topologias NSFNet e Cost239.

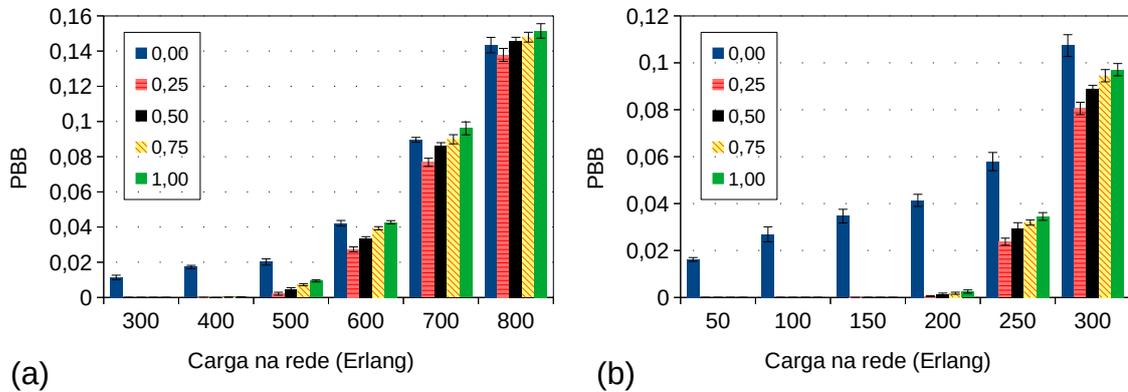


Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Um estudo foi realizado para encontrar o melhor valor de σ para ser utilizado pelo algoritmo EAMDPP nas topologias Cost239 e NSFNet. A Figura 29 apresenta a probabilidade de bloqueio de banda em função da carga na rede para cinco valores de σ nas topologias Cost239 e NSFNet. Observa-se pela Figura 29 que o σ com valor 0 (zero) apresentou o pior desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda. Foi adotado o σ com valor igual a 0,25 para realizar a comparação do algoritmo EAMDPP com os outros algoritmos, visto que ele apresenta um

bom desempenho em todos os pontos de carga em ambas as topologias.

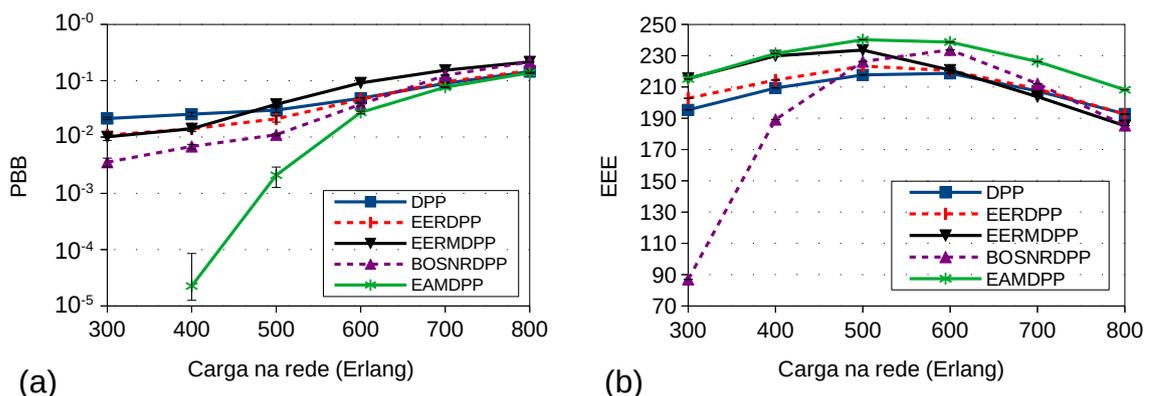
Figura 29 – PBB para cinco valores de σ nas topologias (a) Cost239 e (b) NSFNet.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

As Figuras 30 e 31 exibem a probabilidade de bloqueio de banda e eficiência energética efetiva produzidas pelos algoritmos de proteção dedicada para as topologias Cost239 e NSFNet, respectivamente. Observa-se pelas Figuras 30(a) e 31(a) que o algoritmo EAMDPP apresentou o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda em comparação aos outros algoritmos em ambas as topologias. O algoritmo EAMDPP também apresentou o melhor desempenho em termos de eficiência energética efetiva, Figuras 30(b) e 31(b).

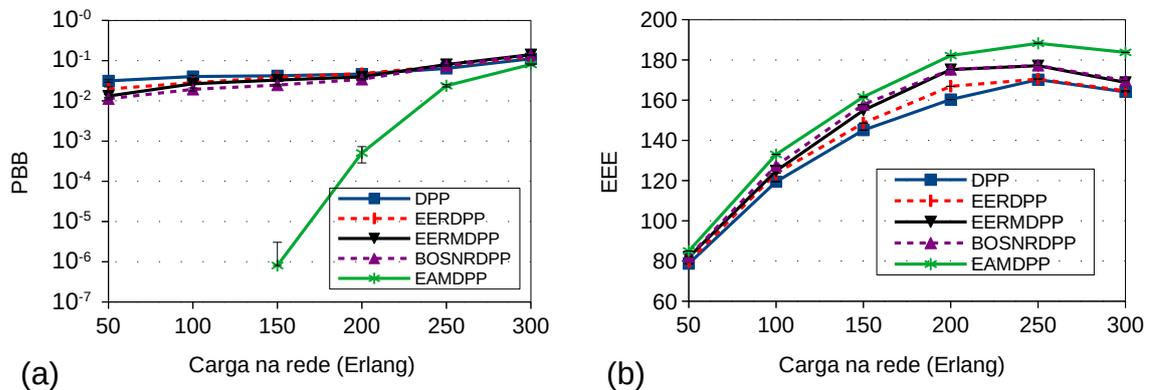
Figura 30 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Eficiência energética efetiva para a topologia Cost239.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

No cenário em que os algoritmos aplicam a estratégia de proteção de caminho dedicada, os recursos espectrais são consumidos rapidamente. Isto ocorre porque os algoritmos precisam alocar recursos para duas rotas ao mesmo tempo para cada requisição. É possível observar pelas Figuras 30(a) e 31(a) que o algoritmo DPP apresenta o pior desempenho nas cargas iniciais.

Figura 31 – (a) Probabilidade de bloqueio de banda e (b) Eficiência energética efetiva para a topologia NSF-Net.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A estratégia do algoritmo DPP busca selecionar as menores rotas de trabalho e *backup*, e as modulações mais eficientes espectralmente. Porém nas últimas cargas os outros algoritmos apresentam um desempenho inferior ao DPP em termos de PBB.

A estratégia de selecionar a rota de trabalho e a rota de *backup* com o menor consumo de energia adotada pelo algoritmo EERMDPP apresentou um dos piores desempenho em termos de PBB nas últimas cargas. Isto ocorre porque o algoritmo EERMDPP não se preocupa com o consumo de recursos espectrais, apenas busca por um menor consumo de energia. Este comportamento também aconteceu com os algoritmos EERDPP e BOSNRDPP.

A estratégia de seleção de formato de modulação utilizada pelo algoritmo EAMDPP contribui para o seu melhor desempenho em termos de PBB e EEE em relação aos outros algoritmos. O algoritmo EAMDPP procura selecionar modulações que consomem menos energia e que não necessitam de muitos *slots* para o estabelecimento dos circuitos. Dessa forma, o EAMDPP evita consumir muitos recursos espectrais.

A Tabela 8 mostra a redução na probabilidade de bloqueio de banda alcançada pelo algoritmo EAMDPP em relação aos demais algoritmos de proteção dedicada. Os valores de redução na probabilidade de bloqueio de banda exibidos na Tabela 8 correspondem ao menor valor obtido para todas as cargas testadas em ambas as topologias. Isto significa que em alguns pontos de carga o EAMDPP apresenta redução de probabilidade de bloqueio de banda ainda maior (apresentou uma redução máxima de 100% nas duas topologias).

Observa-se pela Tabela 8 que o algoritmo EAMDPP alcança uma redução na probabilidade de bloqueio de banda de pelo menos 5% na topologia Cost239 e 28% na topologia NSFNet. Os maiores valores entre as reduções mínimas em BBP alcançadas pelo algoritmo EAMDPP

Tabela 8 – Redução mínima na PBB alcançada pelo algoritmo EAMDPP em relação à PBB dos outros algoritmos para todas as cartas testadas.

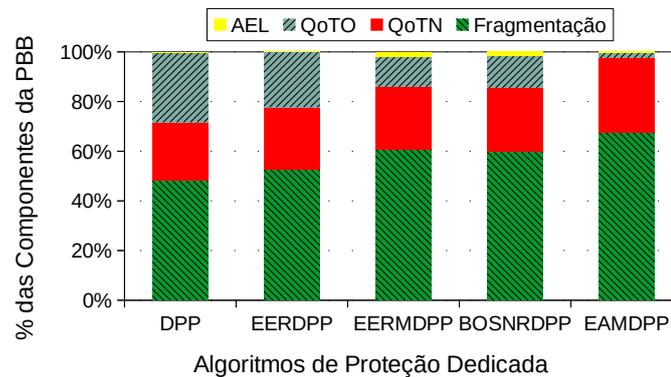
Topologia	DPP	EERDPP	EERMDPP	BOSNRDPP
Cost239	5%	8%	36%	36%
NSFNet	28%	37%	43%	41%

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

em relação aos demais algoritmos na topologia Cost239 foi de 36% e na topologia NSFNet foi de 43%.

As Figuras 32 e 33 exibem as porcentagens componentes da PBB obtidas com os algoritmos de proteção dedicada em função da carga na rede para as topologias Cost239 e NSFNet, respectivamente. As componentes da probabilidade de bloqueio consideradas neste trabalho são: fragmentação, AEL, QoTN e QoTO.

Figura 32 – Porcentagem das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de proteção dedicada para a topologia Cost239 na carga de 800 Erlangs.

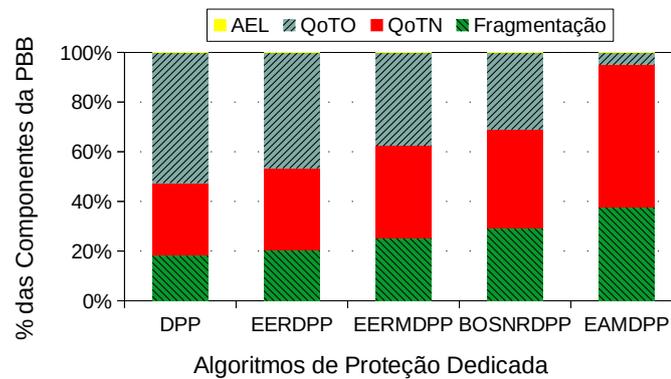


Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Nota-se pela Figura 32 que a componente que mais impactou o desempenho dos algoritmos na topologia Cost239 foi a fragmentação. Já na topologia NSFNet as componentes relacionadas com a QoT (QoTN e QoTO) impactaram mais o desempenho dos algoritmos. Vale destacar que os bloqueios por QoTN também podem ser causados pela fragmentação do espectro.

Observa-se que o algoritmo EAMDPP conseguiu reduzir significativamente o impacto da componente QoTO em comparação aos outros algoritmos. Isto ocorreu devido à estratégia utilizada para a seleção do formato de modulação que torna os circuitos mais resistentes a interferências de outros circuitos.

Figura 33 – Porcentagem das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de proteção dedicada para a topologia NSFNet na carga de 300 Erlangs.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou um algoritmo de proteção dedicada para redes ópticas elásticas chamado EAMDPP. O algoritmo proposto escolhe o par de rotas de trabalho e de *backup* considerando o consumo de energia das rotas. O algoritmo utiliza um algoritmo de seleção de modulação que busca escolher modulações que deixam os circuitos mais resistentes a interferências de outros circuitos e que consumem menos energia.

Um estudo de avaliação de desempenho foi realizado comparando o algoritmo proposto com os algoritmos DPP, EERDPP, EERMDPP e BOSNRDPP. Os resultados mostram um melhor desempenho do algoritmo proposto em relação aos outros algoritmos em termos de probabilidade de bloqueio de banda. O algoritmo EAMDPP obteve uma redução na probabilidade de bloqueio de banda em relação aos outros algoritmos que excede 5% na topologia Cost239 e que excede 28% na topologia NSFNet. O algoritmo EAMDPP também apresentou o melhor desempenho em termos de eficiência energética efetiva.

O próximo capítulo apresenta uma proposta de um novo algoritmo de atribuição de potência por circuito que basea-se no método de busca binária para redes ópticas elásticas.

6 PROPOSTA DE ALGORITMO DE ATRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA POR CIRCUITO

Neste Capítulo são apresentados os estudos referentes a atribuição de potência por circuito em redes ópticas elásticas. Na Seção 6.1 são apresentados os trabalhos relacionados. O algoritmo proposto é apresentado na Seção 6.2. Uma avaliação de desempenho comparando o algoritmo proposto com outros trabalhos da literatura é apresentada na Seção 6.3. Por fim, as considerações finais deste Capítulo são apresentadas na Seção 6.4.

6.1 TRABALHOS RELACIONADOS

Os autores em (PALKOPOULOU et al., 2013) apresentam três estratégias para atribuir potência por circuito: *Optimum Launch Power* (OLP), *Constant Launch Power* (CLP) e *Constant Power Spectral Density* (CPSD). Os autores em (VALE; ALMEIDA, 2019) apresentam quatro estratégias para determinar a potência por circuito: *Egoistic Power Assignment* (EPA), *Enough Power Assignment* (EnPA), *Constant Power Assignment* (CPA) e *Adaptive Power Assignment* (APA). As estratégias OLP e CLP são semelhantes às estratégias EPA e CPA, respectivamente.

A estratégia EPA atribui ao circuito a potência que alcança o maior valor de OSNR ($OSNR_{max}$). Na estratégia EPA, a potência (P_{max}) que alcança a $OSNR_{max}$ para um determinado circuito (ver Figura 34) é obtida usando a equação

$$P_{max} = \sqrt[3]{\frac{c_{Route}}{2a_{Channel}}}, \quad (6.1)$$

tal que a forma de como obter os valores de c_{Route} e $a_{Channel}$ pode ser encontrada em (VALE; ALMEIDA, 2019).

A estratégia EnPA atribui ao circuito a potência que alcança o limiar de OSNR ($OSNR_{th}$) da modulação selecionada para o circuito. Os autores em (VALE; ALMEIDA, 2019) utilizam interpolação linear entre uma potência muito baixa e a potência que alcança a OSNR máxima. Depois é realizado um ajuste para encontrar a potência que alcança a $OSNR_{th}$. A Figura 34 apresenta um exemplo da potência (P_{th}) que alcança a $OSNR_{th}$ e uma potência muito baixa P_{min} .

A estratégia CPA atribui a mesma potência para todos os circuitos. São analisados vários valores de potência, partindo de uma potência mínima até uma potência máxima para definir qual potência será atribuída aos circuitos. Aquele valor de potência que apresentar a menor probabilidade de bloqueio é o valor selecionado.

Na estratégia CPSD é utilizada a mesma densidade espectral de potência para todos os circuitos. A potência de cada circuito é proporcional à largura de banda alocada para o circuito. Para encontrar a densidade espectral de potência adequada são avaliados vários valores para a densidade espectral de potência, partindo de uma densidade menor para uma maior. Aquele valor que apresentar a menor taxa de bloqueio será selecionado.

O algoritmo APA atribui um valor de potência (P_σ), correspondente ao limiar de OSNR adicionado de uma margem para prevenir interferências de futuros circuitos. Por esta razão, o valor de potência P_σ deverá ser maior do que a potência P_{th} e menor do que a potência P_{max} (ver Figura 34). Potências já utilizadas para o estabelecimento de circuitos são salvas em um banco de dados. Quando do atendimento de uma requisição de circuito, caso não haja um valor de potência salvo no banco de dados, o valor inicial de potência ($P_{Current}$) é obtido usando a equação:

$$P_{Current} = P_{min} + k_p \times (P_{max} - P_{min}), \quad (6.2)$$

em que o parâmetro k_p é responsável por ajustar a margem de potência relativa à potência de limiar, P_{th} . P_{max} pode ser inicializada com a Equação 6.1 e a estratégia EnPA pode ser usada para inicializar P_{min} . Se a OSNR ($OSNR_{Current}$) alcançada com $P_{Current}$ for maior ou igual a $OSNR_{th}$ e a QoT de algum circuito já ativo na rede não se tornar inadequada com o estabelecimento do novo circuito, o algoritmo APA salva a nova potência no banco de dados e termina sua execução. Caso a $OSNR_{Current}$ for maior ou igual a $OSNR_{th}$, mas algum circuito ficar com a sua QoT inadequada com o estabelecimento do novo circuito, o algoritmo APA aplica a equação:

$$P'_{Current} = P_{Current} - 0,1 \times P_{Current}, \quad (6.3)$$

para ajustar a potência $P_{Current}$ para uma nova potência $P'_{Current}$. Depois de calcular a nova potência, o algoritmo APA realiza outra vez as verificações de $OSNR_{th}$ e QoT dos outros circuitos. Se a OSNR ($OSNR_{Current}$) ficar menor que $OSNR_{th}$ o algoritmo APA aplica a equação:

$$P'_{Current} = P_{Current} + 0,1 \times P_{Current}, \quad (6.4)$$

para o ajuste da potência $P_{Current}$ para uma nova potência $P'_{Current}$ e depois realiza as verificações de $OSNR_{th}$ e QoT dos outros circuitos. O algoritmo APA possui contadores para contabilizar o número de vezes que as equações 6.3 e 6.4 são aplicadas. Esses contadores impedem que o algoritmo APA entre em um *loop* infinito de adições e subtrações.

6.2 ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo proposto baseia-se no método de busca binária para atribuição de potência por circuito de forma adaptativa. O algoritmo é chamado de *Power Assignment by Binary Search* (PABS). O algoritmo PABS adota a estratégia de usar um banco de dados que guarda as potências atribuídas para circuitos já estabelecidos na rede. Associada a cada potência salva no banco de dados, são salvas também as seguintes informações: rota, taxa de transmissão e modulação. O Algoritmo 9 apresenta os passos do PABS para encontrar a potência que será atribuída para um novo circuito.

Os parâmetros utilizados pelo Algoritmo 9 são requisição de circuito (C), rota (R), modulação (M), bloco de espectro livre (S) e margem de OSNR desejada ($OSNR_{margin}$). A requisição de circuito contém informações como origem, destino e taxa de transmissão. A margem de OSNR desejada é um parâmetro ajustável que o algoritmo utiliza na busca do melhor valor para a potência que será atribuída para o novo circuito. Um valor zero para a margem significa que será procurada uma potência mínima que alcance o limiar de OSNR da modulação selecionada para o novo circuito. Valores maiores que zero para a margem fazem com que o algoritmo procure por potências com valores acima da potência mínima mencionada anteriormente. Atribuir valores maiores que zero para a margem mostrou-se uma boa estratégia para lidar com interferências futuras de outros circuitos (VALE; ALMEIDA, 2019; FONTINELE et al., 2017).

A expressão que o algoritmo PABS utiliza para buscar por uma potência para um novo circuito está na linha 18 do Algoritmo 9. Essa expressão também é utilizada para ajustar uma potência já existente no banco de dados para o estado atual da rede. O valor de P_{max} é calculado na linha 8 do Algoritmo 9 e utiliza a Equação 6.1. Já o valor de P_{min} é inicializado com uma potência baixa, foi utilizada -80 dBm para os estudos deste trabalho. No algoritmo APA, a P_{min} é inicializada com um valor de potência que corresponde à potência mínima que alcança o valor do limiar de OSNR. A Figura 34 apresenta os níveis de potência, e as suas respectivas OSNRs, que são utilizados na busca do melhor valor para a potência que será atribuída para o novo circuito.

A variável $P_{Current}$ guarda o valor da potência encontrado até ao momento para o novo circuito. Usam-se dois critérios para saber se a potência em $P_{Current}$ deve ser usada pelo novo circuito para o seu estabelecimento: *i*) a OSNR alcançada pela potência $P_{Current}$ deve ser maior ou igual a $OSNR_{th+m}$ e *ii*) não tornar inadequada a QoT de algum circuito já ativo na rede.

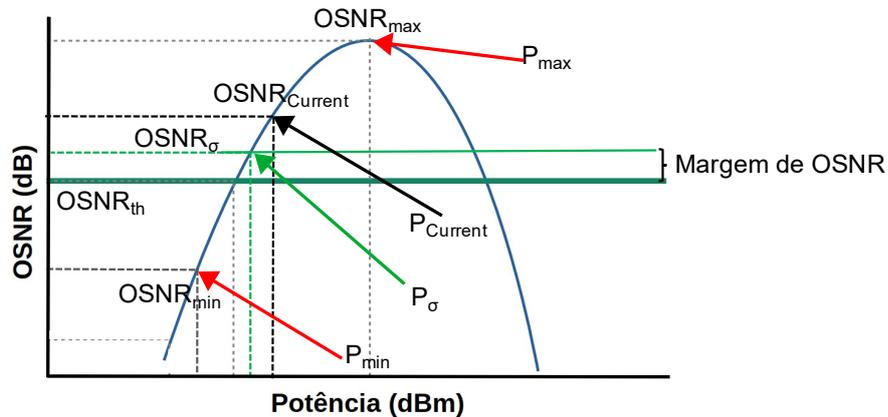
Algorithm 9 Power Assignment by Binary Search (PABS)

Require: $C, R, M, S, OSNR_{margin}$

- 1: $attemptsCounter \leftarrow 0$ e $P_{DB} \leftarrow \emptyset$
- 2: $toSaveDB \leftarrow isP_{DB} \leftarrow false$
- 3: $OSNR_{th+m} \leftarrow OSNR_{threshold} + OSNR_{margin}$
- 4: $P_{DB} \leftarrow findDBPower(C, R, M)$
- 5: **if** $P_{DB} \neq \emptyset$ **then**
- 6: $isP_{DB} \leftarrow true$
- 7: **end if**
- 8: $P_{max} \leftarrow computeMaxPower(C, r)$
- 9: $OSNR_{max} \leftarrow computeOSNR(C, P_{max}, R, M, S)$
- 10: **if** $OSNR_{max} < OSNR_{th+m}$ **then**
- 11: **return** P_{max}
- 12: **end if**
- 13: **repeat**
- 14: **if** $isP_{DB} = true$ **then**
- 15: $P_{Current} \leftarrow P_{DB}$
- 16: $isP_{DB} \leftarrow false$
- 17: **else**
- 18: $P_{Current} \leftarrow (P_{max} + P_{min})/2$
- 19: **end if**
- 20: $OSNR_{Current} \leftarrow computeOSNR(C, P_{Current}, R, M, S)$
- 21: $OSNR_{dif} \leftarrow OSNR_{Current} - OSNR_{th+m}$
- 22: **if** $OSNR_{dif} \geq 0$ **then**
- 23: $QoT_{others} \leftarrow computeQoTForOthers(C, R)$
- 24: **if** $QoT_{others} = true$ **then**
- 25: $toSaveDB \leftarrow true$
- 26: **end if**
- 27: $attemptsCounter \leftarrow attemptsCounter + 1$
- 28: **if** $attemptsCounter > 3$ **then**
- 29: **break**
- 30: **end if**
- 31: **end if**
- 32: **if** $OSNR_{dif} > 0$ **then**
- 33: $P_{max} \leftarrow P_{Current}$
- 34: **else**
- 35: $P_{min} \leftarrow P_{Current}$
- 36: **end if**
- 37: **until** $toSaveDB = true$
- 38: **if** $toSaveDB = true$ e $P_{Current} \neq P_{DB}$ **then**
- 39: $salveDBPower(P_{Current})$
- 40: **end if**
- 41: **return** $P_{Current}$

A verificação dos critérios é realizada nas linhas 20, 21, 22, 23 e 24 do Algoritmo 9. Se os dois critérios forem atendidos, a nova potência pode ser salva no banco de dados e será retornada para ser usada pelo novo circuito. Pode acontecer que a potência encontrada não consiga

Figura 34 – Níveis de potência, e suas respectivas OSNRs, que são utilizados pelo algoritmo PABS.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

satisfazer os dois critérios. O algoritmo verifica apenas três vezes os dois critérios para evitar que entre em *loop* infinito. Ele sempre retorna uma potência, mesmo que ela não satisfaça os dois critérios. O algoritmo *Power, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment* (PRMLSA) que utilizar o PABS ficará encarregado de avaliar se a potência retornada gera o bloqueio do novo circuito.

O algoritmo PABS, assim como os outros algoritmos de atribuição de potência por circuito, é aplicado em conjunto com os algoritmos RMLSA (VALE; ALMEIDA, 2019). O Algoritmo 10 apresenta o algoritmo PRMLSA integrado que foi adotado para a realização dos estudos deste Capítulo. O plano de controle é responsável pela aplicação dos algoritmos PRMLSA.

Na aplicação do Algoritmo 10 as rotas estão ordenadas em ordem crescente de distância e as modulações estão ordenadas em ordem decrescente de eficiência espectral. O algoritmo de atribuição de potência selecionado é aplicado na linha 5 do Algoritmo 10. O Algoritmo 10 verifica a QoT do novo circuito e as QoTs dos demais circuitos já ativos na rede nas linhas 6, 7, 8 e 9. Dessa forma, o algoritmo PRMLSA integrado pode identificar se o algoritmo de atribuição de potência retornou uma potência que leva ao bloqueio da requisição. Caso isso ocorra, o algoritmo PRMLSA integrado vai seguir para a próxima etapa e tentar solicitar uma potência adequada. O plano de controle fica encarregado de identificar o tipo de bloqueio que a requisição sofreu no caso do Algoritmo 10 retornar *false*. Caso contrário, o plano de controle estabelecerá a requisição.

A complexidade computacional do algoritmo de busca binária é igual a $O(\log_2 n)$, em que n é o tamanho do vetor de busca. Essa complexidade também é a mesma do algoritmo PABS. No caso do algoritmo PABS o tamanho de n está associado com a diferença entre os valores

das potências P_{max} e P_{min} .

Algorithm 10 PRMLSA integrado

Require: C

```

1: for all  $r \in routeSet$  do
2:   for all  $m \in modulationSet$  do
3:      $s \leftarrow spectrumAssignmentAlgorithm(C, r, m)$ 
4:     if  $s \neq \emptyset$  then
5:        $p \leftarrow powerAssignmentAlgorithm(C, r, m, s, param)$ 
6:        $QoT_{circuit} \leftarrow computeQoT(C, p, r, m, s)$ 
7:       if  $QoT_{circuit} = true$  then
8:          $QoT_{others} \leftarrow computeQoTForOthers(C, r)$ 
9:         if  $QoT_{others} = true$  then
10:           Configura os valores de  $p, r, m$  e  $s$  no novo circuito
11:           return  $true$ 
12:         end if
13:       end if
14:     end if
15:   end for
16: end for
17: return  $false$ 

```

6.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Esta seção apresenta a avaliação de desempenho dos seguintes algoritmos de atribuição de potência por circuito: EPA, EnPA, CPA, CPSD, APA e PABS. O objetivo deste estudo de avaliação de desempenho é demonstrar a eficácia do algoritmo proposto em relação às demais propostas para atribuição de potência encontradas na literatura. Para avaliar os algoritmos de atribuição de potência em diferentes cenários, o estudo de avaliação de desempenho também considera os seguintes fatores: topologias de rede (NSFNet e Cost239) e carga na rede. As topologias NSFNet e Cost239 são apresentadas na Figura 15.

Como este trabalho é focado nos algoritmos de atribuição de potência, não foram adotados algoritmos muito sofisticados (soluções mais complexas apresentadas pela literatura) para a resolução do problema RMLSA (ver Algoritmo 10). Foi utilizado o algoritmo de k menores caminhos para o roteamento, com k igual a 3, a estratégia FF para a alocação de espectro e a seleção da modulação é feita pela QoT.

A probabilidade de bloqueio de banda foi considerada como métrica de avaliação de desempenho. São apresentados resultados considerando as componentes do bloqueio de banda: Fragmentação, QoTN, QoTO e AEL.

Em cada simulação, foram observadas 100.000 requisições de circuitos ópticos com quatro níveis de granularidade: 150, 200, 250 e 300 Gbps, com as proporções 4:3:2:1, respectivamente. Para cada simulação, foram realizadas dez replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados são apresentados com estimativa pontual e estimativa intervalar considerando o nível de confiança de 95%, com uma margem de erro (ou erro máximo de estimativa) de 0,002.

As modulações consideradas neste estudo foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM e 32QAM e os seus respectivos limiares de SNR por símbolo são 5,5, 8,5, 12,5, 15,1, 18,1 dB (IVES; BAYVEL; SAVORY, 2015). Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem largura de banda do espectro dividida em 320 *slots* de frequência. Um *slot* de frequência possui largura de banda de 12,5 GHz. Foi utilizada a banda de guarda igual a um *slot* de frequência. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

Descrição	Valor
Atenuação da fibra (α)	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra (D)	16 ps/(nm·km)
Coefficiente não linear da fibra (γ)	1,3 (W·km) ⁻¹
Comprimento de um <i>span</i> (L_s)	80 km
Figura de ruído do amplificador (NF)	5 dB

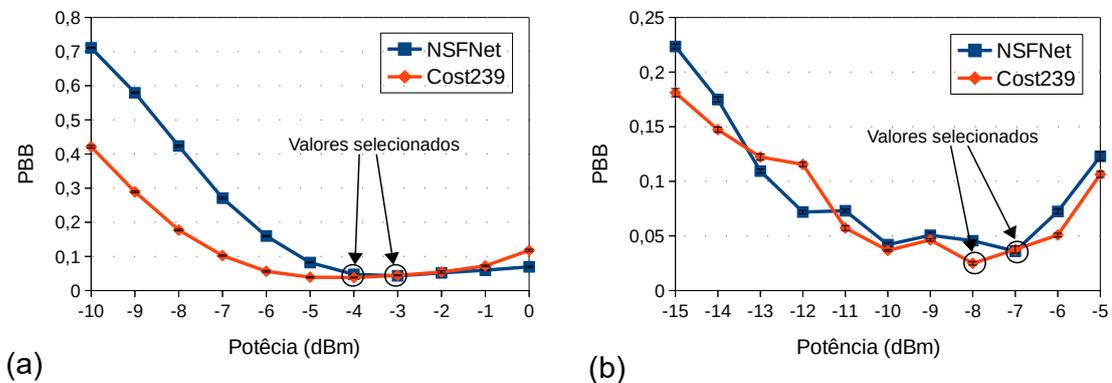
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

6.3.1 Ajuste dos Parâmetros dos Algoritmos CPA, CPSD, APA e PABS

Os algoritmos CPA, CPSD, APA e PABS possuem parâmetros ajustáveis que interferem diretamente nos seus desempenhos. Inicialmente, foram realizados experimentos para determinar os valores destes parâmetros buscando o melhor desempenho de cada algoritmo. Os experimentos consistiram em realizar simulações com valores predefinidos para os parâmetros dos algoritmos. Os valores partiam de um valor mínimo para um valor máximo com um certo nível de incremento. Depois foram analisadas as probabilidades de bloqueio de banda alcançadas com cada valor e foi selecionado o valor que alcançou a menor probabilidade de bloqueio de banda. Quando mais de um valor alcançou a menor probabilidade de bloqueio de banda considerando as estimativas intervalares, foi selecionado o valor com a menor estimativa pontual.

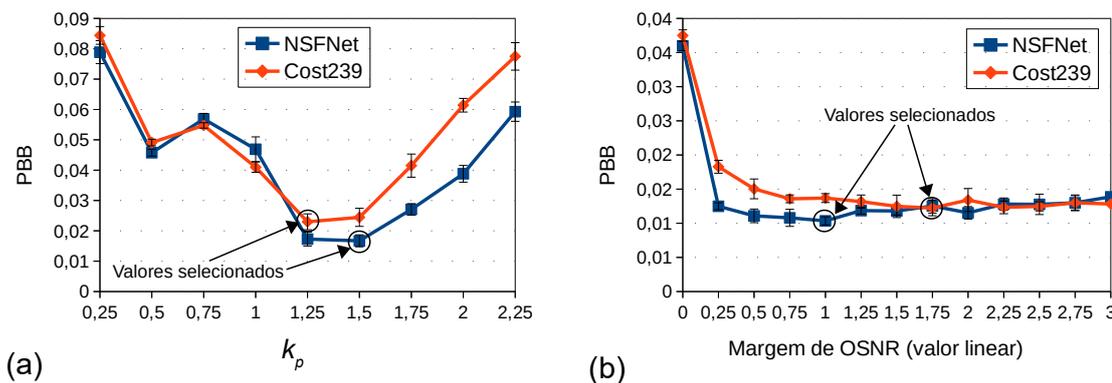
As Figuras 35 e 36 apresentam os resultados dos experimentos realizados com os algoritmos CPA, CPSD, APA e PABS. A carga na rede utilizada para ajustar os parâmetros dos algoritmos CPA, CPSD, APA e PABS corresponde à carga mais alta analisada em cada topologia (carga de 600 Elangs para a topologia NSFNet e carga de 1550 Erlangs para a topologia Cost239). Essa estratégia foi adotada considerando que os parâmetros que definem o desempenho dos algoritmos devem garantir que a rede suporte a capacidade da demanda planejada na implementação inicial e seja escalável durante toda a vida útil da rede, o que pode abranger várias décadas (POINTURIER, 2017).

Figura 35 – Probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos (a) CPA e (b) CPSD em função da potência.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 36 – Probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos (a) APA e (b) PABS em função do parâmetro ajustável de cada algoritmo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Para o algoritmo CPA foi realizado um estudo utilizando a menor potência igual a -10 dBm e a maior igual a 0 dBm, com incremento de 1 dB, Figura 35(a). As potências -3 dBm e -4 dBm alcançaram os melhores desempenhos nas topologias NSFNet e Cost239, respectivamente. Para o algoritmo CPSD foi utilizada a menor potência igual a -15 dBm e a maior potência

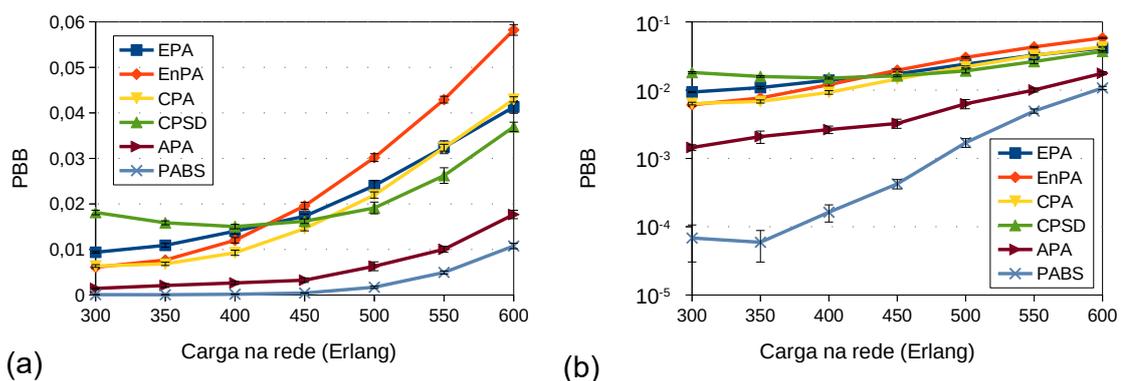
igual a -5 dBm, com incremento de 1 dB, Figura 35(b). Para encontrar a densidade espectral de potência foi utilizada a largura de banda de referência igual à largura de banda de um *slot*. As potências -7 dBm e -8 dBm alcançaram os melhores desempenhos nas topologias NSFNet e Cost239, respectivamente.

Para encontrar o melhor valor para o parâmetro usado pelo algoritmo APA foi avaliado o desempenho em que o parâmetro k_p (equação 6.2) tomou valores entre 0,25 e 2,25, com incremento de 0,25, Figura 36(a). Os valores 1,5 e 1,25 apresentaram os melhores desempenhos nas topologias NSFNet e Cost239, respectivamente. Para o algoritmo PABS foi realizado um estudo para encontrar o valor da margem de OSNR que gera a menor probabilidade de bloqueio de banda. O menor valor utilizado foi 0 e o maior foi 3, com incremento de 0,25, Figura 36(b). Os valores para a margem de OSNR que alcançaram os melhores desempenhos foram 1,0 e 1,75 nas topologias NSFNet e Cost239, respectivamente.

6.3.2 Comparação entre os Algoritmos

As Figuras 37 e 38 apresentam as probabilidades de bloqueio de banda obtidas pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito em função da carga na rede para as topologias NSFNet e Cost239, respectivamente.

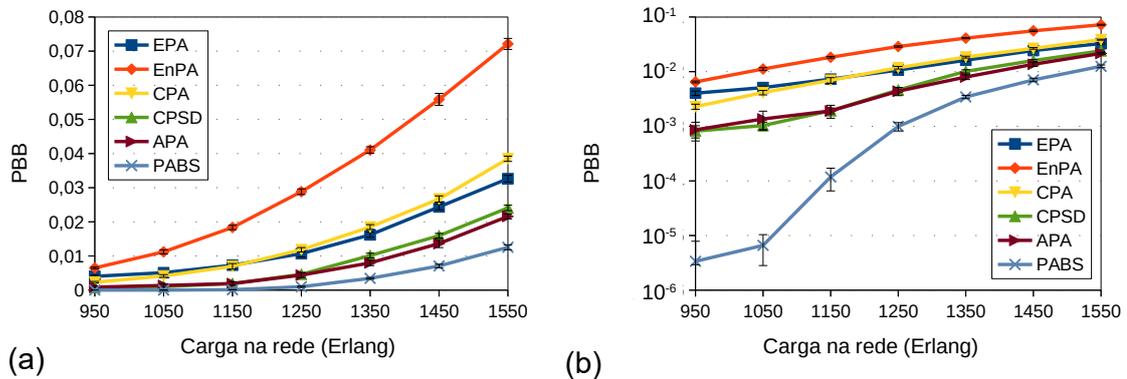
Figura 37 – Probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para a topologia NSFNet. (a) Escala normal e (b) Escala logarítmica.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Nota-se pelas Figuras 37 e 38 que o algoritmo PABS alcançou o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda em todos os cenários avaliados. O algoritmo APA apresentou o segundo melhor desempenho na topologia NSFNet. Na topologia Cost239 o desempenho do APA ficou semelhante ao CPSD. O algoritmo EnPA apresentou o pior

Figura 38 – Probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para a topologia Cost239. (a) Escala normal e (b) Escala logarítmica.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

desempenho em relação aos outros algoritmos na maioria das cargas analisadas nas duas topologias.

A Tabela 10 mostra a redução na probabilidade de bloqueio de banda alcançada pelo algoritmo PABS em relação aos demais algoritmos de atribuição de potência por circuito. Os valores de redução na probabilidade de bloqueio de banda exibidos na Tabela 10 correspondem ao menor valor obtido para todas as cargas testadas em ambas as topologias. Isto significa que em alguns pontos de carga o PABS apresenta redução de probabilidade de bloqueio de banda ainda maior. Em alguns casos o PABS permitiu o atendimento de todas as requisições realizadas em ambas topologias, o que por sua vez, corresponde a uma redução máxima de 100% da PBB em relação aos demais algoritmos.

Tabela 10 – Redução mínima na PBB alcançada pelo algoritmo PABS em relação a PBB dos outros algoritmos.

Topologia	EPA	EnPA	CPA	CPSD	APA
NSFNet	74%	82%	75%	71%	39%
Cost239	62%	83%	67%	48%	42%

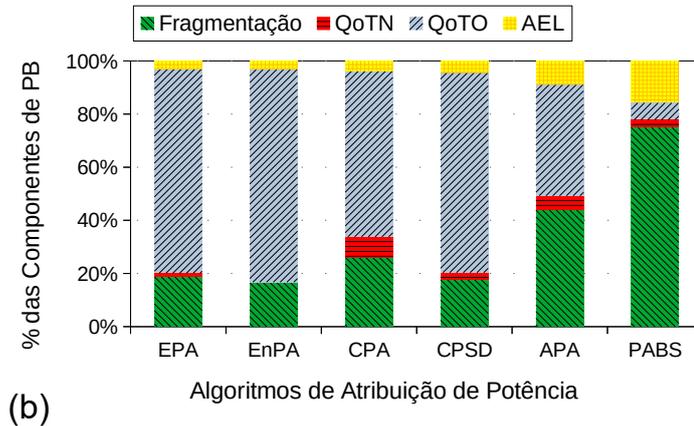
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Observa-se pela Tabela 10 que o algoritmo PABS alcança uma redução na probabilidade de bloqueio de banda de pelo menos 39% na topologia NSFNet e 42% na topologia Cost239. Os maiores valores entre as reduções mínimas na PBB alcançadas pelo algoritmo PABS em relação aos demais algoritmos na topologia NSFNet foi de 82% e na topologia Cost239 foi de 83%.

As Figuras 39 e 40 apresentam a composição da probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para as topologias NSFNet e Cost239,

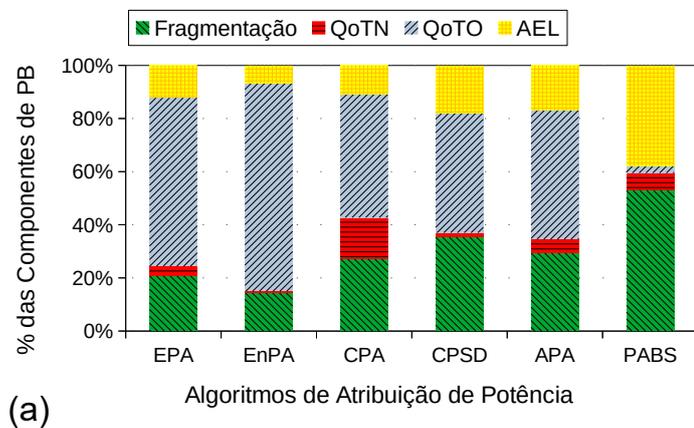
respectivamente. A Figura 39 apresenta os resultados obtidos para a carga de 600 Erlangs na topologia NSFNet e a Figura 40 apresenta os resultados obtidos para a carga de 1550 Erlangs na topologia Cost239.

Figura 39 – Percentagens das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para a topologia NSFNet na carga de 600 Erlangs.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 40 – Percentagens das componentes da PBB obtidas pelos algoritmos de atribuição de potência por circuito para a topologia Cost239 na carga de 1550 Erlangs.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Analisando as Figuras 39 e 40, nota-se qual componente da probabilidade de bloqueio de banda impacta mais o desempenho dos algoritmos. O algoritmo EnPA busca atribuir potências que alcançam um valor de OSNR um pouco acima do limiar de OSNR da modulação selecionada para o circuito. Essa estratégia estabelece circuitos frágeis a interferências de outros circuitos. Observa-se pelas Figuras 39 e 40 que a componente que mais afetou o desempenho do algoritmo EnPA foi a QoTO. A componente QoTO está relacionada com os bloqueios gerados por interferências entre os circuitos.

A estratégia usada pelo algoritmo EPA é atribuir a potência que alcança a OSNR máxima por circuito. Essa estratégia pode levar ao estabelecimento de circuitos com níveis excessivos de potências. Isso leva a níveis altos de potências interferindo em outros circuitos, isto é, maior número de bloqueios por QoTO, como observado nas Figura 39 e 40.

O algoritmo CPA, por atribuir o mesmo nível de potência para todos os circuitos, estabelece alguns circuitos frágeis e outros com excesso de potência. Isto também contribui para que a maioria dos bloqueios ocorridos com o uso do CPA sejam do tipo QoTO, Figura 39 e 40.

A estratégia de atribuir a mesma densidade espectral de potência para todos os circuitos, adotada pelo algoritmo CPSD, permite que a potência atribuída a cada circuito seja ajustada pela sua largura de banda. Essa estratégia possibilitou o melhor desempenho do algoritmo CPSD em relação aos algoritmos EPA, EnPA e CPA nas cargas mais altas na topologia NSFNet (Figura 37) e em todas as cargas na topologia Cost239 (Figura 38). Mesmo assim, o algoritmo CPSD ainda sofreu mais bloqueios do tipo QoTO, Figuras 39 e 40.

Os algoritmos APA e PABS buscam atribuir valores de potência por circuito de forma adaptativa, entre valores mínimo e máximo. A cada novo ajuste na potência, os algoritmos APA e PABS realizam uma verificação do impacto de interferência que a nova potência causa nos outros circuitos já estabelecidos na rede. Dessa forma, eles conseguem superar as limitações dos algoritmos EPA, EnPA e CPA. Entretanto, o PABS se saiu melhor que o APA. A maioria dos bloqueios sofridos pelo PABS foram relacionados com os recursos espectrais (fragmentação e AEL), Figuras 39 e 40.

A topologia NSFNet possui menor conectividade média dos nós e maior comprimento médio dos enlaces em relação a topologia Cost239. Essas características da topologia NSFNet contribuem para que a probabilidade de bloqueio devido às penalidades de camada física se acentuem nela. Isso fica evidenciado quando observa-se as menores reduções na probabilidade de bloqueio de banda alcançadas pelo algoritmo PABS em relação aos algoritmos EPA, CPA e CPSD nas duas topologias, Tabela 10.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou o algoritmo PABS que realiza atribuição de potência por circuitos em redes ópticas elásticas de forma adaptativa baseando-se no método de busca binária. O algoritmo PABS também utiliza um banco de dados para guardar as potências que foram utilizadas para o estabelecimento de circuitos. As potências salvas no banco de dados são

utilizadas para evitar uma busca cega por novas potências para requisições de circuitos com característica semelhantes aos circuitos já estabelecidos.

Foi conduzida uma avaliação de desempenho comparando o algoritmo PABS com os algoritmos EPA, EnPA, CPA, CPSD e APA nas topologias NSFNet e Cost239. Os resultados mostraram que o algoritmo proposto alcançou o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda em comparação aos outros algoritmos para todas as cargas analisadas em ambas as topologias. O algoritmo PABS obteve uma redução na probabilidade de bloqueio de banda em relação aos outros algoritmos que excede 39% na topologia NSFNet e que excede 42% na topologia Cost239.

O próximo capítulo apresenta as conclusões desta tese. Apresenta também as contribuições, os trabalhos gerados e os possíveis trabalhos futuros.

7 CONCLUSÃO

Nesse capítulo são discutidas as considerações finais e contribuições desta tese. Também é apresentada uma lista com os trabalhos gerados e sugestões para possíveis trabalhos futuros.

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para suportar a crescente demanda por largura de banda e garantir o atendimento a circuitos heterogêneos, é necessária uma estrutura de rede que forneça suporte ao crescente tráfego. Assim, surgem as redes ópticas elásticas, que divide o espectro em *slots* de frequência e que operam de forma independente. Esses *slots* de frequência podem ser agrupados para atender requisições necessitam de maior largura de banda, garantindo assim flexibilidade para o estabelecimento de circuitos heterogêneos.

O problema RMLSA é um dos principais problemas que devem ser tratados em redes ópticas elásticas. Também é importante levar em consideração as imperfeições de camada física quando se está propondo soluções para o problema RMLSA. Dessa forma, atualiza-se a definição do problema para IA-RMLSA.

Prover sobrevivência as redes ópticas elástica é outra questão de grande importância. Uma vez que essas redes permitem o transporte de grandes volumes de informações e fornecem serviços para aplicações que exigem requisitos rigorosos.

Outro aspecto que deve ser considerado é o consumo de energia das redes ópticas elásticas. Com um uso mais eficiente do espectro óptico aumenta-se a quantidade de circuitos que podem ser estabelecidos. Com o aumento do número de circuitos ópticos estabelecidos aumenta-se a potência óptica injetada nos enlaces ópticos, o que pode chegar a níveis não aceitáveis futuramente.

Neste contexto, projetar algoritmos RMLSA considerando limitações de camada física (IA-RMLSA), sobrevivência e consumo de energia em redes ópticas elásticas são fundamentais. Dessa forma, desenvolver algoritmos eficientes que garantam o estabelecimento de circuitos com qualidade de transmissão, baixo consumo de energia e resiliência a falhas são importantes para reduzir o bloqueio de requisições futuras ou evitar a perda significativa de informação na ocorrência de falha.

7.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições desta tese são discutidas a seguir.

Uma proposta para o subproblema de alocação de espectro, chamada de SAIM, foi apresentada no Capítulo 4. O algoritmo SAIM busca selecionar blocos de espectro livre que causem menor interferência nos outros circuitos já ativos na rede. O SAIM também aplica uma estratégia de particionamento do espectro, o que dá ao algoritmo uma noção de fragmentação do espectro.

Foi apresentada no Capítulo 5, a proposta de um novo algoritmo de proteção dedicada consciente de consumo de energia, chamado de EAMDPP. O algoritmo EAMDPP busca selecionar os formatos de modulação que deixam os circuitos mais resistentes a interferência de outros circuitos e que consumem menos energia. O algoritmo EAMDPP também escolhe o par de rotas de trabalho e de *backup* considerando o consumo de energia das rotas. Ou seja, busca selecionar o par de rotas de trabalho e de *backup* que consumem menos energia.

No Capítulo 6 foi apresentado um novo algoritmo para a atribuição de potência por circuito chamado de PABS. O algoritmo PABS realiza a atribuição de potência por circuito de forma adaptativa baseando-se no método de busca binária.

Foram realizadas avaliações de desempenho, por meio de simulação computacional, comparando os algoritmos propostos com outros algoritmos presentes na literatura. Os resultados mostram o melhor desempenho dos algoritmos propostos em relação aos outros algoritmos em termos de probabilidade de bloqueio de banda para as topologias NSFNet e Cost239.

O algoritmo SAIM alcançou uma redução na probabilidade de bloqueio de banda em relação aos outros algoritmos que varia de 2% a 55%. A redução na probabilidade de bloqueio de banda alcançada pelo algoritmo EAMDPP varia de 5% a 43%. Enquanto o algoritmo PABS atingiu uma redução que varia de 39% a 83%. O algoritmo EAMDPP também atingiu o melhor desempenho em termos de eficiência energética efetiva em relação aos outros algoritmos.

7.3 TRABALHOS GERADOS

Os trabalhos publicados e submetidos pelo autor desta tese são apresentados a seguir. Trabalhos gerados relacionados com esta tese com o autor da tese como primeiro autor do trabalho:

- **FONTINELE, A.**; CARTAXO, A. V. T.; CAMPELO, D. R.; SANTOS, I.; SOARES, A.; MONTEIRO, J. A. S. *Impairment-aware Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks*. In: *Computer Networks*, agosto de 2021 (**Trabalho submetido**). Qualis A2;
- **FONTINELE, A.**; SANTOS, I.; LACERDA JÚNIOR, J. C.; SOARES, A.; CARTAXO, A. V. T.; CAMPELO, D. R. Novo Algoritmo para Atribuição de Potência por Circuito em Redes Ópticas Elásticas. In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), Rio de Janeiro, RJ, 2020. Qualis A4;
- **FONTINELE, A.**; SANTOS, I.; LACERDA JÚNIOR, J. C.; SOARES, A.; MONTEIRO, J. S.; CAMPELO, D. R. Alocação de Espectro com Redução de Interferências entre Circuitos em Redes Ópticas Elásticas. In: XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), Campos do Jordão, São Paulo, 2018. Qualis A4;
- **FONTINELE, A.**; LACERDA JÚNIOR, J. C.; REIS JÚNIOR, J. V.; SOARES, A.; CAMPELO, D. R. *Protection considering Power Consumption and Physical Layer Impairments in Dynamic Elastic Optical Networks*. In: *19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. Girona, Spain, 2017. Qualis A4.

Trabalhos gerados relacionados com esta tese com o autor da tese como um dos autores do trabalho:

- SANTOS, I.; MONTEIRO, J. A. S.; SOARES, A.; **FONTINELE, A.**; CAMPELO, D. R. *A Spectrum Spacing Mechanism to Enhance Traffic Grooming in Elastic Optical Networks*. In: *Photonic Network Communications*, 17 de junho de 2021. Qualis A4;
- LACERDA JR, J.; **FONTINELE, A.**; SANTOS, I.; LEÃO, E.; CAMPELO, D. R.; MONTEIRO, J. A. S.; 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 (SBRC), Rio de Janeiro, RJ, 2020. Qualis A4;
- MONTEIRO, N.; JÚNIOR, W.; **FONTINELE, A.**; CAMPELO, D. R.; PAIVA, A.; RABELO, R.; SOARES, A. Alocação de Banda de Guarda Adaptativa Utilizando Redes Neurais Multi Layer Perceptron em Redes Ópticas Elásticas. In: XXXVIII Simpósio Bra-

sileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), Rio de Janeiro, RJ, 2020. Qualis A4;

- LACERDA JÚNIOR, J. C.; **FONTINELE, A.**; CAMPELO, D. R.; SOARES, A. *Dedicated Protection Considering Physical Layer Impairments in Elastic Optical Networks*. In: *22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bari, Italy, 2020. Qualis A4;
- SANTOS, I.; **FONTINELE, A.**; HIAGO, L.; MONTEIRO, J. S.; SOARES, A.; CAMPELO, D. R. Um Mecanismo para Potencialização da Agregação de Tráfego em Redes Ópticas Elásticas. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), Gramado, RS, 2019. Qualis A4;
- MONTEIRO, N. S.; **FONTINELE, A.**; SANTOS, I.; OLIVEIRA, A. C.; CAMPELO, D. R.; SOARES, A. Novo Algoritmo para Provisão de Banda de Guarda Adaptativa em Redes Ópticas Elásticas. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), Gramado, RS, 2019. Qualis A4;
- ARAÚJO, S.; SOARES, A.; **FONTINELE, A.**; CAMPELO, D. R.; REIS JÚNIOR, J. V.; BARBOSA, E. *Circuit Reallocation Strategy aware of the Physical Layer Effects for Elastic Optical Networks*. In: *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Natal, Brazil, 2018. Qualis A3;
- LACERDA JÚNIOR, J. C.; **FONTINELE, A.**; CAMPELO, D. R.; SOARES, A. Proteção Dedicada para Rede Ópticas Elásticas considerando Efeitos de Camada Física. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Belém-PA, 2017. Qualis A4.

7.4 TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao trabalho de pesquisa descrito nesta tese, lista-se, nesta seção, propostas de trabalhos futuros a serem realizadas.

- Realizar estudos com os algoritmos propostos nesta tese em conjunto com algoritmos de agregação de tráfego. A agregação de tráfego é uma abordagem que permite aumentar a

eficiência da utilização dos recursos espectrais e redução do consumo de energia (ZHANG et al., 2015; CHOUDHURY; REDDY; DE, 2019);

- Adaptação dos algoritmos propostos nesta tese para o cenário de redes ópticas elásticas translúcidas. As redes ópticas translúcidas possuem a capacidade de regeneração do sinal e permitem a conversão do comprimento de onda ou espectro. Espera-se que os algoritmos propostos possam reduzir a quantidade de regeneradores usados em uma rota, porque os algoritmos são cientes das imperfeições de camada física (CHAVES et al., 2015; DINARTE et al., 2019);
- Adaptação dos algoritmos propostos nesta tese para investigar o desempenho deles em um cenário de redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (*Space Division Multiplexing* (SDM)). Neste contexto, o espectro óptico é dividido espacialmente, através de núcleos distintos dentro de uma única fibra (KLINKOWSKI; ZALEWSKI, 2019; ZHANG; YEUNG, 2020; CHEN et al., 2020; ZHEN et al., 2021; MOGHADDAM; BEYRANVAND; SALEHI, 2021).

Em um ou mais dos contextos acima, a continuidade do trabalho desta tese seria realizada através da investigação da otimização dos níveis de potência por circuito em redes ópticas elásticas e a avaliação do impacto desta otimização na probabilidade de bloqueio e sensibilidade à fragmentação do espectro, dentre outros. Em particular, a otimização do impacto dos efeitos não-lineares de transmissão na fibra através da escolha adequada do nível de potência por circuito no desempenho da rede (probabilidade de bloqueio de banda, probabilidade de bloqueio de requisições e fragmentação) será analisada.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, S.; SOARES, A.; FONTINELE, A.; CAMPELO, D. R.; JÚNIOR, J. V. dos R.; BARBOSA, Ê. Circuit reallocation strategy aware of the physical layer effects for elastic optical networks. *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Natal-Brazil, 2018.
- 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 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.
- CHATTERJEE, B. C.; BA, S.; OKI, E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 20, n. 1, p. 183–210, 2018.
- CHATTERJEE, B. C.; FADINI, W.; OKI, E. A spectrum allocation scheme based on first-last-exact fit policy for elastic optical networks. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 68, n. Supplement C, p. 164 – 172, 2016. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804516300017>>.
- CHATTERJEE, B. C.; OKI, E. Dispersion-adaptive first-last fit spectrum allocation scheme for elastic optical networks. *IEEE Communications Letters*, v. 20, n. 4, p. 696–699, April 2016. ISSN 1089-7798.
- 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.
- CHAVES, D. A. R.; SILVA, E. F. da; BASTOS-FILHO, C. J. A.; PEREIRA, H. A.; ALMEIDA, R. C. Heuristic algorithms for regenerator assignment in dynamic translucent elastic optical networks. In: *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.
- CHEN, Q.; JIANG, Y.; CHEN, B.; WANG, Q.; GAO, M.; CHEN, H.; WU, J. Profit-aware virtual optical network mapping in space-division-multiplexing elastic optical networks. In: *2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–3.
- CHOUDHURY, P. D.; REDDY, K. I.; DE, T. A path based protection and traffic grooming approach in flex-grid optical networks. In: *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–3.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. 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.
- COSTA, L. R.; BRASILEIRO, Í. B.; DRUMMOND, A. C. Low margin qot-aware rmlsa with circuit invigoration in elastic optical networks. In: *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.

- COSTA, L. R.; BRASILEIRO, I. B.; DRUMMOND, A. C. Energy efficiency in sliceable-transponder enabled elastic optical networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, v. 5, n. 2, p. 789–802, 2021.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.
- DINARTE, H. A.; CORREIA, B. V. A.; PEREIRA, H. A.; ALMEIDA, R. C.; CHAVES, D. A. R. Review of translucent elastic optical networks under dynamic traffic: Enabling devices, design strategies and operational strategies. In: *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4.
- DURANT, W. *Books: The Great Gadfly*. [S.l.]: Time Magazine, 1965.
- ESSIAMBRE, R.; KRAMER, G.; WINZER, P. J.; FOSCHINI, G. J.; GOEBEL, B. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 28, n. 4, p. 662–701, Feb 2010. ISSN 0733-8724.
- FERRARI, A.; VIRGILLITO, E.; CURRI, V. Band-division vs. space-division multiplexing: A network performance statistical assessment. *Journal of Lightwave Technology*, v. 38, n. 5, p. 1041–1049, 2020.
- 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, n. Supplement C, p. 1 – 14, 2017. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128617300634>>.
- 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.
- HADI, M.; PAKRAVAN, M. R. Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in ofdm-based elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 10, n. 2, p. 90–103, 2018.
- 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>>.
- 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.; KOZICKI, B.; TAKARA, H.; WATANABE, A.; SONE, Y.; TANAKA, T.; HIRANO, A. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]. *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 8, p. 138–145, August 2010. ISSN 0163-6804.
- 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.
- JU, M.; ZHOU, F.; XIAO, S.; ZHU, Z. Power-efficient protection with directed p -cycles for asymmetric traffic in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 34, n. 17, p. 4053–4065, Sept 2016. ISSN 0733-8724.
- 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, May 2019. ISSN 1943-0639.
- LECHOWICZ, P.; TORNATORE, M.; WLODARCZYK, A.; WALKOWIAK, K. Fragmentation metrics and fragmentation-aware algorithm for spectrally/spatially flexible optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 12, n. 5, p. 133–145, 2020.
- LEIVA, A.; PAVEZ, N.; BEGHELLI, A.; OLIVARES, R. A joint RSA algorithm for dynamic flexible optical networking. In: *2014 IEEE Latin-America Conference on Communications (LATINCOM)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- LIU, H. L.; LV, L.; CHEN, Y.; WEI, C. Fragmentation-avoiding spectrum assignment strategy based on spectrum partition for elastic optical networks. *IEEE Photonics Journal*, v. 9, n. 5, p. 1–13, Oct 2017.
- MOGHADDAM, E. E.; BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A. Resource allocation in space division multiplexed elastic optical networks secured with quantum key distribution. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 39, n. 9, p. 2688–2700, 2021.
- MOURA, P. M.; SCARAFICCI, R. A.; FONSECA, N. L. S. d. Algorithm for energy efficient routing, modulation and spectrum assignment. In: *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 5961–5966. ISSN 1938-1883.
- OLSZEWSKI, I. Spectrum allocation policy in elastic optical networks. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, Polish Academy of Sciences Committee of Electronics and Telecommunications, vol. 63, n. No 4, 2017. Disponível em: <<http://journals.pan.pl/Content/106047/PDF/53.pdf>>.
- PAIRA, S.; HALDER, J.; BHATTACHARYA, U.; CHATTERJEE, M. A novel fragmentation-aware and energy-efficient multipath routing and spectrum allocation for prioritized traffic in protected eons. In: *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- PALKOPOULOU, E.; BOSCO, G.; CARENA, A.; KLONIDIS, D.; POGGIOLINI, P.; TOMKOS, I. Nyquist-wdm-based flexible optical networks: Exploring physical layer design parameters. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 14, p. 2332–2339, 2013.
- PEDERZOLLI, F.; SIRACUSA, D.; ZANARDI, A.; GALIMBERTI, G.; FAUCI, D. L.; MARTINELLI, G. Path-based fragmentation metric and rsa algorithms for elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 11, n. 3, p. 15–25, 2019.
- POGGIOLINI, P.; JIANG, Y. Recent advances in the modeling of the impact of nonlinear fiber propagation effects on uncompensated coherent transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 3, p. 458–480, 2017.

POINTURIER, Y. Design of low-margin optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 9, n. 1, p. A9–A17, Jan 2017. ISSN 1943-0639.

RAHBAR, A. G. Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength assignment techniques in all-optical wavelength-routed networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 14, n. 4, p. 1065–1089, Fourth 2012. ISSN 1553-877X.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical networks: a practical perspective*. 3rd. ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009. ISBN 978-0-12-374092-2.

REN, R.; HOU, W.; GUO, L.; LIU, Y.; WU, J.; YANG, Y. Spectrum and energy-efficient survivable routing algorithm in elastic optical network. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, v. 127, n. 20, p. 8795 – 8806, 2016. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402616307197>>.

ROSA, A.; CAVDAR, C.; CARVALHO, S.; COSTA, J.; WOSINSKA, L. Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. In: *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 242–246. ISSN 1949-4092.

RUAN, L.; ZHENG, Y. Dynamic survivable multipath routing and spectrum allocation in ofdm-based flexible optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 6, n. 1, p. 77–85, Jan 2014. ISSN 1943-0620.

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.

SARADHI, C. V.; SUBRAMANIAM, S. Physical layer impairment aware routing (PLIAR) in WDM optical networks: Issues and challenges. *Commun. Surveys Tuts.*, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 11, n. 4, p. 109–130, out. 2009. ISSN 1553-877X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/SURV.2009.090407>>.

SHEN, G.; GUO, H.; BOSE, S. K. Survivable elastic optical networks: survey and perspective (invited). *Photonic Network Communications*, v. 31, n. 1, p. 71–87, Feb 2016. ISSN 1572-8188. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11107-015-0532-0>>.

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>>.

TALEBI, S.; ALAM, F.; KATIB, I.; KHAMIS, M.; SALAMA, R.; ROUSKAS, G. N. Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey. *Optical Switching and Networking*, v. 13, p. 34 – 48, 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427714000253>>.

VALE, V.; ALMEIDA, R. Power, routing, modulation level and spectrum assignment in all-optical and elastic networks. *Optical Switching and Networking*, v. 32, p. 14 – 24, 2019. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427718300912>>.

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>>.

VIZCAÍNO, J. L.; YE, Y.; MONROY, I. T. Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks. *Computer Networks*, v. 56, n. 10, p. 2400 – 2419, 2012. ISSN 1389-1286. Green communication networks. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128612001053>>.

WAN, X.; WANG, L.; HUA, N.; ZHANG, H.; ZHENG, X. Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks. In: *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–3. ISSN pending.

WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks. In: *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2907–2911. ISSN 1930-529X.

WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, v. 11, Part A, p. 83 – 91, 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427713000799>>.

WU, J.; NING, Z.; GUO, L. Energy-efficient survivable grooming in software-defined elastic optical networks. *IEEE Access*, v. 5, p. 6454–6463, 2017.

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>>.

YIN, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, M.; XIA, M.; ZHU, Z.; DAHLFORT, S.; YOO, S. Spectral and spatial 2D fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 5, n. 10, p. A100–A106, Oct 2013. ISSN 1943-0620.

YIN, Y.; ZHANG, M.; ZHU, Z.; YOO, S. Fragmentation-aware routing, modulation and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks. In: *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–3.

YUAN, J.; ZHU, R.; ZHAO, Y.; ZHANG, Q.; LI, X.; ZHANG, D.; SAMUEL, A. A spectrum assignment algorithm in elastic optical network with minimum sum of weighted resource reductions in all associated paths. *Journal of Lightwave Technology*, v. 37, n. 21, p. 5583–5592, 2019.

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, S.; YEUNG, K. L. Dynamic service provisioning in space-division multiplexing elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 12, n. 11, p. 335–343, 2020.
- ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment aware resource allocation in elastic optical networks. In: *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–3.
- ZHAO, Y.; HU, L.; ZHU, R.; YU, X.; WANG, X.; ZHANG, J. Crosstalk-aware spectrum defragmentation based on spectrum compactness in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multi-core fiber. *IEEE Access*, PP, p. 1–1, 01 2018.
- ZHEN, W.; HU, J.; CHEN, Q.; SHAO, W.; CHEN, H.; GAO, M.; CHEN, B.; WU, J. Virtual optical network mapping approaches with inter-core crosstalk in space division multiplexing elastic optical data center networks. In: *2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–4.
- ZHOU, X.; LU, W.; GONG, L.; ZHU, Z. Dynamic RMSA in elastic optical networks with an adaptive genetic algorithm. In: *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2912–2917. ISSN 1930-529X.
- ZHU, M.; SUN, Q.; ZHANG, S.; GAO, P.; CHEN, B.; GU, J. Energy-aware virtual optical network embedding in sliceable-transponder-enabled elastic optical networks. *IEEE Access*, v. 7, p. 41897–41912, 2019.
- ZHU, P.; LI, J.; WU, D.; CHEN, Y.; TIAN, Y.; WU, Z.; GE, D.; CHEN, X.; CHEN, Z.; HE, Y. Software-defined elastic optical network node supporting spectrum defragmentation. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 9, n. 1, p. A63–A70, Jan 2017. ISSN 1943-0620.
- 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.
- ZHU, Z.; LU, W.; ZHANG, L.; ANSARI, N. Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/multi-path routing. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 1, p. 15–22, Jan 2013. ISSN 0733-8724.

ANEXO A – ARTIGO SOBRE O SNETS

Noname manuscript No. (will be inserted by the editor)

SNetS: Simulation Environment for Planning and Performance Evaluation of Elastic Optical Networks

Iallen Santos · Alexandre Fontinele · José A. S. Monteiro · Divanilson R. Campelo · André Soares · Ítalo B. Brasileiro

Received: date / Accepted: date

Abstract The growing number of customers and new applications with increasing bandwidth requirements generates greater demand for transport networks. The use of optical fiber as a data transmission physical environment has made it possible to increase the capacity of transport networks. However, efficient use of resources in an optical network is fundamental to reduce costs and maximize network capacity. In this context, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology has been pointed out in the literature as a more efficient option than Wavelength Division Multiplexing (WDM) to multiplex the optical spectrum. OFDM allows the establishment of optical channels using a quantity of customized spectrum for each request. The networks with this capacity are called elastic optical networks. This work presents a simulation environment for performance evaluation and elastic optical network planning. The SLICE Network Simulator (SNetS) proposed in this work allows the study of performance evaluation of resource allocation algorithms such as: routing, spectrum assignment, modulation format choice, regenerator allocation and traffic aggregation. In addition, allows the study of elastic optical networks under several metrics such as: requests blocking probability, bandwidth blocking probability, optical fragmentation and resource utilization. This work also presents a comparison of SNetS with other currently available solutions

in terms of simulated EON features, performance evaluation metrics and development characteristics.

1 Introduction

Computer networks with optical fiber as the physical environment for transmission are named optical networks. To optimize the use of optical links, channel multiplexing is necessary. Wavelength Division Multiplexing (WDM) technology divides the optical spectrum into non overlapping wavelength bands. Each portion of the optical spectrum divided by the WDM is called wavelength. Each wavelength can be viewed as the lowest granularity for the accommodation of an optical circuit [22].

Once allocated for a request, a wavelength will have all its capacity reserved for the request. In this way, WDM optical networks tend to waste resources. The greater the differences between the requested bandwidth and the wavelength capacity, the greater the waste of network resources.

In this context, the literature has been pointing the spectrum sliced elastic optical path (SLICE) networks as a more efficient alternative than traditional wavelength-routed optical networks [31]. SLICE networks use Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) to multiplex the optical spectrum [31]. In this work, SLICE networks will also be referred as elastic optical networks (EONs).

OFDM divides the optical spectrum with finer granularity compared to WDM, and these portions of the spectrum are called *slots*. The slots can be combined to compose a custom size optical channel, and this allows a reduction of optical spectrum waste.

I. Santos, A. Fontinele, J. A. S. Suruagy, D. R. Campelo
 Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
 Centro de Informática (CIn)
 Tel.: +55-86-99911-9862
 E-mail: igss@cin.ufpe.br
 A. Soares, I. B. Barbosa
 Universidade Federal do Piauí (UFPI)
 Departamento de Computação (DC)

Figure 1 shows the difference in the use of the optical spectrum to satisfy requests with different bandwidth requirements when using the WDM and OFDM multiplexing formats.

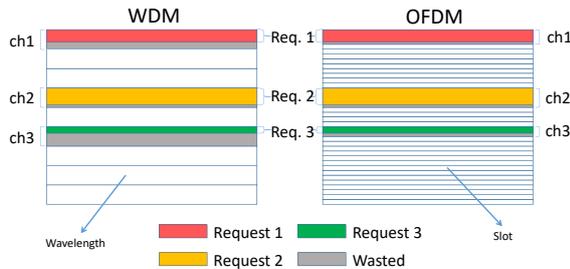


Fig. 1 Comparison between WDM and OFDM multiplexing formats.

Bandwidth Variable Transceivers (BVTs) are optical transmitters and receivers that have the ability to adjust the central frequency of transmission and the used spectrum width. Bandwidth Variable Cross Connectors (BV-WXCs) allow the switching of optical signals with variable spectrum width. The use of BVTs and BV-WXCs in conjunction with OFDM allows the creation of optical channels with adjusted capacity on demand in EONs.

To establish a circuit in an EON, a route, a modulation format, and a spectrum range must be chosen. This problem is known as Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation (RMLSA). In general, the goal of RMLSA solutions is to maximize the ability of the network to meet customer requests using as few resources as possible.

The RMLSA problem can be treated sequentially or in an integrated manner. In this paper, the term RMLSA sequential is used to refer to cases where routing, modulation format choice and spectrum allocation solutions are independent of one another and executed one after the other.

Similarly, the term integrated RMLSA is used to refer to cases where the RMLSA problem is handled by a single solution that addresses the problem as a whole.

Several papers in the literature address the RMLSA sequential problem [23,7,30], while others feature integrated RMLSA solutions [30,28,3]. In general, integrated RMLSA solutions perform better, although these solutions are more complex and require greater EON sophistication.

In addition to RMLSA, there are other resource allocation and planning problems in the context of EONs.

Among them we can highlight: traffic aggregation, allocation of optical signal regenerators, network topology planning (positioning of BV-WXCs and links), sizing and positioning of transceivers and the design and positioning of optical signal regenerators.

Performing experiments with measurement usually represents a high cost. In the context of the EONs, measurement becomes an impractical alternative since the EONs still have technological barriers that make their implementation expensive, beyond the unavailability of some hardware components in the market. On the other hand, analytical modeling requires the simplification of the study scenario, which precludes the observation of various features of an EON. As a result, most of the studies in the literature use simulation as a mechanism for evaluating the performance of EON solutions [23, 30,29,34,13].

This work presents a simulation environment for EONs that supports the development and performance evaluation of solutions for RMLSA problems, traffic aggregation, allocation of optical signal regenerators, and network planning in general. The proposed simulation environment is called SLICE Network Simulator (SNetS).

SNetS is composed of three tools: i) a discrete event simulator that models the EONs and resource allocation algorithms, ii) an accessible GUI on the WEB to configure and execute experiments, and iii) a tool to help compile the results obtained with the simulation in order to facilitate the analysis of the results. In addition, SNetS has open source code.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 presents the related works and compares SNetS with other solutions available for simulation of EONs. Section 3 presents the tools that compose SNetS. Section 4 presents the EON modeling implemented by SNetS. Section 5 presents a partial validation of the SNetS by comparing the results obtained with the tool and results extracted from the literature. Finally, Section 6 completes the work and indicates future works.

2 Related work

The EONs were recently proposed, in this way, the technologies that enable the EONs are still being proposed and matured. These factors make it difficult to access prototypes for experiments.

The nuances of the EONs bring complexity that makes it difficult to evaluate performance through analytical modeling. In this way, some simulation tools have been proposed in the last years for the performance evaluation studies in EONs [1,11,19,6,24].

Table 1 presents a comparison between the SNetS and other available EON simulation environment with respect to development and usability.

Among the simulation tools compared, only SNeTS and SimEON are open source. This allows the aggregation of new functionalities by collaborators of the scientific community. This also facilitates the adaptation of the simulation tool to specific scenarios and problems.

Table 2 presents the EONs features considered in the simulation tools compared in this work. The implementation of several features of the EONs allows the simulation of more realistic scenarios and the observation of the interaction between particular problems of EONs such as traffic grooming, physical layer impairments and the RMLSA problem.

Another important feature to be evaluated in a simulation tool for EONs is the availability of performance evaluation metrics. A rich set of performance evaluation metrics allows the characterization of network behavior in detail, allowing the identification of decisive factors for the planning of an EON.

Table 3 presents the performance evaluation metrics available in the simulation tools evaluated.

Request blocking and bandwidth blocking metrics allow you to observe the network's ability to meet the demand that is requested, this directly impacts the network company revenue. Spectrum utilization, transmitter utilization, receiver utilization, regenerators utilization, and power consumption are all related to the network operational cost. The optical fragmentation metric determines the level of fragmentation of the optical spectrum, this metric is especially important in studies of fragmentation aware algorithms [26].

In addition to the metrics mentioned above, SNetS allows the observation of request blocking and bandwidth blocking filtered per source, destination and bandwidth. In this way, it is possible to analyze the fairness in the treatment of requests. Fairness is a performance-evaluation metric that is extensively explored in papers addressing fairness aware algorithms [30].

SNetS allows the observation of several important metrics, the computation of a large number of metrics, however, can generate a high computational cost. SNetS allows defining the metrics of interest for each simulation, so time is not wasted computing performance evaluation metrics that will not be used.

SNetS supported the realization of experiments in several published papers [14, 12, 13, 18, 20, 2, 4, 5]. This experiments approach different EONs features and present some of the performance evaluation metrics listed at Table 3. However, the transceivers utilization metric was not utilized in any published papers yet.

3 SLICE Network Simulator

This section introduces the SLICE Network Simulator (SNetS). SNetS is a simulation environment for EONs. There are three tools that make up the SNetS: i) Discrete event simulator, ii) GUI available on the Web for the configuration and execution of experiments, and iii) An assistant for compilation and analysis of the results produced in the simulations.

3.1 Discrete event simulator

The SNetS core consists of a discrete event simulator that implements the EON model that will be described in Section 4. During the simulation, the modeling system suffer changes in the your state according to the occurrence of events of two types: new connection request arrival and disconnection.

The SNetS discrete event simulator was implemented using the JAVA programming language and can operate in two ways: i) local simulation and ii) simulation server. When used locally (i), the simulator receives a path where it will fetch the simulation configuration files and save the results. When it operates as a simulation server (ii), the simulator responds to simulations requests made via the web.

It is worth mentioning that SNetS is an open source simulation environment. In this way, it is allowed and encouraged the implementation of new techniques and algorithms of resource allocation as well as new features, performance metrics and tool improvements.

3.2 Graphic client

SNetS has a graphical client accessible on the web to perform simulations remotely. The Graphical Client has an intuitive interface for configuring and running less complex simulations using preconfigured parameters. In addition, when necessary, you can upload the configuration files for more complex simulations.

In addition to facilitating the configuration and execution of the simulations, the SNetS graphical client enables the replication of experiments in a fast and intuitive way. It's enough that the researcher makes available the experiments configuration files in a public repository.

The graphical client of the SNetS is available at <https://snetsimulator.com/>. An updated version of the simulator meets the requests for simulations from this graphical client. It is worth mentioning that versions of the simulator modified by third parties must be used locally or reconfigured to meet other instances of the

Table 1 Comparison of SNetS with other simulation tools in terms of development and usability.

	CEONS [1]	EONS [11]	MANTIS [19]	SimEON [6]	SimRSA [24]	SNetS
Year	2015	2015	2014	2017	2014	2017
Programming language	Java	Java	C++	C++	Java	Java
Open Source	No	-	No	Yes	No	Yes
Parallelism	No	No	No	Yes	No	Yes
Web simulations	No	No	Yes	No	No	Yes

Table 2 EONs features implemented in the simulation tools.

	CEONS [1]	EONS [11]	MANTIS [19]	SimEON [6]	SimRSA [24]	SNetS
Static RSA	X		X		X	
Dynamic RSA	X	X		X		X
RMLSA				X		X
Traffic grooming	X			X		X
Physical layer	X		X	X		X
Translucent EON	X		X	X		X
Survival						X
Power Consumption				X		X

Table 3 Performance evaluation metrics available in simulation tools.

	CEONS [1]	EONS [11]	MANTIS [19]	SimEON [6]	SimRSA [24]	SNetS
Request blocking		X		X		X
Bandwidth blocking	X					X
Spectrum utilization			X		X	X
Transceivers utilization			X			X
Regenerators utilization	X		X			X
Optical fragmentation						X
Power consumption			X	X		X
Fairness						X

graphical client in order to avoid conflicts in the simulations executions.

3.3 Results analyzer

At the end of a simulation, the results are stored in files with comma-separated values with the extension *.csv*. In general, a massive amount of data is extracted from each simulation. This allows investigating the behavior of the EON in several distinct ways, on the other hand, makes it difficult to analyze the data directly.

To analyze the results it is necessary to perform statistical calculations, such as averages and confidence intervals. In addition, it is common to construct graphs to present information such as the requests blocking probability, the use of network resources, the optical spectrum fragmentation, among others.

To meet this need, SNetS includes a script developed in R [21]. The script assists in compiling the raw data and building graphics commonly used in performance evaluation studies in EONs.

The results files generated by SNetS simulator serves as input information for the script, which in turn produces circuit blocking probability, band blocking probability, spectrum utilization, transceiver utilization, and power consumption.

This tool, however, does not restrict the analysis of the results to the cases mentioned above. For more specific analysis, the researcher must consult the data in its raw form and treat them according to the need.

4 EON model implemented in SNetS

The modeling of a system consists of the formal description of the features that should be considered during the simulation. The description of the EON model used by SNetS is presented in the following subsections. In this section, details regarding model implementation in the simulation tool will be omitted. This information can be found in the complete documentation available at [25].

4.1 Control plane and data plane model

Among the characteristics common to transport networks we can mention the high bandwidth request requirements and a less dynamic traffic as compared to access networks. In this context, the fulfillment of a request in an EON consists in the allocation of an optical circuit for it.

The EON modeling adopted by SNetS considers the division between the network control and data planes. Figure 2 demonstrates the interaction between the client, and the EON control and data planes.

Each client request consists of a tuple $r(s, d, b, t)$, where s is the source node, d the destination node, b the requested bandwidth, and t the amount of granted time.

To serve a customer, the control plane analyzes which network resources are available, reserves resources and configures devices by establishing optical circuits. After the reservation of the resources, the client is notified and is enabled for the data transmission.

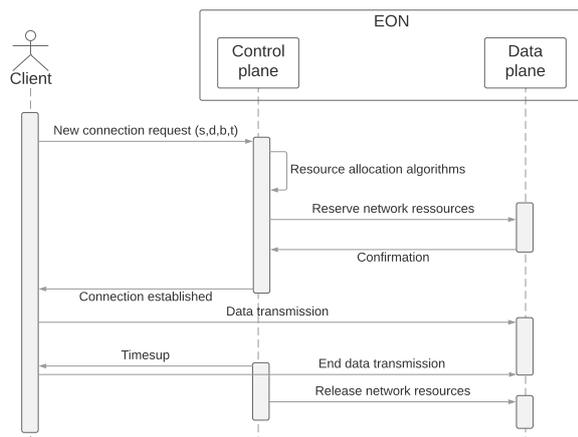


Fig. 2 Interaction between client, control plane and data plane in EON.

4.2 Resource allocation algorithms model

When receiving a request, the control plane must determine which network resources will be used to attend this request. Resource allocation algorithms are responsible for computing which resources will be used to attend each request.

After run the resource allocation algorithms, the control plane signal to BVTs, BV-WXCs and others network devices to establish the new circuits or to expand existing circuits and reserve the resources for the

new connection. After the connection time has expired, the control plan signals the end of the connection to the client. Finally, the network resources used by the connection are released.

The EON model used by SNetS considers the following classes of resource allocation algorithms: traffic aggregation[33], routing[10], modulation selection[10], spectrum allocation[10], and regenerator allocation[9]. In general, the execution of the algorithms follows the order in which they are listed.

The control plane modeled in the SNetS maintains all the active circuits, and this information is available to the algorithms of traffic aggregation. In this way the traffic aggregation algorithms can use the surplus capacity of the already established circuits to attend requests without the need to allocate new circuits. After, if a new optical circuit needs to be created, a transmitter must be allocated on the source node and a receiver on the destination node.

The routing phase consists of determining by which intermediate nodes a new circuit must pass between the source and destination node.

EONs allow the establishment of optical circuits with different modulation formats that must be configured both in the transmitter and receiver. The choice of the modulation format influences the spectral efficiency of the circuit and the robustness against noise in the optical signal.

The spectrum allocation algorithms define which portion of the optical spectrum will be used to fulfill a new request. Finally, the regenerator allocation algorithms determine which regenerators will be used in the network to regenerate the optical signal of the new circuit in order to enable communication through it.

Some resource allocation algorithms may be responsible for more than one of the steps described above, for example, the algorithms that perform routing, modulation format choice, and integrated spectrum allocation are presented in [30].

4.3 Optical node model in EON

From the point of view of physical devices, the EON can be defined as a set of nodes and optical links. The optical node model implemented by SNetS is in accordance with the one presented in [7] and [15]. Figure 3 presents the optical node model implemented by SNetS.

The BV-WXCs are responsible for switching the optical signal through flexible windows, adding flexibility of the EONs. Figure 3 presents an example of BV-WXC implementation using bandwidth variable selective switches (BV-SSS) [15]. SNetS abstracts the model

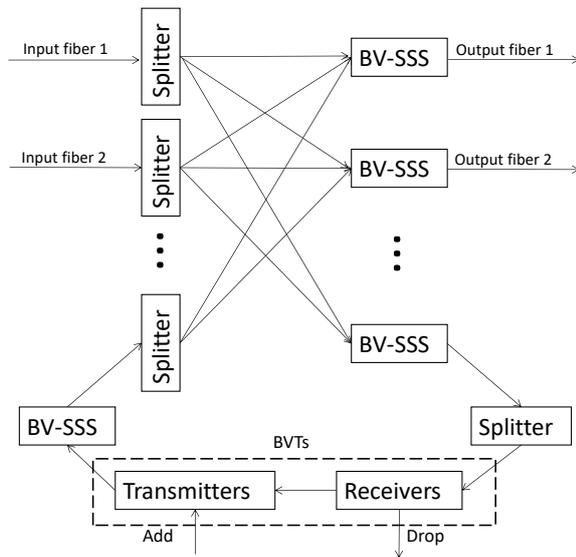


Fig. 3 Optical node model in EON.

presented in Figure 3, however it preserves the capabilities provided by the architecture.

Each optical node contains a set of receivers and transmitters that can be used to add or receive traffic from the optical network. In addition, receivers and transmitters can be used to make an optical-electro-optical conversion for the purpose of restoring optical signal quality. It is still possible to have a set of dedicated optical regenerators for this purpose.

The transmitters and receivers used in the EONs are called Bandwidth Variable Transceivers (BVTs), the BVTs have configurable central frequency and spectral amplitude. This capability allows the creation of channels with different bandwidths according to the requests arriving at the EON.

4.4 Optical spectrum model

The EON model used by SNetS divides the spectrum into fractions called spectrum slots. Typically, the literature divides the optical spectrum in frequency intervals of 12.5GHz and considers the use of 200 or 400 frequency slots. The SNetS model at the same time allows the spectral width and the number of used slots to be configured.

The spectrum of each link is modeled as a set of free slot bands. The figure 4 exemplifies how the optical spectrum is represented in a simplified scenario where the spectrum is divided into only 10 frequency slots.

A representation similar to that exemplified in Figure 4 is kept for each optical network link. This infor-

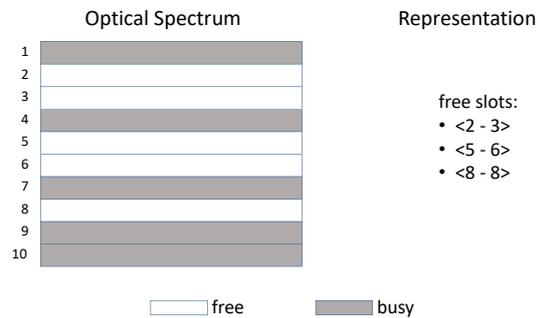


Fig. 4 Optical spectrum model.

mation is used by the resource allocation algorithms for the establishment of circuits, respecting continuity and spectral contiguity constraints [31].

4.5 Modeling of physical layer effects

In an OFDM elastic optical network, data are transmitted by n slots of modulated frequencies to create an optical circuit. The transmission range of the modulation level used is determined by the SNR relationship that corresponds to an acceptable BER (e.g., assuming error correction techniques for achieving a BER of 10^{-3}) [3, 16].

Figure 5 shows the assumed architecture of a route with a hop. From the left to the right in the figure, we have: (A) the transmitter laser in the BVT of the source node; (B) the BV-WXC of the source node; (C) the optical fiber; (D) the optical amplifier; (E) n spans; (F) the BV-WXC of the destination node; and (G) the receiver in the BVT of the destination node.

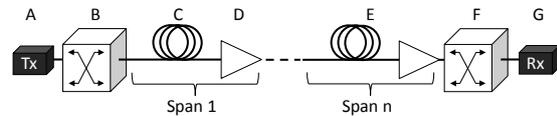


Fig. 5 Assumed architecture of a route with a hop.

The transmission range in the linear region of the optical OFDM is limited by the Amplified Spontaneous Emission (ASE) noise. In the non-linear region, the transmission range is limited by the nonlinearities of the fibre, which include Four-Wave-Mixing, Cross-Phase-Modulation, and Self-Phase Modulation [3].

The physical layer model presented in references [34, 17, 32] was used to calculate the SNR of a circuit. The calculation of the SNR for circuit i using route r_i is

expressed by:

$$SNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}}. \quad (1)$$

The variable I is the Power Spectral Density (PSD), where $I = P_{TX}/\Delta_f$, in which P_{TX} is the power of the signal and Δ_f is the bandwidth of the circuit. The PSD of the ASE noise is given by:

$$I_{ASE} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{ASE}^0, \quad (2)$$

where N_l is the number of spans of the link l and $I_{ASE}^0 = (G_{AMP} - 1)Fhv$. The variable F is the spontaneous emission factor, which is equal to half of the Noise Figure (NF) of the amplifier [3], h is Planck's constant, v is the light frequency and G_{AMP} is the gain of the optical amplifier. Equation 3 shows the PSD of the noise of nonlinear effects Nonlinear Impairments (NLI):

$$I_{NLI} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{NLI}^l, \quad (3)$$

where I_{NLI}^l is the PSD of the NLI noise in a single span of the link l and is expressed by [34]:

$$I_{NLI}^l = \frac{3\gamma^2 I^3}{2\pi\alpha|\beta_2|} \left(\epsilon + \sum_j \ln \left[\frac{\left(\Delta_{f_{ij}} + \frac{B_j}{2} \right)}{\left(\Delta_{f_{ij}} - \frac{B_j}{2} \right)} \right] \right), \quad (4)$$

$$\epsilon = \operatorname{arcsinh} \left(\frac{\pi^2 |\beta_2| B_i^2}{2\alpha} \right), \quad (5)$$

where j is another circuit using link l ; B_i and B_j are, respectively, the bandwidths for circuits i and j ; $\Delta_{f_{ij}}$ is the spacing from the central frequency between circuits i and j ; γ is the non-linear coefficient of the fiber; β_2 is the dispersion parameter of the fibre; and α is the power attenuation caused by the fiber.

4.6 Optical regenerator model

Translucent elastic optical networks have nodes with regeneration capacity, which allow to mitigate the degradation accumulated by the optical signal during its transmission by the network devices. In addition, they allow conversion of optical spectrum and modulation format. By allowing spectrum conversion, regenerators break the spectrum continuity constraint that optical circuits must meet in transparent optical networks. In the conversion of modulation format, the regenerators allow the same optical circuit to use different modulation formats in different transparent segments.

Two typical problems in translucent optical networks are the regenerator placement (RP) and the regenerator assignment (RA). The RP problem is an optimization problem that should be solved during the network planning stage. The objective of the RP problem

is to install a limited number of regenerators to minimize the impact of physical layer effects. This problem should also be dealt with by considering the costs that are introduced by the regenerators [13].

The RA problem must be solved during the operation network phase, when the optical circuits are established. The decision to regenerate an optical signal at a node is taken by the RA algorithm according to optical signal quality and the availability of regenerators at the node in question. An RA algorithm aims to allocate regenerators by minimizing circuit blocking due to low optical signal quality [13].

SNetS allows the placement of one bank of regenerators per node. A regenerator is composed of a transmitter and a receiver, which use optical-electronic-optical (OEO) conversion to regenerate signal quality. RP algorithms presented in the literature, such as Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement (MSU) or Node Degree First (NDF), can be used to define which nodes should have a bank of regenerators and the amount of regenerators in each bank.

The heuristics First Longest Reach Regenerator Assignment (FLR), First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment (FNS) and All Assignment of Regenerator (AAR) for regenerator allocation are already implemented in SNetS. Details about the MSU, FLR, FNS and AAR algorithms can be found in [8, 9, 13].

4.7 Traffic model in EON

The connection establishment requests during the simulations performed in the SNetS are generated from the request generators preconfigured for each experiment. For a single simulation, several request generators can be configured according to the intended traffic scenario.

Each traffic generator generates requests with pre-established bandwidth, source node, and destination node. In each traffic generator, the generation of new requests follows a Poissonian process with arrival rate λ and the duration time of the circuits is distributed exponentially with a mean of $1/\mu$.

4.8 Energy consumption model

In elastic optical networks, several components contribute to the network power consumption. The adopted energy consumption model [27] considers the contribution of the Bandwidth Variable Transceivers (BVTs), Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connects (BV-WXCs), and Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFAs).

The energy consumption of an OFDM transponder, considering a single subcarrier, can be as a function of

its transmission rate as shown in Equation 6. The energy consumption is expressed in Watts (W) in Equation 6, where TR (Gb/s) corresponds to the transmission rate of the transponder. The value 31.5 W corresponds to the additional power consumption achieved by the transponders.

$$PC_{OFDM}(W) = 1.25 * TR(Gbps) + 31.5. \quad (6)$$

The energy consumption of a BV-WXC depends on the node degree (n) and can be expressed as in Equation 7. The value 150 W corresponds to the additional power consumption per node.

$$PC_{WXC}(W) = n * 85 + 150. \quad (7)$$

The energy consumption of an amplifier is 30 W. And it also has an additional power consumption per amplifier location that corresponds to 140 W. Equation 8 corresponds to the energy consumption of the transponders, Equation 9 corresponds to the energy consumption of links and Equation 11 corresponds to the total energy consumption of an optical circuit.

$$PC_T(W) = slotsRequired * PC_{OFDM}, \quad (8)$$

$$PC_{LINKS}(W) = \varrho * (PC_{EDFAs} + PC_{WXC}), \quad (9)$$

$$\varrho = \frac{slotsRequired}{totalSlots}, \quad (10)$$

$$PC_{TOTAL}(W) = PC_T + PC_{LINKS}. \quad (11)$$

The *slotsRequired* variable corresponds to the number of slots required for the establishment of an optical circuit. The *totalSlots* variable corresponds the total number of slots in a network link.

5 Validation of the SNetS tool

Many of the technologies that support the implementation of EONs are still in development. Some devices required for the implementation of this type of optical network are not yet available in the market. In general, the implementation of optical networks has a high cost, and this makes not feasible the validation through comparison with data obtained through the measurement of a real network.

To the best of our knowledge, there are still no analytical models to determine metrics such as blocking probability or the use of network resources in the context of EONs. Because of this, the complete validation of EONs simulation tools is a difficult task, often omitted in the papers that deal with the subject [1, 11, 19, 6, 24].

As a way of mitigating non-validation due to technical difficulties, developers of simulation tools for EON

seek to use principles and techniques of software engineering to ensure that the implementation is in conformity with the model.

In addition to the techniques cited above, a related experiment was reported in [28]. The topology used was NSFNet, shown in Figure 6. 100,000 requests were generated, with bandwidth request values varying from 10 Gbps to 200 Gbps, evenly distributed. The degree of modulation m used was 2 bits per signal ($m = 2$) and 4 bits per signal ($m = 4$). Each link has 400 slots, with a frequency range of 10.0 GHz for each slot.

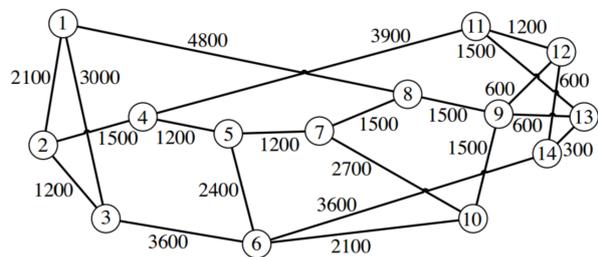


Fig. 6 NSFNet topology.

The traffic load is evenly distributed among all *pairs*(s, d). The generation of requests is a Poisson process of average arrival rate λ , and the mean retention time of the circuits is exponentially distributed with mean $1/\mu$. The network traffic intensity in Erlangs is given by $\rho = \lambda/\mu$. For each simulation, are performed 10 replications with different seeds of random variable generation. In all the results presented in this article, the confidence intervals are shown considering a confidence level of 95%.

For comparison, a load unit conversion was performed, in which the Erlang (ρ) representation was replaced by a Gbps measurement. To perform the conversion, the bps value is found through $\rho x C$, where $\rho x C$ is the average traffic in Erlangs and C is the average bit rate (equal to 105 Gbps in the experiments).

The algorithm evaluated was the K Shortests Paths (KSP), with quantity k of smaller paths equal to 1, 2 and 4. The Figure 7 presents the Blocking Probability values for the simulations with SNetS and the modeling proposed by [28].

The blocking probabilities presented in both graphs have close values. There is a great similarity between the behavior of the curves shown in Figure 7. The blocking probability value found by KSP 1 was higher than the other algorithms, both in the simulator and in the modeling of [28]. It is possible to perceive the proximity between the values of KSP 3 and KSP 5, which have close values at the highest load points. The intermedi-

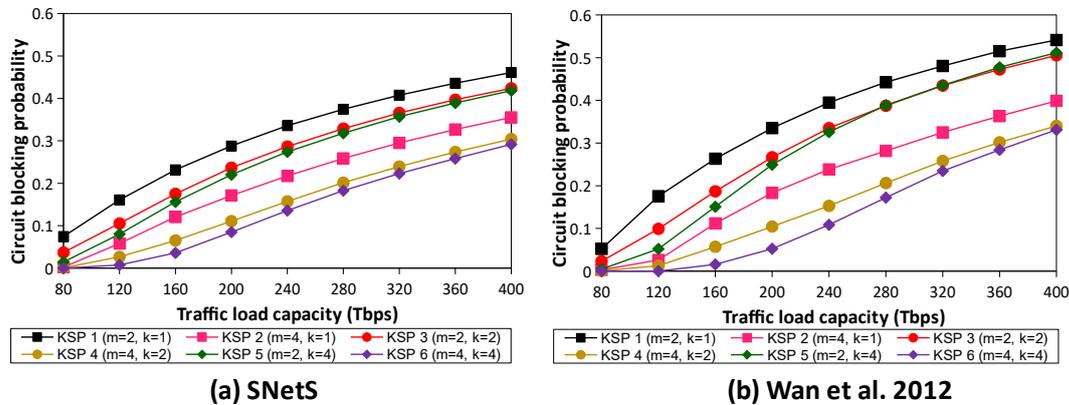


Fig. 7 Blocking probability values to simulations with SNetS and the model proposed in [28].

ate graphical arrangement of the values found by KSP 2 is also similar in both cases.

In SNetS configurations, request bandwidth values varies from 10 to 200 Gbps with 1Gbps granularity. In the model proposed in [28], the variation is also 10 to 200 Gbps, but not present the granularity of variation between the values of the specified range (10 to 200 Gbps). However, it is noticed that the use of the same traffic load allows us to arrive at results with similar behavior for the same algorithm, suggesting the validation of the SNetS tool with the model of [28].

6 Conclusion and future works

This work presented the SLICE Network Simulator (SNetS) simulation tool. The SNetS allows the simulation of elastic optical networks in a dynamic traffic scenario taking into account several the EONs features such as optical traffic aggregation, optical signal degradations in the physical layer, survival in EONs, among others.

In addition, the proposed simulation tool supports a resourceful set of performance evaluation metrics. This allows the characterization of the behavior of EONs with precision.

It was also presented the modeling of the EONs features implemented in the SNetS and a study of partial validation of the tool. It is worth mentioning that the unavailability of analytical models and the high cost to perform measurements in prototypes make it difficult to validate simulation tools for EONs. To the best of our knowledge, no simulation tool for EONs with integral validation was proposed.

In future works we intend to compare the results obtained in simulations with the SNetS and other simulation tools as a form of verification and strengthening of the partial validation presented in this work.

We also intend to explore the integration between the EONs features and the resourceful set of metrics implemented in SNetS to carry out performance evaluation studies of resource allocation algorithms, for example, the impact on energy consumption due to the use of different strategies of traffic aggregation.

References

1. Aibin, M., Blazejewski, M.: Complex elastic optical network simulator (CEONS). In: 2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1–4 (2015). DOI 10.1109/ICTON.2015.7193519
2. Barbosa, E.L.V., Brasileiro, I.B., Soares, A.C.B., d. R. Junior, J.V.: Energy efficiency analysis with different modulation formats in elastic optical networks. In: 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1–4 (2017). DOI 10.1109/ICTON.2017.8024735
3. 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* **31**(18), 3043–3054 (2013). DOI 10.1109/JLT.2013.2278572
4. Brasileiro, I.B., Soares, A.C.B., d. Reis, J.V.: Planning and evaluation of translucent elastic optical networks in terms of cost-benefit. In: 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1–4 (2017). DOI 10.1109/ICTON.2017.8025128
5. Brasileiro, I.B., Soares, A.C.B., dos Reis, J.V., Sanches, A.L.: A fuzzy solution to routing problem in elastic optical networks. In: 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1–4 (2016). DOI 10.1109/ICTON.2016.7550494
6. 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* pp. 1–9 (2017)
7. Chatterjee, B.C., Sarma, N., Oki, E.: Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials* **17**(3), 1776–1800 (2015). DOI 10.1109/COMST.2015.2431731

8. Chaves, D., Carvalho, R., Pereira, H., Bastos-Filho, C., Martins-Filho, J.: Novel strategies for sparse regenerator placement in translucent optical networks. *Photonic Network Communications* **24**(3), 237–251 (2012). DOI 10.1007/s11107-012-0384-9. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11107-012-0384-9>
9. Chaves, D.A.R., Cavalcante, M.A., Pereira, H.A., Almeida, R.C.: A case study of regenerator placement and regenerator assignment in dynamic translucent elastic optical networks. In: 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1–4 (2016). DOI 10.1109/ICTON.2016.7550658
10. Christodouloupoulos, K., Tomkos, I., Varvarigos, E.A.: Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology* **29**(9), 1354–1366 (2011). DOI 10.1109/JLT.2011.2125777
11. 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), pp. 1–12 (2016). DOI 10.1109/SCCC.2016.7836047
12. Fontinele, A., Lacerda, J., d. Reis, J., Soares, A., Campelo, D.: Protection considering power consumption and physical layer impairments in dynamic elastic optical networks. In: 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1–4 (2017). DOI 10.1109/ICTON.2017.8024734
13. Fontinele, A., Santos, I., Durães, G., Soares, A.: Achievement of fair and efficient regenerator allocations in translucent optical networks using the novel regenerator assignment algorithm. *Optical Switching and Networking* **19**, Part 1, 22 – 39 (2016). DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.osn.2015.10.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427715000879>
14. Fontinele, A., Santos, I., Neto, J.N., Campelo, D.R., Soares, A.: An efficient ia-rmlsa algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks* **118**, 1 – 14 (2017). DOI <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.03.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128617300634>
15. Frisken, S., Baxter, G., Abakoumov, D., Zhou, H., Clarke, I., Poole, S.: Flexible and grid-less wavelength selective switch using LCOS technology. In: 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, pp. 1–3 (2011)
16. Gao, G., Zhang, J., Wang, L., Gu, W., Ji, Y.: Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical OFDM networks. *IEEE Communications Letters* **18**(4), 672–675 (2014). DOI 10.1109/LCOMM.2014.021214.132628
17. Johannisson, P., Agrell, E.: Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology* **32**(23), 4544–4552 (2014). DOI 10.1109/JLT.2014.2361357
18. Jr, J.L., Fontinele, A., Moura, I., Soares, A.: Performance evaluation of survivability strategies for elastic optical networks under physical layer impairments. *CLEI Electronic Journal* **20**(2), 9:1–9:11 (2017). DOI 10.19153/cleiej.20.2.9. URL <http://www.clei.org/cleiej-beta/index.php/cleiej/article/view/28>
19. Kretsis, A., Christodouloupoulos, K., Kokkinos, P., Varvarigos, E.: Planning and operating flexible optical networks: Algorithmic issues and tools. *IEEE Communications Magazine* **52**(1), 61–69 (2014). DOI 10.1109/MCOM.2014.6710065
20. Lacerda, J., Fontinele, A., Moura, I., Soares, A.: The impact of physical layer impairment in survivability algorithms of elastic optical networks. In: 2016 XLII Latin American Computing Conference (CLEI), pp. 1–8 (2016). DOI 10.1109/CLEI.2016.7833342
21. R Core Team: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (2017). URL <https://www.R-project.org>
22. Ramaswami, R., Sivarajan, K., Sasaki, G.: *Optical Networks: A Practical Perspective*, 3rd Edition, 3rd edn. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA (2009)
23. Rosa, A., Cavdar, C., Carvalho, S., Costa, J., Wosinska, L.: Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. In: High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 2012 9th International Conference on, pp. 242–246 (2012). DOI 10.1109/HONET.2012.6421472
24. 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), pp. 1–4 (2014). DOI 10.1109/ICTON.2014.6876468
25. Santos, I.: SLICE network simulator. <https://github.com/iallengabio/SNetS> (2017)
26. Socrates-Dantas, J., Melo Silveira, R., Careglio, D., Amazonas, J., Sole-Pareta, J., Ruggiero, W.: A study in current dynamic fragmentation-aware RSA algorithms. In: Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on, pp. 1–4 (2014). DOI 10.1109/ICTON.2014.6876510
27. Vizcaíno, J.L., Ye, Y., Monroy, I.T.: Energy efficiency analysis for flexible-grid ofdm-based optical networks. *Computer Networks* **56**(10), 2400 – 2419 (2012). DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2012.03.012>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128612001053>. Green communication networks
28. 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* **4**(8), 603–613 (2012). DOI 10.1364/JOCN.4.000603
29. Wan, X., Wang, L., Hua, N., Zhang, H., Zheng, X.: Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks. In: Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference, pp. 1–3 (2011)
30. Wang, R., Mukherjee, B.: Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks. In: Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE, pp. 2907–2911 (2012). DOI 10.1109/GLOCOM.2012.6503558
31. 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* **4**(11), 906–917 (2012). DOI 10.1364/JOCN.4.000906
32. 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* **27**(12), 1250–1253 (2015). DOI 10.1109/LPT.2015.2415586

33. 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* **33**(1), 183–191 (2015). DOI 10.1109/JLT.2014.2383444
34. Zhao, J., Wymeersch, H., Agrell, E.: Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology* **33**(22), 4554–4564 (2015). DOI 10.1109/JLT.2015.2474130