



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SÉRGIO AMARAL DA SILVA

**ESTRATÉGIAS PARA ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES
ÓPTICAS ELÁSTICAS CONSIDERANDO AS PENALIDADES DA
CAMADA FÍSICA**

Tese de Doutorado

Recife
2025

SÉRGIO AMARAL DA SILVA

**ESTRATÉGIAS PARA ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES
ÓPTICAS ELÁSTICAS CONSIDERANDO AS PENALIDADES DA
CAMADA FÍSICA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações

Orientador: Prof^o. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho

Coorientador: Prof^o. Dr. Danilo Ricardo Barbosa Araújo

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva, Sergio Amaral da.

Estratégias para alocação de recursos em redes ópticas elásticas considerando as penalidades da camada física / Sergio Amaral da Silva. - Recife, 2025.

123f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2025.

Orientação: Carmelo José Albanez Bastos Filho.

Coorientação: Danilo Ricardo Barbosa Araújo.

1. Atribuição de espectro; 2. Atribuição de potência; 3. Penalidades da camada física; 4. Redes ópticas elásticas. I. Filho, Carmelo José Albanez Bastos. II. Araújo, Danilo Ricardo Barbosa. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

SERGIO AMARAL DA SILVA

“ESTRATÉGIA PARA ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS CONSIDERANDO AS PENALIDADES DA CAMADA FÍSICA”

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Comunicações.

Aprovada em: 25/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho
(Orientador e Examinador Interno)
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Daniel Augusto Ribeiro Chaves
(Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Karcus Day Rosário Assis
(Examinador Externo)
Universidade Federal da Bahia

Este trabalho é dedicado à minha esposa, Caroline Raíssa, pelo amor, compreensão, apoio e encorajamento nos desafios que enfrentei.

Agradecimentos

Agradeço,

A Deus, pela vida e por tudo que tem me concedido.

Ao meu pai, Luiz (*In memoriam*), e ao meu irmão, Sílvio, que deram suporte para que eu chegasse até aqui.

À minha querida mãe, Marlene (*In memoriam*), que não mediu esforços para favorecer minha evolução nos estudos.

Aos amigos e colegas, Felipe Lima e Mateus Lôbo, que me deram suporte em alguns momentos.

Aos professores Renato Cintra, Raul Camelo, Leonardo Didier, Valdemar Cardoso, Juliano Bandeira, José Sampaio e Carmelo José Albanez, que tiveram a nobreza de compartilhar comigo uma parte de seus conhecimentos.

Aos orientadores, Carmelo José Albanez Bastos Filho, Danilo Ricardo Barbosa de Araújo e Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior, que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Karcus Day Rosario Assis (UFBA), Daniel Augusto Ribeiro Chaves (UPE) e Joaquim Ferreira Martins Filho (UFPE) pelas sugestões de melhorias na Tese.

À minha esposa, Caroline Raíssa, por fazer parte da minha vida de forma tão intensa.

Se vós permanecerdes na minha palavra, verdadeiramente sereis meus discípulos. E conhecereis a verdade, e a verdade vos libertará. (Jesus Cristo) – João 8:31-32

Resumo

As Redes Ópticas Elásticas (EONs - *Elastic Optical Networks*) são cruciais para atender à crescente demanda por largura de banda, oferecendo flexibilidade na alocação de espectro e modulação. No entanto, enfrentam desafios como a degradação da qualidade da transmissão (QoT - *Quality of Transmission*) e o aumento da probabilidade de bloqueio (PB) devido ao tráfego intenso e a ruídos não lineares. Estratégias avançadas de alocação de recursos são fundamentais para otimizar o uso do espectro, lidar com tráfego dinâmico, suportar serviços diversos, reduzir custos e aumentar a confiabilidade do sistema. Neste contexto, a potência de lançamento da luz na fibra óptica é crucial para equilibrar a eficiência espectral e os efeitos das não linearidades, pois, em potências baixas, o sinal sofre degradação pela amplificação do ruído ASE, enquanto potências altas intensificam efeitos não lineares, como mistura de quatro ondas, auto-interferência do canal e interferência cruzada entre canais, que distorcem o sinal e limitam a transmissão. O ponto ideal de potência maximiza a relação sinal-ruído óptico (OSNR - *optical signal-to-noise ratio*) sem exacerbar as não linearidades, sendo essencial para sistemas que utilizam modulações avançadas, que exigem alta OSNR. Diante desse cenário, esta Tese de Doutorado visa contribuir para o avanço dessa tecnologia, propondo estratégias que busquem melhorar o desempenho das redes ópticas elásticas em termos de PB, com ênfase na melhoria da QoT por meio da atribuição de potência, visando à redução das penalidades da camada física e o uso eficiente do espectro. Para isso, são propostas duas abordagens de alocação de recursos: (1) P-MSCL (*Power and Min Slot-Continuity Capacity Loss* - potência e perda mínima de capacidade de continuidade de *slot*): Essa abordagem atribui a potência como um percentual da margem entre a OSNR mínima e máxima, com o objetivo de alcançar a melhor QoT possível, melhorar a eficiência espectral e reduzir a fragmentação, minimizando a perda de continuidade de capacidade de slots. (2) MO-PMRSA (*Multi-objective - Power, Modulation, Routing and Spectrum Allocation* - otimização multiobjetivo de potência, modulação, roteamento e alocação de espectro): Essa abordagem utiliza a otimização multiobjetivo para determinar simultaneamente a potência e o espectro, visando aos mesmos objetivos da abordagem anterior, mas de maneira integrada e baseada em múltiplos critérios. Foram utilizadas duas topologias de rede para as simulações: a NSFNET, com enlaces mais longos, e a DT14, com enlaces mais curtos. O objetivo foi examinar as estratégias em cenários com diferentes influências das penalidades na camada física, variando a carga de rede entre 100 e 200 Erlang, com incrementos de 20 Erlang. De acordo com os resultados, a estratégia P-MSCL proposta supera as estratégias adotadas como referência em até duas ordens de grandeza, enquanto a técnica MO-PRMSA proposta supera a estratégia P-MSCL em uma ordem de grandeza.

Palavras-chave: atribuição de espectro, atribuição de potência, penalidades da camada física, redes ópticas elásticas.

Abstract

Elastic Optical Networks (EONs) are crucial for addressing the increasing bandwidth demand, offering spectrum and modulation allocation flexibility. However, they face challenges such as degradation of the quality of transmission (QoT) and increased blocking probability (BP) due to heavy traffic and nonlinear noise. Advanced resource allocation strategies are essential to optimize spectrum utilization, handle dynamic traffic, support diverse services, reduce costs, and enhance system reliability. In this context, the launch power of light in optical fibers plays a critical role in balancing spectral efficiency and nonlinear effects. At low power levels, signals suffer degradation due to amplified spontaneous emission (ASE) noise. In contrast, high power levels amplify nonlinear effects such as four-wave mixing, self-channel interference, and cross-channel interference, distorting the signal and limiting transmission. The optimal power level maximizes the optical signal-to-noise ratio (OSNR) without exacerbating nonlinearities, a key requirement for systems employing advanced modulation formats that demand high OSNR. Against this backdrop, this Ph.D. Thesis aims to advance this technology by proposing strategies to improve the performance of EONs in terms of BP, focusing on enhancing QoT through power allocation, thereby reducing physical layer penalties and ensuring efficient spectrum utilization. Two resource allocation approaches are proposed: (1) P-MSCL (Power and Min Slot-Continuity Capacity Loss): This approach assigns power as a percentage of the margin between the minimum and maximum OSNR, aiming to achieve optimal QoT, improve spectral efficiency, and reduce fragmentation by minimizing slot continuity capacity loss. (2) MO-PMRSA (Multiobjective Power, Modulation, Routing, and Spectrum Allocation): This approach employs multiobjective optimization to determine power and spectrum allocation simultaneously, pursuing the same objectives as the previous approach but in an integrated and multi-criteria-based manner. Simulations were conducted using two network topologies: NSFNET, with longer links, and DT14, with shorter links. These simulations aimed to evaluate the strategies under scenarios with varying physical layer penalties, testing network loads between 100 and 200 Erlangs, in increments of 20 Erlangs. The results show that the proposed P-MSCL strategy outperforms reference strategies by up to two orders of magnitude. In contrast, the proposed MO-PMRSA technique outperforms the P-MSCL strategy by one order of magnitude.

Keywords: elastic optical networks, physical layer impairments, power assignment, spectrum assignment.

Lista de tabelas

1	Resumo dos parâmetros físicos envolvidos no cálculo da OSNR.	41
2	Parâmetros de simulação.	90

Lista de abreviaturas e siglas

AGN	<i>Additive Gaussian Noise</i> - Ruído Gaussiano Aditivo
AoD	<i>Architecture over Demand</i> - Arquitetura sob Demanda
APA	<i>Adaptative Power Assignment</i> - Atribuição de Potência Adaptativa
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i> - Emissão Espontânea Amplificada
BCO	<i>Bee Colony Optimization</i> - Otimização por Colônia de Abelhas
BER	<i>Bit Error Rate</i> - Taxa de Erro de Bit
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> - Chaveamento de Deslocamento de Fase Binária
BVT	<i>Bandwidth-Variable Transponder</i> - Transceptor de Banda Variável
BV-WSS	<i>Bandwidth-Variable WSS</i> - Chave Seletiva de Comprimento de Onda de Banda Variável
BV-WXC	<i>Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects</i> - Cruzador de Conexões de Comprimento com Onda de Largura de Banda Variável
CAC	<i>Call Admission Control</i> - Controle de Admissão de Chamadas
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> - Custo de Implantação
CD	<i>Chromatic Dispersion</i> - Dispersão Cromática
CLIB	<i>Constrained Lower Indexed Block</i> - Bloco Indexado Inferior Restrito
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> - Densa Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda
ECC	<i>Error Correction Code</i> - Código Corretor de Erro
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> - Amplificador a Fibra Dopada com Érbio
EON	<i>Elastic Optical Networks</i> - Rede Óptica Elástica
FAR	<i>Fixed-Alternative Routing</i> - Roteamento Fixo-Alternativo
FEC	<i>Forward Error Correction</i> - Correção de Erro de Encaminhamento

FR	<i>Fixed Routing</i> - Roteamento Fixo
FWM	<i>Four-wave Mixing</i> - Mistura de Quatro Ondas
GN	<i>Gaussian Noise</i> - Ruído Gaussiano
IGN	<i>Incoherent Gaussian Noise</i> - Ruído Gaussiano Incoerente
IoT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
KDAP	<i>K-Distance Adaptive Paths</i> - K-Caminhos Adaptados à Distância
LCoS	<i>Liquid Crystal on Silicon</i> - Cristal Líquido no Silício
LCR	<i>Least Congested Routing</i> - Roteamento Menos Congestionado
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i> - Sistemas Microeletromecânicos
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i> - Programação Linear Inteira Mista
MSCL	<i>Min Slot-Continuity Capacity Loss</i> - Mínima Perda de Capacidade de Continuidade de Slots
NLI	<i>Non-Linear Interference</i> - Interferência Não Linear
NLSE	<i>Non-linear Schrödinger Equation</i> - Equação Não Linear de Schrödinger
NSGA	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm</i> - Algoritmo Genético de Ordenação Não Dominada
NWDM	<i>Nyquist Wavelength Division Multiplexing</i> - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda de Nyquist
OFDM	<i>Orthogonal Frequency, Division Multiplexing</i> - Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i> - Relação Sinal-Ruído Óptico
OTN	<i>Optical Transport Network</i> - Rede de Transporte Óptico
PIC	<i>Photonic Integrated Circuit</i> - Circuito Integrado Fotônico
PLI	<i>Physical Layer Impairment</i> - Penalidade da Camada Física
PMRSA	<i>Power, Modulation Routing and Spectrum Assignment</i> - Potência, Modulação, Roteamento e Alocação de Espectro
PSD	<i>Power Spectral Density</i> - Densidade Espectral de Potência
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> - Modulação de Amplitude e Quadratura

QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> - Chaveamento por Deslocamento de Fase em Quadratura
QoS	<i>Quality of Signal</i> - Qualidade do Sinal
QoT	<i>Quality of Transmission</i> - Qualidade da Transmissão
RA	<i>Regenerator Assignment</i> - Atribuição de Regeneradores
RMSA	<i>Routing, Modulation and Spectrum Assignment</i> - Roteamento, Modulação e Atribuição de Espectro
RP	<i>Regenerator Placement</i> - Alocação de Regeneradores
RSA	<i>Routing and Spectrum Assignment</i> - Roteamento e Alocação de Espectro
SCI	<i>Self-channel Interference</i> - Interferência Própria do Canal
UT	<i>Uncompensated Transmission</i> - Transmissão Não Compensada
XCI	<i>Cross-channel Interference</i> - Interferência entre Canais
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda
WSS	<i>Wavelength Selective Switches</i> - Chaves Seletoras de Comprimento de Onda

Lista de símbolos

α	Coeficiente de atenuação da fibra óptica [dB/km]
γ	Coeficiente de não linearidade da fibra óptica [$\text{W}^{-1} \cdot \text{Km}^{-1}$]
β_2	Coeficiente de dispersão de segunda ordem da fibra óptica [s^2/Km]
Δf	Largura de banda de um canal [GHz]
A	Perda no <i>span</i> [dB]
Γ	Ganho do amplificador [dB]
N_s	Número de <i>spans</i> de uma rota
F_n	Figura de ruído do amplificador [dB]
B_0	Largura de banda de referência [GHz]
b_{symbol}	Número de bits por símbolo
f_m	Frequência central de um canal [GHz]
$f_{m,n}$	Distância entre as frequências centrais de dois canais [GHz]
G	Densidade espectral de potência de um sinal
p	Número de modos de polarização
\mathcal{D}	Conjunto de conexões
$\mathcal{LP}_{s,d}$	Conjunto de todos os k caminhos candidatos entre dois nós
\mathcal{R}	Conjunto de todas as taxas de bits disponíveis
\mathcal{M}	Conjunto de todos os níveis de modulação disponíveis
$\mathcal{SM}(M, K)$	Matriz de conjuntos de <i>slots</i>
$\mathcal{SCI}(M, K)$	Matriz de SCIs relacionadas a cada rota e nível de modulação
$\mathcal{XCI}(M, K)$	Matriz de XCIs relacionadas a cada rota e nível de modulação
$\mathcal{ASE}(M, K)$	Vetor de ruídos ASE relacionados a cada rota

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
1.2	Justificativa	20
1.3	Organização do trabalho	21
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	23
2.1	Redes Ópticas Elásticas	23
2.2	Arquitetura de uma EON	24
2.2.1	Transceptores de largura de banda variável	25
2.2.2	ROADM	27
2.2.3	Comutador de largura de banda variável	28
2.2.4	Enlaces ópticos	29
2.3	Arquitetura de Nó para Redes Ópticas Elásticas	30
2.3.1	<i>Broadcast-and-select</i>	31
2.3.2	<i>Spectrum routing</i>	31
2.3.3	<i>Switch-and-select</i> com funcionalidade dinâmica	32
2.3.4	Arquitetura sob demanda	33
2.4	Regeneração	33
2.5	Estimando as não-linearidades	36
2.6	Estimando o ruído ASE	37
2.7	Avaliação da qualidade da transmissão	38
2.7.1	OSNR	38
2.7.2	Comportamento da OSNR em função da potência	39
2.7.3	Taxa de erro de bit	42
2.8	Avaliação da rede	43
2.9	Roteamento	44
2.9.1	Roteamento fixo	44
2.9.2	Roteamento fixo-alternativo	44
2.9.3	Roteamento adaptativo	45
2.9.4	Roteamento menos congestionado	45
2.9.5	Roteamento baseado em menor caminho - <i>Shortest Path Routing</i>	46
2.9.6	Roteamento baseado na QoT	46

2.9.7	Roteamento baseado em disponibilidade de espectro - <i>Spectrum-Aware Routing</i>	46
2.10	Alocação de espectro	46
2.10.1	<i>First-Fit</i>	46
2.10.2	<i>Random-Fit</i>	47
2.10.3	<i>Last-Fit</i>	47
2.10.4	<i>First-Last-Fit</i>	47
2.10.5	<i>Least-Used</i>	48
2.10.6	<i>Most-used</i>	48
2.10.7	<i>Exact-Fit</i>	48
2.10.8	<i>MSCL</i>	48
2.11	Optimização multiobjetivo	49
2.11.1	Conceitos fundamentais	49
2.11.2	Algoritmos de Otimização Multiobjetivo	50
2.11.3	Desafios e aplicabilidades	50
2.12	Algoritmo NSGA-II	51
2.12.1	Características do NSGA-II	51
2.12.2	Etapas do NSGA-II	52
2.12.3	Aplicações do NSGA-II	52
2.12.4	Vantagens e limitações	52
3	REVISÃO DA LITERATURA	53
3.1	O surgimento	53
3.2	Percorrendo o caminho até os avanços mais recentes	56
3.2.1	RSA estático	57
3.2.2	RSA dinâmico	60
3.2.3	RSA com adaptação à distância	62
3.2.4	Fragmentação	65
3.2.5	Agregação de tráfego	68
3.2.6	Alocação e atribuição de regeneradores	70
3.2.7	Eficiência energética	75
3.3	Recentes avanços em alocação de recursos em EONs	79
3.4	Considerações finais	85
4	METODOLOGIA	87
4.1	Hipótese	87
4.2	Método de pesquisa	88
4.3	Modelo da rede	91
4.4	Técnicas propostas	92
4.4.1	Alocação de recursos através da heurística P-MSCL	92

4.4.1.1	Descrição das etapas	93
4.4.1.2	Estratégia de alocação de recursos	95
4.4.1.3	Análise comparativa com as técnicas <i>Just Enough</i> e <i>Maximum Power</i>	95
4.4.2	Alocação de recursos através da otimização multiobjetivo	96
4.4.2.1	Descrição das etapas	97
4.4.2.2	Definição geral do problema	99
4.4.2.3	Menor distância para a solução ideal	100
4.4.2.4	Estratégia de alocação	101
4.5	Conclusão	101
5	RESULTADOS	103
5.1	Alocação de recursos através da heurística P-MSCL	103
5.2	Alocação de recursos através da otimização multiobjetivo	107
6	CONCLUSÃO	112
6.1	Considerações finais	114
6.1.1	Limitações do trabalho	114
6.1.2	Trabalhos futuros	115
	REFERÊNCIAS	116

Capítulo

1

Introdução

Desde os tempos antigos, a comunicação tem sido uma necessidade primordial entre as pessoas, o que gerou o desenvolvimento de sistemas para transmitir mensagens a longas distâncias. Um dos primeiros métodos de comunicação óptica conhecidos foi o sinal de incêndio utilizado pelos gregos no século VIII a.C., empregado para enviar pedidos de ajuda ou anunciar eventos importantes. No entanto, devido às limitações tecnológicas da época, poucas melhorias ocorreram neste tipo de sistema. Foi apenas com a invenção do laser, no início dos anos 1960, que as frequências ópticas coerentes proporcionaram uma capacidade de comunicação 100.000 vezes superior à dos sistemas de micro-ondas (KEISER, 2011; AGRAWAL, 2021).

Ao mesmo tempo, reconheceu-se que a fibra óptica poderia fornecer um meio de transmissão mais confiável, sem estar sujeita a condições ambientais adversas. Contudo, as fibras ópticas iniciais apresentavam perdas superiores a 1.000 dB/km, tornando seu uso impraticável. Em 1966, Kao e Hockham (1966) sugeriram que tais perdas se deviam a impurezas no material, e que a sua remoção tornaria a fibra viável para a comunicação. Essa hipótese levou, em 1970, à fabricação da primeira fibra óptica ultrapura, abrindo caminho para a implementação de redes ópticas em todo o mundo a partir de 1978. As principais vantagens das redes ópticas incluem alta capacidade de transmissão, imunidade à interferência elétrica e maior segurança (KEISER, 2011; AGRAWAL, 2021).

As redes ópticas consistem em cabos de fibra que transportam canais de luz e em equipamentos de processamento da luz ao longo da fibra. A evolução dessas redes foi marcada por mudanças tecnológicas significativas, com a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) sendo uma das mais importantes. O WDM divide o espectro óptico em múltiplas bandas de comprimento de onda, cada uma suportando um canal de comunicação distinto, permitindo a transmissão simultânea de dados em vários comprimentos de onda. Isso aumenta a capacidade da rede ao usar melhor a largura de banda da fibra (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010; MUKHERJEE, 2006).

A banda C da fibra óptica, que abrange comprimentos de onda entre 1530 nm e 1565 nm, apresenta as menores perdas e é amplamente utilizada para transmissões de longa distância. A

introdução do WDM denso (DWDM - *Dense WDM*) e a subsequente redução do espaçamento entre os canais permitiram o transporte de até 96 canais, cada um com capacidade de 100 Gb/s (LÓPEZ; VELASCO, 2016).

Com o aumento exponencial da demanda por dados, tornou-se essencial desenvolver técnicas capazes de explorar ao máximo a capacidade das fibras ópticas já implantadas. Uma dessas inovações em redes ópticas é a utilização da modulação de amplitude em quadratura (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*), que viabiliza taxas de transmissão de até 200 Gb/s. No entanto, apresenta uma limitação devido à sua sensibilidade à relação sinal-ruído óptico (OSNR - *Optical Signal-to-Noise Ratio*), o que compromete a distância de transmissão e reforça a necessidade de redes mais eficientes (LÓPEZ; VELASCO, 2016).

Nesse contexto, as redes ópticas elásticas (EONs - *Elastic Optical Networks*) emergem como uma solução promissora para superar os limites de banda das fibras ópticas existentes, otimizando recursos e minimizando custos na implantação de novas redes. Proposta por Jinno et al. (2009), a EON possibilita a alocação flexível do espectro, dividindo-o em *slots* de frequência menores e atribuindo diferentes quantidades de *slots* conforme as necessidades de cada conexão. Essa abordagem, como descrito em Jinno (2017), permite adaptar dinamicamente os recursos às demandas do tráfego, resultando em uma utilização significativamente mais eficiente do espectro em comparação com as redes WDM tradicionais, além de contribuir para a economia de recursos e a sustentabilidade do crescimento das redes ópticas.

A alocação de recursos em redes ópticas refere-se ao processo de distribuição e gestão eficiente dos recursos disponíveis na rede para atender às demandas de tráfego de forma dinâmica e flexível.

Em EONs, o processo de alocação de recursos envolve, dentre outros:

- **Seleção de rota:** escolha do caminho óptico entre o transmissor e o receptor.
- **Alocação de espectro:** definição da faixa de frequência que será utilizada para a transmissão. Isso inclui a escolha do *slot* de frequência e da largura de banda necessária.
- **Atribuição de modulação:** seleção do esquema de modulação mais adequado para a transmissão, considerando fatores como distância e qualidade da transmissão.
- **Gerenciamento de conflitos:** garantir que não haja sobreposição ou interferência entre os diferentes canais ópticos.

Em resumo, a alocação de recursos em redes ópticas elásticas é um processo complexo, mas essencial para maximizar a eficiência e a capacidade das redes ópticas modernas, especialmente em cenários com alta demanda e tráfego variável.

O problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA - *Routing and Wavelength Assignment*) é um dos principais desafios nas redes WDM, consistindo na definição simultânea do caminho físico que um sinal óptico deve percorrer e do comprimento de onda

a ser utilizado em cada enlace. Esse problema é regido por restrições como a continuidade do comprimento de onda ao longo do trajeto, a indisponibilidade de comprimentos de onda compartilhados em um mesmo enlace e a necessidade de evitar a fragmentação espectral, que reduz a eficiência da utilização dos recursos. Decisões subótimas no RWA podem levar a um aumento na probabilidade de bloqueio (PB) de conexões, fragmentação do espectro e uso ineficiente da capacidade da rede. Para enfrentá-lo, empregam-se heurísticas, modelos de otimização e algoritmos evolutivos que buscam balancear eficiência e custo computacional. Com o avanço para EONs, o problema de RWA se transforma no desafio de roteamento e alocação de espectro (RSA - *Routing and Spectrum Assignment*) e, mais recentemente, algumas pesquisas começaram a incluir novos graus de liberdade, tais como a modulação e a potência de lançamento de luz na fibra óptica. Isso evolui o problema para um (PMRSA - *Power, Modulation, Routing and Spectrum Assignment*), introduzindo maior flexibilidade e complexidade na gestão de recursos em relação ao RSA.

Como mencionado anteriormente, o problema de PMRSA em EONs é mais complexo e envolve restrições de continuidade e contiguidade no uso dos *slots* de frequência. Adicionalmente, o problema de PMRSA é considerado NP-completo, o que torna necessário o desenvolvimento de métodos eficientes para sua solução em tempos aceitáveis. Nesse cenário, as EONs se destacam pela sua flexibilidade e capacidade de lidar com grandes volumes de dados, mas também trazem novos desafios, como a consideração da potência de lançamento da luz e a eficiência espectral (JINNO et al., 2009; SALEH; SIMMONS, 2011; CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; CALDERON et al., 2020; SENA et al., 2022; SANTOS; ABRÃO, 2022).

Embora a literatura ofereça diversas soluções para os desafios das EONs, a maioria foca apenas no roteamento e na alocação de espectro, sem considerar questões relacionadas às penalidades da camada física, como a potência de lançamento da luz e sua influência na qualidade da transmissão (QoT). Além disso, poucos estudos exploram a otimização multiobjetivo para balancear diferentes critérios, como eficiência espectral e QoT (POGGIOLINI et al., 2014; YAN et al., 2015; VALE; ALMEIDA, 2019).

Assim, esta tese propõe o desenvolvimento de estratégias de alocação de recursos em EONs que considerem as penalidades da camada física através do controle da potência de lançamento da luz na fibra óptica, o uso eficiente do espectro, a QoT e a capacidade de alocação dos enlaces. Essas estratégias visam melhorar o desempenho das redes em termos de probabilidade de bloqueio, contribuindo para o planejamento e operação de EONs, ao fornecer ferramentas que auxiliem na tomada de decisões sobre a instalação de dispositivos e no gerenciamento de recursos para maximizar a eficiência espectral e minimizar custos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Propor estratégias para alocação de recursos para redes ópticas elásticas, considerando penalidades da camada física, a eficiência e a fragmentação espectral, visando melhorar o desempenho da rede em termos de redução da probabilidade de bloqueio.

1.1.2 Objetivos específicos

- (i) Oferecer uma análise que identifica os principais fatores e seu impacto na QoT.
- (ii) Propor uma heurística para a alocação de recursos para um canal em uma EON que leve em conta tanto a eficiência espectral quanto as restrições decorrentes das penalidades da camada física.
- (iii) Propor uma abordagem baseada em otimização multiobjetivo para resolver o problema de potência, modulação, roteamento e alocação de espectro (PMRSA) em EONs, maximizando a eficiência espectral e a QoT.
- (iv) Desenvolver uma ferramenta de simulação capaz de testar as estratégias propostas em diferentes topologias de redes.
- (v) Apresentar uma análise da eficácia das estratégias propostas para determinar contextos de aplicação apropriados para cada técnica.
- (vi) Apresentar uma comparação dos resultados de desempenho das estratégias propostas com outros métodos de alocação de recursos do estado da arte.

1.2 Justificativa

O aumento exponencial na demanda por taxas de transmissão, impulsionado principalmente pelo crescimento contínuo do tráfego de Internet, tem gerado a necessidade de ações inovadoras para melhorar o desempenho das redes de comunicação óptica. Entre essas ações, destacam-se o uso sistemático de redes dinâmicas, como as EONs, o aprimoramento da eficiência espectral e a expansão da banda de transmissão, com o objetivo de atender às exigências crescentes de dados.

A comunicação em qualquer enlace de uma EON está inevitavelmente sujeita a penalidades impostas pela camada física que afetam a QoT. Pesquisas recentes, como em Ives, Bayvel e Savory (2015), Yan et al. (2017), Santos e Abrão (2022), utilizam o modelo GN para tratar a potência de lançamento dos canais na fibra óptica, abrindo novas perspectivas para a alocação de recursos com a introdução de um grau adicional de liberdade no problema de RMSA.

Diante deste cenário, a proposta de uma nova abordagem para a alocação de recursos em EONs, que leve em consideração múltiplos objetivos conflitantes, como a PB, economia de espectro, aumento da margem de OSNR, perda de capacidade de alocação espectral nos enlaces e a redução das interferências não lineares, é de grande relevância. Tal abordagem tem o potencial de aumentar o desempenho das redes, representando uma melhoria na tecnologia de comunicações ópticas.

A relevância desta pesquisa reside no fato de que, até o momento, os estudos existentes na literatura não exploraram de forma integrada a otimização multiobjetivo aplicada à alocação de recursos em EONs, combinando a perda de capacidade nos enlaces, a atribuição de espectro de acordo com a taxa de transmissão e as PLIs.

Ao desenvolver estratégias que considerem simultaneamente esses fatores, espera-se obter melhorias significativas no desempenho das redes, especialmente em termos de economia de espectro e redução da probabilidade de bloqueio.

Portanto, esta proposta de pesquisa justifica-se pela lacuna existente na literatura e pelo potencial de inovação no planejamento e operação de redes ópticas elásticas, com impacto direto na eficiência da comunicação óptica em cenários de alta demanda de tráfego. O desenvolvimento de estratégias integradas, que considerem as PLIs e a otimização do uso de espectro e potência, é essencial para garantir a escalabilidade e a confiabilidade das redes de próxima geração.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

- O Capítulo 2 - Fundamentos Teóricos: Apresenta os fundamentos que servem de base para pesquisa, como a arquitetura, os dispositivos e técnicas clássicas de roteamento e de alocação de espectro.
- Capítulo 3 – Revisão da Literatura: Explora os principais conceitos e trabalhos relacionados ao tema, oferecendo uma revisão do estado da arte sobre alocação de recursos em redes ópticas elásticas.
- Capítulo 4 – Metodologia: Detalha os métodos e técnicas utilizados na pesquisa, descrevendo o modelo matemático proposto, as ferramentas computacionais adotadas, os cenários de simulação e os parâmetros considerados para a avaliação das estratégias de alocação de recursos.
- Capítulo 5 – Resultados e Discussão: Apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo proposto, comparando-os com outras abordagens existentes na literatura. Discute-se a eficácia das soluções em termos de probabilidade de bloqueio, QoT e uso eficiente do espectro.

- Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros: Sintetiza as principais conclusões do estudo, destacando as contribuições da pesquisa. Aponta as limitações do trabalho e sugere direções para pesquisas futuras.

Capítulo

2

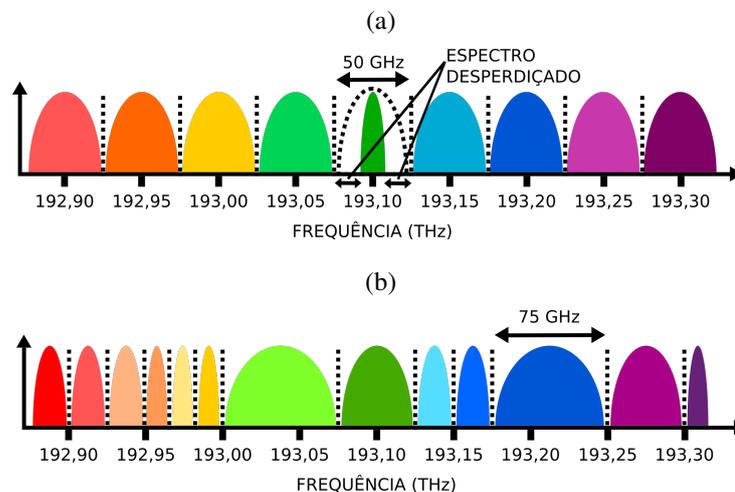
Fundamentos Teóricos de Redes Ópticas Elásticas

Este capítulo tem como objetivo apresentar a base teórica que embasa esta pesquisa, fornecendo uma revisão da literatura sobre EONs. Assim, são discutidos os conceitos fundamentais das EONs e suas tecnologias.

2.1 Redes Ópticas Elásticas

A fibra óptica possibilita a transmissão de dados em um conjunto de comprimentos de onda, ou espectro. As redes que permitem alocações na chamada grade fixa são as redes WDM. No padrão de grade fixa ITU-T G.694.1, as frequências devem estar separadas por 12,5, 25, 50 ou 100 GHz. Dessa forma, se os canais transportarem uma largura de banda inferior ao padrão, uma parte do espectro será desperdiçada, como mostrado na Figura 1a (CHATTERJEE, 2020).

Figura 1 – Esquema de alocação de espectro em (a) grade fixa (b) grade flexível.



Fonte: Adaptado de (LÓPEZ; VELASCO, 2016; CHATTERJEE, 2020).

Para superar essa limitação, Jinno et al. (2009) Jinno et al. (2009) apresentaram as EONs, baseadas na tecnologia de multiplexação por divisão ortogonal de frequência (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que transmitem um fluxo de dados de alta velocidade dividindo-o em vários canais ortogonais, chamados subportadoras, cada um carregando uma taxa de dados mais baixa. Comparada ao sistema WDM, no qual um espaçamento fixo entre os canais de comprimentos de onda é geralmente necessário para eliminar a *crosstalk*, a EON com tecnologia OFDM permite que o espectro das subportadoras individuais se sobreponha devido à sua ortogonalidade, o que aumenta a eficiência espectral de transmissão. Além disso, a chamada grade flexível possibilita a alocação dinâmica e adaptativa do espectro óptico, pois, como o espectro é dividido em fatias menores, essas podem ser combinadas conforme necessário, formando canais com maiores larguras de banda e ajustando-as conforme a demanda, evitando desperdícios.

Outro esquema utilizado em EONs é baseado no WDM de subcanais que possuem um espectro quase retangular com largura de banda próxima ao limite de Nyquist, o que permite a transmissão sem interferência intersimbólica. Nesse esquema, os subcanais são alinhados com espaçamento de frequência próximo à taxa de transmissão, correspondente ao limite de Nyquist, evitando assim a sobreposição espectral entre eles. Esse método é conhecido como Nyquist-DWDM (NDWDM). As subportadoras são moldadas espectralmente para ocupar uma granularidade mais fina, correspondente à taxa de transmissão. Essas subportadoras estreitas são multiplexadas no transmissor com espaçamento próximo ou igual à taxa de transmissão, formando um supercanal Chatterjee (2020). Dessa forma, a frequência de um canal pode ser qualquer múltiplo de 6,25 GHz a partir da frequência central de 193,1 THz, com largura de banda em múltiplos de 12,5 GHz, o que contribui significativamente para melhorar a eficiência espectral, uma vez que os canais são transmitidos de forma mais densa (LÓPEZ; VELASCO, 2016; HALL et al., 2021).

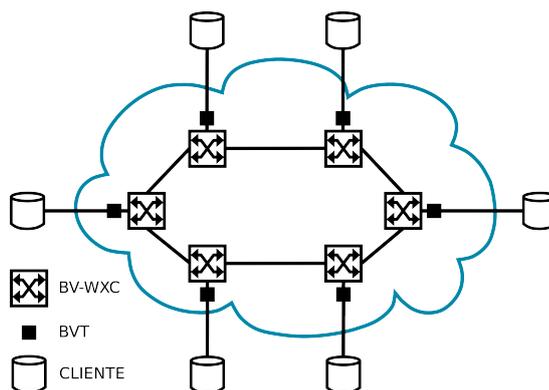
Diante dos benefícios mencionados, as EONs trazem novos desafios no contexto da alocação de recursos. Devido a esses desafios, novas abordagens têm surgido a partir de recentes esforços de pesquisa, que são discutidas em detalhes no Capítulo 3.

2.2 Arquitetura de uma EON

Os avanços nas tecnologias de transmissão óptica, como a introdução de formatos avançados de modulação, transceptores de largura de banda variável (BVTs - *Bandwidth Variable Transponders*) e comutadores de largura de banda variável (BV-WXCs - *Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connects*), possibilitaram o transporte de grandes volumes de tráfego em longas distâncias, favorecendo o surgimento das EONs. O principal objetivo das EONs é proporcionar um transporte de dados eficiente, por meio do estabelecimento de caminhos ópticos com uso eficiente do espectro. Assim, a largura de banda do canal óptico (caminhos de luz) é determinada pelo volume de tráfego do cliente e pelos parâmetros da rota, como o comprimento dos *spans* e

enlaces, OSNR, entre outros. Esses canais são alocados através do controlador de rede (*SDN Controller - Software-Defined Networking Controller*), dispositivo central que, em conjunto com os ROADMs e BVTs, aloca canais que são enviados através dos BV-WXCs até o receptor Chatterjee, Sarma e Oki (2015), López e Velasco (2016), Chatterjee (2020). Assim, a arquitetura de uma EON é composta por enlaces ópticos, BVTs, ROADMs e BV-WXCs conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Arquitetura de uma EON.



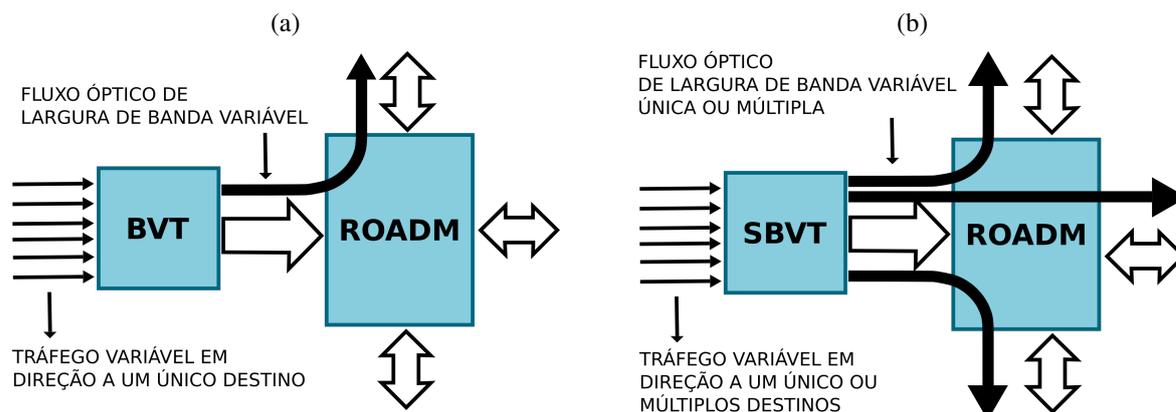
Fonte: Adaptado de (CHATTERJEE, 2020).

2.2.1 Transceptores de largura de banda variável

Um BVT (Figura 3a) é um dispositivo utilizado em EONs para permitir a transmissão de dados de forma adaptativa, ajustando a largura de banda e o formato de modulação conforme as condições da rede e as demandas de tráfego. Diferente dos transceptores tradicionais, que operam com largura de banda e modulação fixas, os BVTs podem modificar dinamicamente esses parâmetros para melhorar o uso do espectro óptico. No entanto, há um compromisso entre eficiência espectral e alcance: quanto maior a eficiência espectral, menor o alcance, e vice-versa. Isso ocorre porque os formatos de modulação de ordem superior exigem maior OSNR, a qual diminui com o aumento da distância (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; CHATTERJEE, 2020).

Como os BVTs podem ajustar a eficiência espectral em função do alcance, quando operam abaixo de sua capacidade máxima devido às penalidades do caminho óptico, parte de sua capacidade pode ser subutilizada. Para resolver esse problema, foram introduzidos os BVTs segmentáveis (S-BVTs - *Slaceable BVTs*) (Figura 3b), que têm a capacidade de alocar um ou mais fluxos ópticos, permitindo a transmissão para um ou mais destinos simultaneamente. Dessa forma, quando um S-BVT é usado para gerar um canal de baixa taxa de bits, sua capacidade ociosa pode ser aproveitada para transmitir outros fluxos de dados independentes. Assim, os fluxos ópticos podem ser agregados ou segmentados conforme as necessidades de tráfego (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; LÓPEZ; VELASCO, 2016; CHATTERJEE, 2020).

Figura 3 – Funcionalidade do (a) BVT (b) S-BVT.

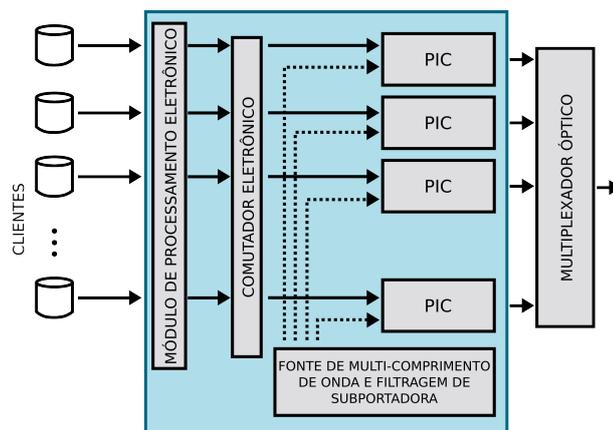


Fonte: Adaptado de (CHATTERJEE, 2020).

A Figura 3 ilustra as diferenças entre BVT e S-BVT. Um S-BVT suporta a segmentação com múltiplas taxas de bits, formatos de modulação e códigos adaptáveis, funcionando como se fosse composto por diversos transceptores virtuais, possibilitando atender a diferentes aplicações em paralelo. A arquitetura de um S-BVT, conforme ilustrado na Figura 4, consiste principalmente em uma fonte de n subportadoras igualmente espaçadas, um módulo de processamento eletrônico, um comutador eletrônico, um conjunto de n circuitos integrados fotônicos (PICs - *Photonic Integrated Circuits*) e um multiplexador óptico. As n subportadoras podem ser geradas por uma única fonte de múltiplos comprimentos de onda ou por n (LASERS - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), um para cada subportadora. Cada cliente é processado no domínio eletrônico e, em seguida, roteado pela matriz de comutação para um PIC específico. As subportadoras geradas são igualmente espaçadas de acordo com os requisitos espectrais e a técnica de transmissão adotada. Cada PIC é utilizado como um transceptor de portadora única, gerando diferentes sinais modulados. Por fim, as subportadoras são agregadas pelo multiplexador óptico para formar um supercanal ou podem ser segmentadas e direcionadas para portas de saída específicas, conforme as necessidades de tráfego (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; CHATTERJEE, 2020; LÓPEZ; VELASCO, 2016).

Para ilustrar o funcionamento desses recursos, consideremos um nó na EON conforme ilustrado na Figura 5, na qual o tráfego dos clientes é encaminhado para os BVTs, mas o número de fluxos de tráfego atribuídos a eles muda dinamicamente. Na Figura 5 o nó está equipado com dois S-BVTs que incorporam quatro BVTs cada. Existem fluxos de diferentes capacidades, de modo que estes são decompostos, por meio de subsistemas eletrônicos do S-BVT, em vários fluxos, todos à mesma taxa nominal. Como exemplo, um grupo de quatro fluxos de tráfego marcados com o número 1, três fluxos marcados com 7, dois fluxos marcados com 6 e fluxos de tráfego individuais marcados com 2, 4 e 5, respectivamente. Os BVTs suportam os formatos de modulação QPSK, 16-QAM e 64-QAM. São feitas as seguintes seleções: os fluxos 2, 4 e 5 são encaminhados para o BVT-3, BVT-5 e BVT-6, respectivamente, com modulação QPSK. Os fluxos de tráfego 7 são multiplexados, construindo um fluxo de maior capacidade que é

Figura 4 – Arquitetura do S-BVT.



Fonte: Adaptado de (CHATTERJEE, 2020).

encaminhado para o BVT-8, e por isso, este passa a operar com modulação 64-QAM. Por fim, os fluxos 1 são multiplexados em dois fluxos maiores e são direcionados para o BVT-1 e BVT-4, respectivamente, que são modulados em 16-QAM usando *slots* de frequência adjacentes e, neste caso, é formado um supercanal. Os fluxos marcados com 6 não são multiplexados, sendo encaminhados diretamente para o BVT-2 e BVT-7, empregando modulação QPSK, formando novamente um supercanal. Por fim, os fluxos em branco não são utilizados porque não há mais BVTs disponíveis. Dessa forma, pode-se identificar neste exemplo que, ao agrupar os fluxos de tráfego 7 e direcioná-los a um único BVT, economiza-se este recurso para atender a outros fluxos. No entanto, isso é viabilizado pelo emprego da modulação 64-QAM, que reduz o alcance óptico. Por outro lado, para aumentar a distância de transmissão, os fluxos 7 podem usar modulação 16-QAM e, para isso, utilizar um BVT a mais (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; LÓPEZ; VELASCO, 2016; CHATTERJEE, 2020).

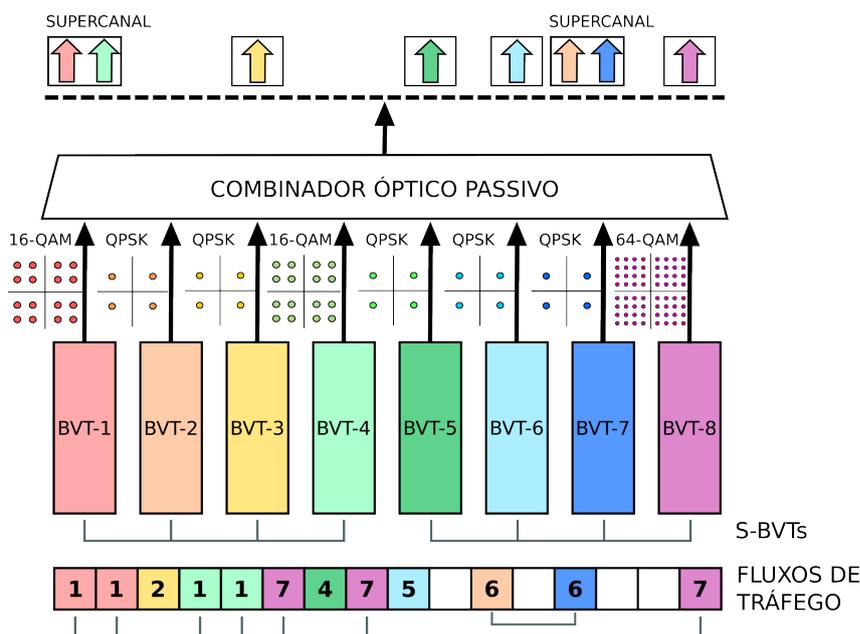
2.2.2 ROADM

Um ROADM (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*) visto na Fig. 3 é um dispositivo que permite o gerenciamento dinâmico e flexível de canais ópticos em uma rede de fibra óptica (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010; CHATTERJEE, 2020).

As principais funcionalidades de um ROADM segundo Ramaswami, Sivarajan e Sasaki (2010) são:

- Adicionar (*add*): Permite inserir novos canais ópticos (comprimentos de onda) na rede.
- Remover (*drop*): Permite extrair canais ópticos específicos da rede para serem processados ou encaminhados a destinos locais.
- Passagem (*pass-through*): Permite que canais ópticos continuem seu trajeto pela rede sem serem processados localmente.

Figura 5 – Nó com oito BVTs particionados em dois S-BVTs.



- Reconfiguração dinâmica: Um ROADM pode ser reconfigurado remotamente para alterar quais comprimentos de onda são adicionados, removidos ou passam direto, sem a necessidade de intervenção física.
- Roteamento de comprimentos de onda: Em redes mais complexas, os ROADMs podem direcionar diferentes comprimentos de onda para diferentes caminhos na rede, permitindo o roteamento óptico.

Os principais componentes de um ROADM segundo Ramaswami, Sivarajan e Sasaki (2010) são:

- Bloco de multiplexação/demultiplexação: Combina (multiplexa) ou separa (demultiplexa) os diferentes comprimentos de onda.
- *Switches* ópticos: Permitem o redirecionamento dinâmico dos comprimentos de onda.
- Atenuadores variáveis: Ajustam a potência dos sinais ópticos para garantir que todos os canais tenham a mesma intensidade.
- Controlador: Gerencia a configuração do ROADM, geralmente integrado a um sistema de gerenciamento de rede ou controlador SDN.

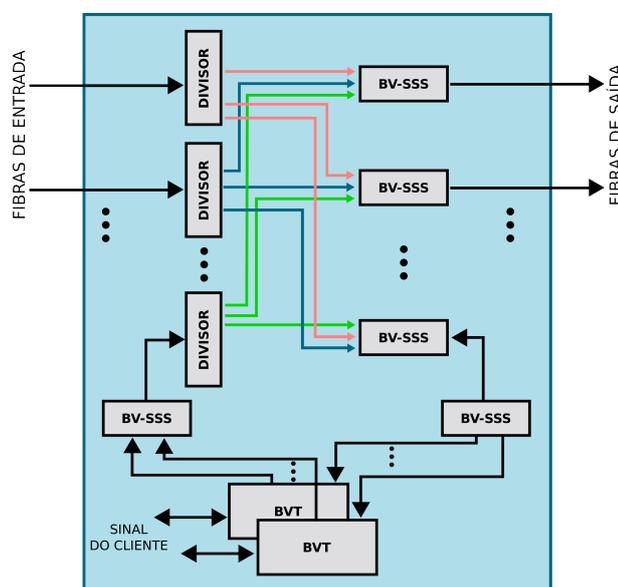
2.2.3 Comutador de largura de banda variável

Um BV-WXC é um dispositivo que permite o roteamento e a comutação flexível de sinais ópticos com larguras de banda variáveis, adaptando-se dinamicamente às demandas da

rede. Esse tipo de equipamento é essencial para otimizar o uso do espectro óptico em redes modernas, onde a eficiência e a flexibilidade são críticas. Para isso, ele possui a capacidade de ajustar sua janela de comutação de forma flexível, de acordo com a largura de banda do sinal óptico de entrada (LÓPEZ; VELASCO, 2016; CHATTERJEE, 2020).

A Figura 6 ilustra a implementação de um BV-WXC. Os comutadores seletivos de espectro de banda variável (BV-SSSs - *Bandwidth Variable - Spectrum Selective Switches*) na configuração *broadcast-and-select* são usados para fornecer a funcionalidade *add-drop* para segmentar ou agregar sinais localmente e a funcionalidade de roteamento para sinais em trânsito. Normalmente, um BV-SSS executa funções de demultiplexação/multiplexação de comprimento de onda e comutação óptica usando óptica espacial integrada, onde a luz de uma fibra de entrada é dividida em seus componentes espectrais constituintes usando um elemento dispersivo. Então, os espectros espacialmente separados são focados em uma matriz de espelhos unidimensional e redirecionados para a fibra de saída desejada. O cristal líquido em silício (LCoS - *Liquid Crystal over Silicon*) ou BV-SSSs baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS - *Microelectromechanical Systems*) podem ser empregados como elementos de comutação para realizar uma conexão óptica com largura de banda flexível (LÓPEZ; VELASCO, 2016; CHATTERJEE, 2020).

Figura 6 – Arquitetura de um BV-WXC.



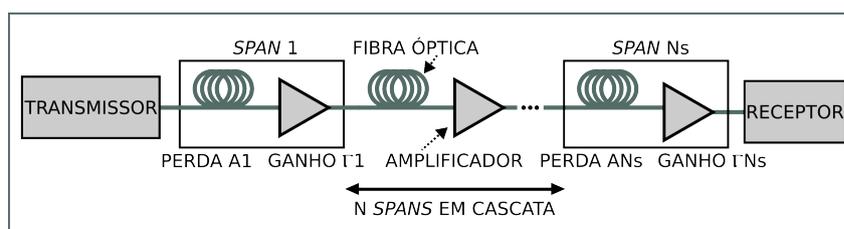
Fonte: Adaptado de (CHATTERJEE, 2020).

2.2.4 Enlaces ópticos

Uma configuração genérica de um enlace óptico típico é mostrada na Figura 7, sendo transparente fim a fim. As fibras monomodo são atualmente o meio de transmissão usado para construir tal enlace. Essas fibras ópticas têm uma largura de banda utilizável total de vários terahertz. Um sistema de transmissão típico consiste em uma matriz de lasers com diferentes

comprimentos de onda para gerar as portadoras ópticas. Cada laser é modulado por um modulador externo, por exemplo, um modulador Mach-Zehnder, para gerar o sinal de dados. Amplificadores ópticos podem ser implantados para aumentar a potência de lançamento do sinal em distâncias adequadas, ou seja, ao longo do enlace, o sinal é amplificado periodicamente (aproximadamente a cada 80–100 km). Os caminhos de luz passam através dos BV-WXCs, podendo se estender por longas distâncias de forma transparente ou translúcida, com a utilização de regeneração em algum nó intermediário. Em um nó, onde vários caminhos de luz diferentes passam, um BV-WXC permite alternar de uma fibra para outra dinamicamente Chatterjee (2020). Cada conjunto de fibra óptica e amplificador óptico é denominado de *span*, conforme ilustrado na Figura 7. Um enlace óptico é representado por N_s *spans* sucessivos, podendo cada um possuir características distintas, tanto para as fibras (coeficiente de não linearidade, coeficiente de perda, coeficiente de dispersão, comprimento), quanto para os amplificadores (figura de ruído e ganho) (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010; KEISER, 2011).

Figura 7 – Arquitetura genérica de um enlace óptico.



Fonte: Autoria própria.

2.3 Arquitetura de Nó para Redes Ópticas Elásticas

A funcionalidade básica de um nó de rede óptica é direcionar cada sinal óptico que entra para sua direção de saída prescrita, o que pode incluir direcionar um ou mais sinais de/para transceptores locais (*add/drop*) ou direcioná-los para continuar ao longo de uma rota (MUKHERJEE et al., 2020).

Nós reconfiguráveis, como os que possuem ROADMs, oferecem a capacidade de selecionar de forma independente como cada novo canal será roteado na rede. Essa flexibilidade permite que os operadores de rede adaptem a capacidade da rede de acordo com a demanda em tempo real, adicionando novos canais conforme necessário e escolhendo as melhores rotas disponíveis, sem necessidade de reconfigurações físicas no *hardware*. Embora essa versatilidade exija maior complexidade de *hardware* nos nós, como um maior número de comutadores e amplificadores ópticos, ela proporciona uma reconfiguração dinâmica, especialmente em redes de alta capacidade e de grande escala (MUKHERJEE et al., 2020).

Nos ROADMs, a propriedade *colorless* permite que qualquer comprimento de onda seja adicionado ou removido em qualquer porta óptica, aumentando a flexibilidade na alocação de recursos. Já a característica *directionless* possibilita que os sinais ópticos sejam direcionados para

qualquer rota disponível, sem limitações pré-definidas, facilitando a reconfiguração dinâmica da rede. Por fim, a funcionalidade *contentionless* assegura que múltiplos sinais com o mesmo comprimento de onda possam coexistir sem conflitos, aumentando a capacidade e a eficiência da rede (CHATTERJEE, 2020; MUKHERJEE et al., 2020).

Essa capacidade de reconfiguração é especialmente útil em EONs, na qual a alocação eficiente do espectro pode ser ajustada dinamicamente para otimizar o desempenho da rede, pois facilita a gestão de recursos de forma mais eficiente, reduzindo a necessidade de atualizações físicas contínuas, fazendo com que a infraestrutura se adapte rapidamente ao crescimento do tráfego de dados, o que é essencial para o funcionamento de redes de próxima geração (CHATTERJEE, 2020; MUKHERJEE et al., 2020).

A seguir, serão vistas algumas arquiteturas de nós para redes ópticas elásticas.

2.3.1 *Broadcast-and-select*

A arquitetura *broadcast-and-select* (Figura 8) tem sido utilizada para definir a arquitetura de nós ópticos elásticos que fazem uso de comutadores seletivos de espectro (SSS - *Spectrum Selective Switches*). Essa arquitetura é implementada por meio de divisores nas portas de entrada, que geram cópias dos sinais de entrada. Esses sinais são então filtrados pelos SSSs, que selecionam os canais necessários do lado do receptor (MUKHERJEE et al., 2020).

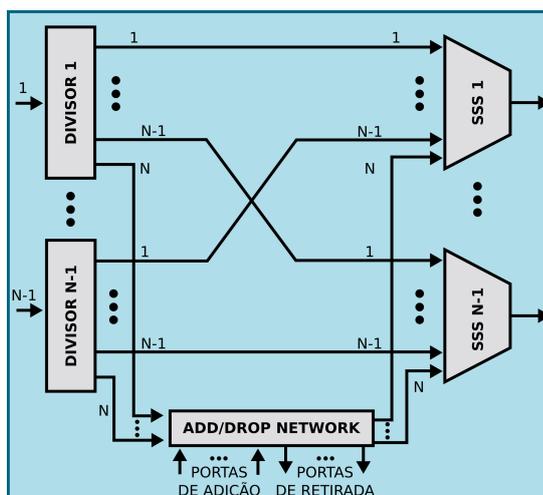
A capacidade *add/drop e pass-through* possibilita a extração, inserção e transmissão de canais ópticos sem interromper o tráfego em trânsito. Quando combinada com funcionalidades avançadas, como *colorless*, *directionless* e *contentionless*, permite a manipulação dinâmica do tráfego óptico, proporcionando maior flexibilidade e eficiência espectral na rede. (CHATTERJEE, 2020).

Uma desvantagem da arquitetura *broadcast-and-select* é a divisão da energia do sinal entre vários nós, o que limita a sua aplicação a curtas distâncias. Dessa forma, essa arquitetura não é adequada para comunicações de longa distância, sendo mais comumente utilizada em redes locais de alta velocidade e redes metropolitanas (CHATTERJEE, 2020).

2.3.2 *Spectrum routing*

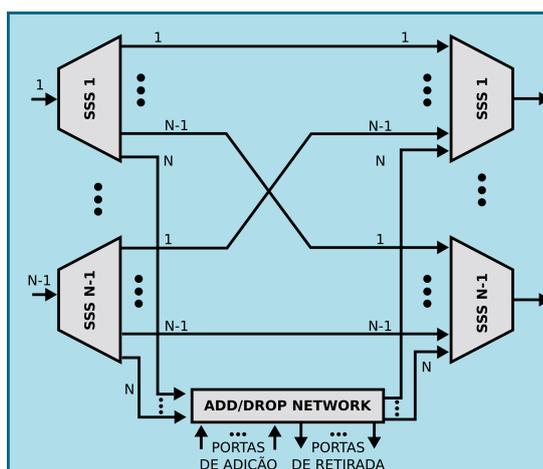
A arquitetura de nó *spectrum routing* foi projetada para superar os problemas encontrados na arquitetura de nó *broadcast-and-select*. Como pode ser visto na Figura 9, as funcionalidades de comutação e filtragem são controladas pelos SSSs. A principal vantagem dessa arquitetura, em comparação com a *broadcast-and-select*, é que a perda de potência não depende do grau de comutação. No entanto, ela requer SSSs adicionais para as fibras de entrada, o que aumenta significativamente seu custo. (CHATTERJEE, 2020).

Figura 8 – Arquitetura de nó *broadcast-and-select*.



Fonte: Adaptado de (CHATTERJEE, 2020).

Figura 9 – Arquitetura de nó *spectrum routing*.



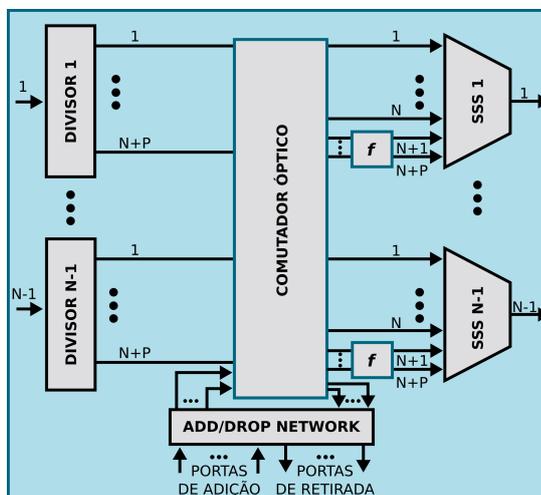
Fonte: Adaptado de (CHATTERJEE, 2020).

2.3.3 *Switch-and-select* com funcionalidade dinâmica

Como visto anteriormente, tanto a arquitetura *broadcast-and-select* quanto a arquitetura *spectrum routing* não suportam requisitos dinâmicos, como a desfragmentação de espectro, multiplexação no tempo e regeneração, entre outros. Para superar essas limitações, a arquitetura *switch-and-select* foi introduzida. Nessa arquitetura, um comutador óptico é utilizado para direcionar cópias do sinal de entrada para um SSS específico ou para um módulo f que oferece funcionalidades adicionais, como as mencionadas anteriormente. As saídas dos módulos são conectadas a SSSs, onde os sinais necessários são selecionados (filtrados) para a fibra de saída correspondente. A Figura 10 ilustra a arquitetura do nó de uma EON com funcionalidades dinâmicas, incluindo desfragmentação de espectro, multiplexação no tempo e regeneração. Essas funcionalidades, no entanto, têm o custo de comutadores ópticos adicionais, além do aumento do número de portas nos dispositivos que compõem o sistema. Essas portas são dedicadas a

fornecer uma funcionalidade específica e, portanto, o número de módulos pode ser calculado com base na demanda esperada (CHATTERJEE, 2020).

Figura 10 – Arquitetura de nó *switch and select*.



Fonte: Adaptado de (CHATTERJEE, 2020).

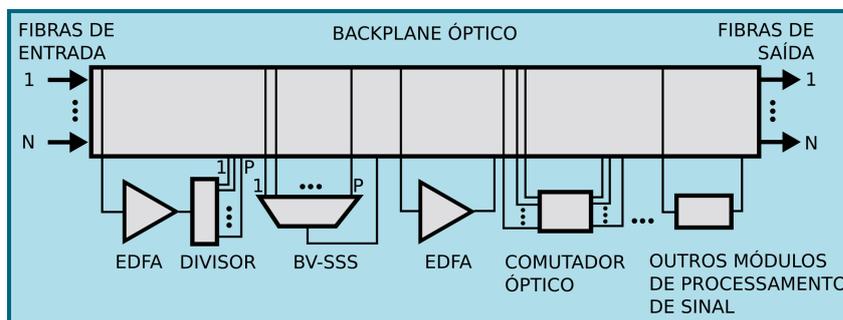
2.3.4 Arquitetura sob demanda

A arquitetura sob demanda (AoD - *Architecture over Demand*) consiste em um *backplane* óptico implementado com um comutador óptico de grande quantidade de portas, conectado a vários módulos de processamento, tais como: SSS, comutador rápido, EDFA, desfragmentador de espectro, divisor, entre outros. As entradas e saídas do nó são conectadas por meio do *backplane* óptico, conforme ilustrado na Figura 11. Os diferentes arranjos de entradas, módulos e saídas são realizados pela definição de conexões cruzadas apropriadas no *backplane* óptico. Essa arquitetura apresenta maior flexibilidade em comparação com as mencionadas anteriormente, principalmente devido à não obrigatoriedade de componentes como SSS, divisores e outros módulos funcionais. Esses componentes podem ser interconectados de maneira arbitrária, diferentemente das arquiteturas estáticas. O número de SSSs e de outros dispositivos de processamento não é fixo, podendo ser determinado conforme a demanda específica dessas funcionalidades. Assim, a AoD surge como uma solução mais econômica, além de oferecer vantagens em termos de escalabilidade e resiliência (CHATTERJEE, 2020).

2.4 Regeneração

Dependendo do comprimento dos enlaces, ou para melhorar a eficiência espectral da rede, a próxima etapa no processo de planejamento é selecionar os locais de regeneração para a demanda. A regeneração reconstrói o sinal óptico, re-amplificando, re-formatando e re-sincronizando-o no tempo, processo conhecido como regeneração 3R. Os caminhos são

Figura 11 – Arquitetura de nó sob demanda com N entrada/saídas e módulos de processamento de sinal.



Fonte: Adaptado de (CHATTERJEE, 2020).

selecionados de maneira a minimizar a quantidade de regeneração, já que isso aumenta os custos da rede (SIMMONS, 2014).

Se a rede for opaca, ou seja, há conversão O-E-O em todos os nós, a conexão é regenerada em cada nó intermediário ao longo do caminho (SIMMONS, 2014).

Para uma rede habilitada para *bypass* óptico, onde é possível atravessar um nó intermediário no domínio óptico (de forma transparente) dependendo da qualidade do sinal (QoS - *Quality of Signal*), a determinação dos locais de regeneração para um caminho pode ser mais desafiadora. Vários fatores influenciam o momento em que um sinal óptico deve ser regenerado, como a tecnologia de transmissão, as propriedades dos elementos da rede e as características dos enlaces de fibra nos quais o sistema é implantado. Esses fatores sozinhos não são suficientes para determinar o alcance óptico; outros fatores precisam ser levados em consideração, como os (PLIs - *Physical Layer Impairments*), incluindo o ruído da emissão espontânea amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*), a dispersão cromática (CD - *Chromatic Dispersion*), a dispersão do modo de polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*) e as interferências não lineares (NLIs), tais como a modulação de auto-fase (SPM - *Self-Phase Modulation*), modulação de fase cruzada (XPM - *Cross-Phase Modulation*) e mistura de quatro ondas (FWM - *Four Wave Mixing*). Quando esses fatores são considerados em conjunto, é possível estimar a distância nominal sobre a qual um sinal óptico pode viajar sem regeneração, conhecido como alcance óptico. (SIMMONS, 2014).

A penalidade que exige maior atenção para o sinal óptico é o ruído acumulado; sua principal fonte é o ruído ASE, que é inserido pelos amplificadores, amplificado e propagado através do enlace óptico. As outras penalidades mencionadas estão relacionadas às propriedades físicas da luz que se propaga na fibra (SIMMONS, 2014).

A CD é um fenômeno em que a velocidade de propagação da luz dentro de uma fibra depende da frequência óptica, ou seja, os pulsos do sinal óptico, que têm uma largura espectral finita, são distorcidos à medida que se propagam ao longo da fibra, se espalhando no tempo, acumulando essa dispersão como uma função linear da distância de propagação. Assim, sinais com taxa de bits mais alta, onde os pulsos estão mais próximos, são mais suscetíveis a erros

devido a esse efeito (SIMMONS, 2014; AGRAWAL, 2019; AGRAWAL, 2021).

As fibras ópticas não são perfeitamente circulares; assim, os dois modos polarizados ortogonalmente têm constantes de propagação ligeiramente diferentes, ou seja, as fibras são ligeiramente birrefringentes. Assim, os modos se propagam em diferentes velocidades, causando o espalhamento do pulso. Esse fenômeno é chamado de PMD (SIMMONS, 2014; RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010).

O índice de refração da fibra óptica controla a velocidade de propagação da luz e depende da intensidade da onda eletromagnética. Assim, vários efeitos não lineares surgem à medida que a potência do sinal óptico aumenta. Uma dessas não linearidades é a SPM, onde a intensidade da luz faz com que a fase do sinal óptico varie com o tempo. A XPM é um efeito semelhante, porém surge da interação entre os sinais, que é mais provável de ocorrer quando estes possuem espectros adjacentes (SIMMONS, 2014).

Inicialmente, a compensação da dispersão era realizada pela instalação de fibras DCF, com dispersão inversa em relação à fibra de transmissão, em vários pontos ao longo de cada enlace óptico. No entanto, a DCF aumenta a perda de sinal, oferece apenas uma compensação estática e adiciona uma pequena quantidade de latência. Outro problema com o uso da DCF decorre do fato de que a dispersão da fibra de transmissão não é constante ao longo da banda utilizada, apresentando uma inclinação específica ao longo do espectro. A DCF pode não ter exatamente a mesma inclinação de dispersão inversa, resultando em diferentes níveis de dispersão residual, dependendo da faixa espectral transmitida (SIMMONS, 2014; RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010).

Posteriormente, a compensação eletrônica de dispersão (EDC - *Electronic Dispersion Compensation*) foi introduzida como um aprimoramento ou substituição da DCF. A EDC pode ser implantada por comprimento de onda, como parte do transceptor, e ajustada dinamicamente para lidar com uma variedade de níveis de dispersão, atendendo melhor às necessidades de compensação de uma determinada conexão. A compensação da PMD é mais desafiadora, pois o nível de PMD pode variar com o tempo, exigindo compensadores de PMD ajustáveis. No entanto, as fibras ópticas mais modernas tendem a apresentar níveis muito baixos de PMD (SIMMONS, 2014; RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010).

Como foi visto, existem vários fatores a serem levados em consideração ao determinar onde um sinal óptico precisa ser regenerado. Porém, cada fabricante analisa sua própria implementação específica e desenvolve um conjunto de regras para esta finalidade que podem ser do tipo: regenerar uma conexão se: a OSNR estiver abaixo e/ou a dispersão acumulada estiver acima e/ou a PMD acumulada estiver acima de um certo limiar e/ou o número de elementos de rede ignorados for maior que um certo valor. Ao determinar essas regras, os fornecedores geralmente levam em consideração uma margem considerando o envelhecimento dos componentes e perdas na emenda. Essas regras devem ser imunes à dinâmica do tráfego na rede. Nos estágios iniciais do projeto da rede, pode-se ter que confiar na seleção de locais de regeneração com base na distância do caminho, para fins de avaliação do sistema e estimativa de custos. Após a caracterização

completa dos *spans*, deve-se implementar regras mais precisas de regeneração (SIMMONS, 2014).

2.5 Estimando as não-linearidades

O advento dos sistemas de detecção coerentes, com suporte ao processamento digital de sinais (PDS), tornou possível realizar a compensação eletrônica da dispersão cromática da fibra, permitindo a adoção da técnica de transmissão não compensada (UT - *Uncompensated Transmission*), que dispensa a compensação óptica da dispersão. Essa abordagem possibilita a aplicação de modelos perturbativos de propagação não linear na fibra, que anteriormente não funcionavam satisfatoriamente com a CD óptica, fornecendo previsões de desempenho mais precisas e levando à formalização do modelo GN. Para explorar tal técnica de perturbação, é necessário assumir que a não-linearidade na fibra é relativamente pequena em uma determinada faixa de potência do sinal óptico, comportando-se como uma perturbação em relação ao sinal útil. Isso permite encontrar soluções analíticas aproximadas para NLSE (POGGIOLINI et al., 2014). Assim, para aplicar o modelo GN, é preciso assumir que (POGGIOLINI et al., 2014):

- i. o sinal transmitido à medida que se propaga ao longo do enlace em UT, fica completamente disperso, tendendo a assumir uma distribuição Gaussiana, se comportando estatisticamente como um ruído Gaussiano estacionário;
- ii. a perturbação do sinal gerada pelas NLIs se manifesta como ruído gaussiano aditivo (AGN - *Additive Gaussian Noise*).

A fórmula de referência do modelo GN (GNRF - *GN Reference Formula*) fornece $G_{NLI}(f)$, a (PSD - *Power Spectral Density* - Densidade Espectral de Potência) da NLI ao final do enlace. Assim, considerando que os sinais são transmitidos em dupla polarização e, para facilitar os cálculos, assume-se que cada *span* é constituído por um único tipo de fibra óptica.

A técnica de multiplexação NDWDM usada na transmissão em EONs apresenta um espectro óptico muito próximo do retangular, onde cada canal possui frequência central f_m , largura de banda B_m , PSD $G(f_m)$ e potência P_m . Então, a PSD do sinal que está sendo transmitido pode ser calculada pela Eq. 2.1 (VALE; ALMEIDA, 2019):

$$G(f_m) = \frac{P_m}{B_m} . \quad (2.1)$$

Dessa forma, em um cenário usando NDWDM, uma versão de baixa complexidade para a PSD da NLI pode ser obtida para a saída de um *span* conforme a Eq. 2.2 (VALE; ALMEIDA, 2019; JOHANNISSON; AGRELL, 2014):

$$G_{span}^{NLI}(f_m) = \frac{1,5\gamma^2}{\pi\alpha\beta_2} G(f_m) \left[G^2(f_m) \ln \left| \frac{\pi^2\beta_2(\Delta f_m)^2}{\alpha} \right| + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u G^2(f_n) \ln \left(\frac{f_{m,n} + \Delta f_n/2}{f_{m,n} - \Delta f_n/2} \right) \right] \quad (2.2)$$

A Eq. 2.2 mostra que a PSD da NLI está relacionada com a PSD do sinal através de $G(f_m)$ e com as PSDs referentes aos canais ativos u no enlace em cada *span* ($G(f_n)$) por interferência intercanal (XCI), pelas distâncias entre as frequências centrais dos canais (Eq. 2.3) (VALE; ALMEIDA, 2019; JOHANNISSON; AGRELL, 2014).

$$f_{m,n} = |f_m - f_n|, \quad (2.3)$$

e pelas respectivas larguras de banda B_m e B_n dos canais ativos (Eq. 2.4) (VALE; ALMEIDA, 2019; ESSIAMBRE et al., 2010):

$$B = \frac{R_b}{p \cdot b_{symbol}}, \quad (2.4)$$

em que R_b é a taxa de bits, p o número de modos de polarização, b_{symbol} o número de bits por símbolo dado pela Eq. 2.5:

$$b_{symbol} = \log_2 M, \quad (2.5)$$

em que M é o nível de modulação.

2.6 Estimando o ruído ASE

Após uma certa distância de transmissão, a atenuação na fibra reduz a potência do sinal abaixo do limiar detectável pelos receptores ópticos, tornando necessária a amplificação óptica. Isso reduz o número de processos de conversão O-E-O, o que aumenta o custo de implantação e operação da rede. Assim, é comum realizar a amplificação através de EDFA em intervalos de aproximadamente 80 a 100 km (KEISER, 2021; LOZADA et al., 2021).

Os amplificadores ópticos introduzem ruído ASE, o que provoca flutuações no sinal óptico amplificado. A PSD do ruído ASE é relativamente constante em uma faixa estreita de frequência, comportando-se como ruído branco. Assim, utilizando a Eq. 2.1, a potência em um *span* é dada pela Eq. 2.6 (POGGIOLINI et al., 2014; VALE; ALMEIDA, 2019):

$$P_{ASE}^{span} = G_{ASE}^{span} \cdot B_0, \quad (2.6)$$

em que G_{ASE}^{span} é a PSD do ruído ASE em um *span*, e B_0 , a largura de banda de referência.

Por fim, substituindo G_{ASE}^{span} , a potência do ruído gerada na saída de um EDFA em um *span* é dada pela Eq. 2.7 (POGGIOLINI et al., 2014; VALE; ALMEIDA, 2019):

$$P_{ASE}^{span} = h \cdot \nu \cdot F \cdot (\Gamma - 1) \cdot B_0, \quad (2.7)$$

em que h é a constante de Planck, ν é a frequência central do sinal, e F e Γ representam, respectivamente, a figura de ruído e o ganho do amplificador em escala linear. Na prática, a frequência central ν pode ser considerada como a frequência central do espectro, independentemente da posição do canal no mesmo, pois, na banda C, as frequências operam na ordem dos THz, tornando a diferença entre as frequências dos canais desprezível (VALE; ALMEIDA, 2019).

2.7 Avaliação da qualidade da transmissão

2.7.1 OSNR

Em redes ópticas, o sinal é atenuado ao percorrer a rota entre algum par de nós origem-destino. Desse modo, é necessário avaliar a rota para garantir a QoT. Neste contexto, na Seção 2.5 é demonstrado como o modelo GN permite estimar a PSD da NLI. Assim, é possível usar este resultado para avaliar o desempenho de um sistema óptico coerente. Para tal, a OSNR é uma métrica adequada, pois relaciona as potências do sinal e do ruído, como na Eq. 2.11:

$$OSNR = 10 \log \left(\frac{P_{ch}}{P_{ruído}} \right), \quad (2.8)$$

em que P_{ch} é a potência do canal e $P_{ruído}$ a potência relativa aos ruídos em uma banda B_0 . Dessa forma, para garantir uma transmissão sem erros, é importante considerar as PLIs que mais afetam a QoT (VALE; ALMEIDA, 2019).

Assumindo que o ruído decorrente das não linearidades pode ser modelado como um ruído gaussiano branco aditivo (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*) em uma largura de banda de referência estreita, sua potência, de acordo com a Eq. 2.1, é dada pela Eq. 2.9 (VALE; ALMEIDA, 2019; VALE, 2021; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022; POGGIOLINI et al., 2014):

$$P_{NLI}^{span} = G_{NLI}^{span} B_0, \quad (2.9)$$

em que G_{NLI}^{span} é a PSD das não linearidades na saída de um *span*.

Considerando o modelo simplificado para a PSD das NLIs (Eq. 2.2) e que os sinais possuem espectros retangulares para esse modelo, tem-se que a potência das NLIs em um *span* é dada pela Eq. 2.10 (VALE, 2021):

$$P_{NLI}^{span}(f_m) = \frac{1,5 \gamma^2 B_0}{\pi \alpha \beta_2} \frac{P_m}{(\Delta f_m)^2} \left[\frac{P_m^2}{(\Delta f_m)^2} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_2 (\Delta f_m)^2}{\alpha} \right| + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \frac{P_n^2}{(\Delta f_n)^2} \ln \left(\frac{f_{m,n} + \Delta f_n/2}{f_{m,n} - \Delta f_n/2} \right) \right], \quad (2.10)$$

em que P_m é a potência do canal que está sendo inserido, P_n é a potência de um canal ativo, e u representa o número de canais ativos no *span*, respectivamente.

Como o ruído ASE e as NLIs são assumidos como AWGN (em uma banda estreita de frequência), e considerando a Eq. 2.8, a potência das NLIs é dada pela Eq. 2.11 (VALE; ALMEIDA, 2019; POGGIOLINI et al., 2014):

$$\text{OSNR} = 10 \log \left(\frac{P_{ch}}{P_{ASE} + P_{NLI}} \right), \quad (2.11)$$

em que P_{ch} , P_{ASE} e P_{NLI} são as potências do canal, do ruído ASE e das NLIs, respectivamente.

Para uma rota com R_{N_s} *spans* as potências dos referidos ruídos se acumulam, além de sofrer perdas e ganhos a cada *span* conforme a Eq. 2.12, Eq. 2.13 e Eq. 2.9 (VALE; ALMEIDA, 2019; VALE, 2021; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022; POGGIOLINI et al., 2014; JOHANNISSON; AGRELL, 2014):

$$P_{ch} = P_m \prod_{p=1}^{R_{N_s}} A_p \Gamma_p, \quad (2.12)$$

$$P_{ASE} = \left[\sum_{k=1}^{R_{N_s}} \left(P_{ASE}^k \prod_{p=k+1}^{R_{N_s}} A_p \Gamma_p \right) \right] + \left(P_{ASE}^{R_{N_s}} \right) + \left(P_{ruído-in} \prod_{p=1}^{R_{N_s}} A_p \Gamma_p \right), \quad (2.13)$$

$$P_{NLI} = \left[\sum_{k=1}^{R_{N_s}} \left(P_{NLI}^k \prod_{p=k+1}^{R_{N_s}} A_p \Gamma_p \right) \right] + \left(P_{NLI}^{R_{N_s}} \right), \quad (2.14)$$

onde k representa os elementos da rota, A_p é a atenuação no *span*, e Γ_p corresponde ao ganho do amplificador no *span*. O ruído proveniente do transceptor ($P_{ruído-in}$) é somado ao ruído ASE para simplificar o modelo matemático de propagação (VALE; ALMEIDA, 2019).

Por fim, com o valor da OSNR obtido, e de acordo com as especificações do receptor, define-se um limiar OSNR_{th} para cada formato de modulação e taxa de erro de bit (BER) desejada. Valores abaixo deste limiar não garantem a QoT e as requisições de conexão são bloqueadas.

2.7.2 Comportamento da OSNR em função da potência

De acordo com o modelo apresentado nas Seções 2.5 e 2.6, e levando em consideração fatores como a dispersão cromática, que é completamente compensada pelo processamento digital do sinal, as penalidades consideradas neste trabalho são o ruído ASE e as NLIs na fibra. Dessa forma, substituindo as expressões para a potência do ruído ASE (Eq. 2.13) e NLI (Eq. 2.10) na equação da OSNR (Eq. 2.11) para um sinal com potência de lançamento P_m , propagado ao longo de uma rota com R_{N_s} *spans* e u canais ativos no enlace do respectivo *span*, obtém-se a Eq. 2.15 (VALE; ALMEIDA, 2019; VALE, 2021; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022):

$$\text{OSNR} = 10 \log \left(\frac{tP_m}{aP_m^3 + bP_m + c} \right). \quad (2.15)$$

Os coeficientes a , b , c e t são definidos pela Eq. 2.16, Eq. 2.17, Eq. 2.18 e Eq. 2.19 (VALE; ALMEIDA, 2019; VALE, 2021; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022).

O ruído ASE depende exclusivamente do percurso do próprio sinal (distância, número de amplificadores e suas figuras de ruído). Por outro lado, as NLIs são influenciadas pelas características do próprio sinal (potência, largura de banda e posição no espectro) e também pelos demais sinais presentes no enlace.

$$a = \frac{1,5 B_0}{\pi (\Delta f_m)^3} \left[\sum_{k=1}^{R_{N_s}} \left(\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2k} (\Delta f_m)^2}{\alpha_k} \right| \prod_{p=k+1}^{R_{N_s}} A_p \Gamma_p \right) + \frac{\gamma_{R_{N_s}}^2}{\alpha_{R_{N_s}} \beta_{2R_{N_s}}} \ln \left| \frac{\pi^2 \beta_{2R_{N_s}} (\Delta f_m)^2}{\alpha_{R_{N_s}}} \right| \right], \quad (2.16)$$

$$b = \frac{1,5 B_0}{\pi \Delta f_m} \left\{ \sum_{k=1}^{R_{N_s}} \left[\frac{\gamma_k^2}{\alpha_k \beta_{2k}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{m,n} + \Delta f_n/2}{f_{m,n} - \Delta f_n/2} \right) \prod_{p=k+1}^{R_{N_s}} A_p \Gamma_p \right] + \frac{\gamma_{R_{N_s}}^2}{\alpha_{R_{N_s}} \beta_{2R_{N_s}}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^u \left(\frac{P_n}{\Delta f_n} \right)^2 \ln \left(\frac{f_{m,n} + \Delta f_n/2}{f_{m,n} - \Delta f_n/2} \right) \right\} + \frac{1}{osnr_{in}} \prod_{p=1}^{R_{N_s}} A_p \Gamma_p, \quad (2.17)$$

$$c = h \nu B_0 \left\{ \sum_{k=1}^{R_{N_s}} \left[F_k (\Gamma_k - 1) \prod_{p=k+1}^{R_{N_s}} A_p \Gamma_p \right] + F_{R_{N_s}} (\Gamma_{R_{N_s}}) \right\}, \quad (2.18)$$

$$t = \prod_{p=1}^{R_{N_s}} A_p \Gamma_p. \quad (2.19)$$

O coeficiente a representa a interferência própria do canal (SCI - *Self-channel Interference*) e depende de vários fatores relacionados à rota, como o número de *spans* e enlaces, perdas nos *spans* e nos comutadores, características das fibras e ganhos dos amplificadores, além da largura de banda do próprio canal. O coeficiente b expressa a interferência cruzada entre canais (XCI - *Cross-channel Interference*) e depende, de forma semelhante, da rota (número de *spans* e enlaces, perdas nos *spans* e nos comutadores, características das fibras e ganhos dos amplificadores), da largura de banda do próprio canal e das conexões presentes na rota (potência, largura de banda e posição espectral). Já o coeficiente c refere-se ao ruído ASE dos amplificadores e também é influenciado pela rota, considerando o número de *spans* e enlaces, perdas nos *spans* e nos comutadores, além do ganho e da figura de ruído dos amplificadores. Por fim, o coeficiente t representa a relação entre todas as perdas e ganhos da rota, sendo dependente do número de *spans*, das perdas nos *spans* e comutadores, e do ganho dos amplificadores. Assim, o estado de cada enlace afeta diretamente apenas o coeficiente b , de forma que uma alteração no estado das conexões adjacentes à conexão analisada — seja pelo aumento do número de conexões ou da potência — aumenta as NLIs, o que, por sua vez, reduz a OSNR (VALE; ALMEIDA, 2019; VALE, 2021; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022; SENA, 2018).

A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros envolvidos no cálculo desses coeficientes.

Tabela 1 – Resumo dos parâmetros físicos envolvidos no cálculo da OSNR.

Parâmetro	Descrição
α	coeficiente de atenuação da fibra ótica
β_2	coeficiente de dispersão cromática da fibra ótica
γ	coeficiente de não-linearidade da fibra ótica
Γ_p	ganho de potência de cada amplificador
A_p	perda em cada amplificador
F_n	figura de ruído de cada amplificador
R_{N_s}	número de <i>spans</i> da rota
f_m	frequência do canal que está sendo inserido
f_n	frequência dos outros canais ativos
B_0	largura de banda de referência

O comportamento da OSNR em relação à potência de lançamento da luz em uma rota ótica é caracterizado por duas contribuições principais. A primeira está relacionada às NLIs, que aumentam com o crescimento da potência de lançamento. Isso causa uma degradação da OSNR em potências mais elevadas, pois o efeito das NLIs é mais proeminente em maiores níveis de potência. A segunda contribuição vem do ruído ASE, o qual é constante em termos absolutos, mas a sua influência relativa diminui conforme a potência do sinal aumenta, melhorando a OSNR em baixos níveis de potência (VALE; ALMEIDA, 2019; VALE, 2021; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022).

No entanto, há um ponto de equilíbrio onde esses dois efeitos se compensam, resultando em uma OSNR máxima para uma potência específica. Esse ponto pode ser encontrado derivando a expressão da OSNR em função da potência e resolvendo para o valor da potência que maximiza a OSNR. Essa derivação resulta na equação da potência ótima (Eq. 2.20), onde a OSNR atinge seu valor máximo antes de começar a decair devido ao predomínio das NLIs (VALE; ALMEIDA, 2019; VALE, 2021; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022).

$$P_{m,OSNR_{max}} = \sqrt[3]{\frac{c}{2a}}. \quad (2.20)$$

A potência mínima de lançamento que cumpre os requisitos mínimos de OSNR ($OSNR_{th}$) varia de acordo com o estado da rede. Em certos momentos, devido a alterações nas condições da rede, pode ocorrer que nenhuma potência disponível atenda ao limiar mínimo de OSNR exigido (POGGIOLINI et al., 2014; VALE; ALMEIDA, 2019; VALE, 2021; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022).

Esses limites de potência tornam-se essenciais para garantir que o sistema opere dentro das margens necessárias de qualidade, sem comprometer a integridade do sinal. Além disso, a escolha da potência de transmissão adequada pode ser usada como uma estratégia de otimização tanto em projetos iniciais de redes quanto em ajustes operacionais, onde a flexibilidade na escolha

da rota é necessária para garantir a viabilidade das conexões (POGGIOLINI et al., 2014; VALE; ALMEIDA, 2019; VALE, 2021; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022).

2.7.3 Taxa de erro de bit

Na comunicação digital através de fibra óptica, as informações são codificadas em binário e transmitidas ao longo de um caminho de luz. No receptor, os símbolos podem ser confundidos devido à degradação do sinal ao longo do percurso da origem até o destino. A taxa de erro de bit (BER) relaciona a quantidade de bits errados com a quantidade total de bits transmitidos, sendo amplamente utilizada como um parâmetro de medida da QoT. A BER está diretamente relacionada à OSNR, pois uma melhor OSNR implica em menos erros nos bits transmitidos (SKLAR; RAY, 2001).

Os limites de BER determinam se uma transmissão possui uma qualidade aceitável e, ao mesmo tempo, estabelecem o alcance máximo para um determinado formato de modulação a uma taxa de bits específica. Dessa forma, uma solicitação de conexão óptica pode ser aceita ou rejeitada com base nesse parâmetro. Em redes ópticas de área ampla, um limite de BER mais permissivo tende a resultar em uma menor taxa de bloqueio de solicitações de transmissão devido ao maior alcance óptico. Por outro lado, um limite de BER mais rigoroso pode reduzir a viabilidade de comunicações de longa distância. Ambos os critérios de limiar BER permitem transmissões bem-sucedidas, mas com diferentes níveis de qualidade de sinal, que podem ser corrigidos no receptor até certo ponto. Um dos principais objetivos das comunicações ópticas é atender com sucesso as solicitações de transmissão (SKLAR; RAY, 2001).

A escolha de um valor para a BER depende da utilização de códigos corretores de erros (ECC - *Error Correcting Codes*), como o FEC, que permitem o emprego de valores mais elevados de BER Vale e Almeida (2019). Nesse sentido, Proakis e Salehi (2007), Calderon et al. (2020) apresentam a Eq. 2.21 e Eq. 2.22 para estimar a BER.

$$BER_{\Lambda-PSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR}{\xi} \frac{\Delta_{ref}}{B_{ch}}} \right) \quad (2.21)$$

$$BER_{\Lambda-QAM} = \frac{1}{\xi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\Lambda}} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 SNR}{2(\Lambda - 1)} \frac{\Delta_{ref}}{B_{ch}}} \right) \quad (2.22)$$

em que Λ representa a cardinalidade da constelação, ξ os bits codificados em cada símbolo, tal que $\Lambda = 2^\xi$ e erfc a função de erro complementar dada pela Eq. 2.23 (ANDREWS, 1997):

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.23)$$

Na Eq. 2.21 e Eq. 2.22 a relação entre OSNR e OSNR é dada pela Eq. 2.24:

$$OSNR = 10 \log \left(\frac{p R_b}{2 B_0} SNR \right) \quad (2.24)$$

em que p é o número de modos de polarização, B_0 a largura de banda de referência, R_b a taxa de bits e SNR a relação sinal-ruído linear.

Portanto, é possível relacionar o limiar de OSNR para cada formato de modulação e a respectiva BER e taxa de bits requerida para cada conexão.

Para uma análise mais profunda de desempenho de sistemas com portadoras moduladas em diferentes formatos de modulação na presença de AWGN em relação a BER, vide (CARENA et al., 2012).

2.8 Avaliação da rede

A probabilidade de bloqueio (PB) em EONs é um parâmetro crucial para medir o desempenho da rede, especialmente quando se trata de alocação de recursos como espectro e potência. Nessas redes, a capacidade de transmissão é dividida em pequenos fragmentos de espectro, permitindo que a largura de banda seja atribuída de forma flexível para cada conexão. Entretanto, devido a essa fragmentação, surgem novos desafios para gerenciar e otimizar a rede, especialmente no que se refere ao bloqueio de chamadas (CHATTERJEE, 2020).

Existem dois principais tipos de bloqueio em EONs:

- Bloqueio por falta espectro: ocorre quando não há espectro suficiente disponível para atender a uma nova solicitação de conexão (CHATTERJEE, 2020).
- Bloqueio por falta de QoT: em redes ópticas, a qualidade de transmissão é medida pela OSNR. Se uma nova conexão não atingir o limiar de OSNR, seja por causa do ruído ASE ou NLIs, a conexão será bloqueada, mesmo que haja espectro disponível. Esse tipo de bloqueio é especialmente crítico para modulações de alta ordem (CHATTERJEE, 2020).

Na avaliação da QoT de canais individuais através da OSNR, se uma requisição de conexão não satisfizer o limiar $OSNR_{th}$, ela será rejeitada, sendo contabilizada no número de chamadas bloqueadas da rede. Dessa forma, a PB é dada pela Eq. 2.25 (VALE; ALMEIDA, 2019).

$$PB = \frac{\Psi_{bloq.}}{\Psi_{req.}}, \quad (2.25)$$

em que $\Psi_{bloq.}$ é o número de requisições de conexão bloqueadas e $\Psi_{req.}$ o número total de requisições de conexão.

Em EONs, a PB pode não ser uma métrica adequada, devido às diferentes taxas de bits em cada canal, o que não revela a real dimensão das chamadas bloqueadas. Nesse contexto, a contabilização das taxas de bits requeridas ($R_b^{req.}$) e das taxas de bits bloqueadas ($R_b^{bloq.}$) torna-se uma métrica mais apropriada. Isso resulta na probabilidade de bloqueio de taxa de bits, dada pela Eq. 2.26 (VALE; ALMEIDA, 2019).

$$PB = \frac{R_b^{bloq.}}{R_b^{req.}}. \quad (2.26)$$

2.9 Roteamento

A seleção de rotas em EONs é um processo complexo que deve considerar não apenas a disponibilidade de recursos, mas também a qualidade do sinal óptico e a eficiência espectral. Diferentes algoritmos de roteamento podem ser empregados, tais como:

2.9.1 Roteamento fixo

Na estratégia conhecida como roteamento fixo (FR - *Fixing Routing*), um caminho candidato é gerado antes de qualquer demanda ser adicionada à rede. Para cada par de nós origem-destino, um caminho é escolhido, e esse caminho é utilizado para rotear todas as solicitações de demanda para esse par. Em outras palavras, uma única rota fixa é pré-computada para cada par origem-destino, utilizando algum algoritmo de caminho mais curto, como os algoritmos de Dijkstra Cormen et al. (2022). Quando uma solicitação de conexão chega à rede, tenta-se estabelecer um caminho óptico ao longo da rota fixa predeterminada. Verifica-se se o *slot* necessário está disponível em cada enlace da rota. Se algum enlace não contiver o conjunto de *slot* desejado, a solicitação de conexão é bloqueada. Caso haja mais *slots* disponíveis do que o necessário, uma política de alocação de espectro é usada para selecionar (SIMMONS, 2014; CHATTERJEE, 2020).

O desempenho dessa estratégia pode ser ruim, deixando áreas da rede desnecessariamente congestionadas, pois o mesmo caminho sempre é usado para um determinado par de nós origem-destino. Por esse motivo, o FR não possibilita a adaptação ao estado atual da rede, podendo resultar em bloqueio de conexão e regeneração extra (SIMMONS, 2014).

A principal motivação para o uso do FR é a minimização da latência. No entanto, a maioria dos serviços não exige requisito de latência muito rigoroso, sendo, então, esta estratégia recomendada apenas para aplicações em que esses requisitos sejam críticos para o seu correto funcionamento (SIMMONS, 2014).

2.9.2 Roteamento fixo-alternativo

O roteamento fixo-alternativo (FAR - *Fixing-alternative Routing*) é uma versão aprimorada do FR, onde o conjunto de caminhos candidatos também é gerado antes de qualquer demanda ser adicionada à rede. No entanto, nesta estratégia, é gerado um conjunto de k caminhos candidatos para cada par de nós origem-destino. Em outras palavras, cada nó da rede mantém uma tabela de roteamento que contém uma lista ordenada de várias rotas fixas para todos os outros nós. Quando uma solicitação de conexão para um determinado par de nós origem-destino chega, o nó de origem tenta estabelecer um caminho óptico através de cada uma das rotas da

tabela de roteamento, seguindo a ordem da lista, até que uma rota com o *slot* necessário seja encontrada. Isso permite algum grau de roteamento dependente do estado da rede (SIMMONS, 2014; CHATTERJEE, 2020).

Na prática, selecionar cerca de três caminhos por par origem-destino é uma estratégia eficiente. Se nenhuma rota for encontrada na lista de rotas alternativas, a solicitação de conexão será bloqueada. No caso de mais de um *slot* disponível na rota selecionada, uma política de alocação de espectro é aplicada para seleção. Embora a complexidade computacional dessa estratégia seja maior do que a do FR, ela apresenta uma probabilidade de bloqueio menor (CHATTERJEE, 2020).

2.9.3 Roteamento adaptativo

O roteamento adaptativo (AR - *Adaptive Routing*) é uma técnica de roteamento dinâmico em redes de comunicação, onde as rotas entre pares de nós origem-destino são escolhidas com base no estado atual da rede. Ao contrário do roteamento fixo, onde as rotas são pré-determinadas, o AR ajusta as rotas conforme a disponibilidade de recursos, como a ocupação do espectro e o número de conexões ativas. Caso o *slot* necessário não esteja disponível em nenhuma rota, a solicitação de conexão é bloqueada (CHATTERJEE, 2020).

O AR oferece a vantagem de reduzir a probabilidade de bloqueio, pois considera todas as rotas possíveis entre os nós, adaptando-se continuamente às condições de tráfego. No entanto, essa flexibilidade vem com maior complexidade computacional e tempo de configuração, além da necessidade de suporte de protocolos que atualizem constantemente as tabelas de roteamento em cada nó, garantindo que as informações de estado da rede estejam sempre atualizadas. Apesar dessas limitações, o AR é uma das estratégias mais eficientes para melhorar a alocação de recursos em EONs (CHATTERJEE, 2020).

2.9.4 Roteamento menos congestionado

O roteamento menos congestionado (LCR - *Least Congestioned Routing*) predetermina uma sequência de rotas para cada par de nós de origem-destino de forma semelhante ao FAR. As rotas menos congestionadas são selecionadas entre as rotas predeterminadas no momento de chegada da solicitação de conexão. A métrica usada para medir o congestionamento em um enlace é o número de *slots* disponíveis. Se em um determinado momento o enlace possuir menos *slots* disponíveis, ele será considerado mais congestionado. A desvantagem desta estratégia é sua maior complexidade computacional, sendo a probabilidade de bloqueio um pouco melhor que a do FAR, devendo ser analisado com cuidado o *trade-off* entre esta e o peso computacional (CHATTERJEE, 2020).

2.9.5 Roteamento baseado em menor caminho - *Shortest Path Routing*

Este método seleciona a rota com o menor número de saltos ou a menor distância física. Embora simples, pode levar a uma distribuição desigual do tráfego e a congestionamentos em determinados enlaces. Pode ser implementado de forma fixa, onde a rota é predeterminada e não muda, ou fixa alternativa, onde rotas secundárias são pré-definidas (CHATTERJEE, 2020).

2.9.6 Roteamento baseado na QoT

Este método leva em consideração a qualidade do sinal óptico ao longo da rota, incluindo fatores como atenuação, dispersão e ruído. Rotas com melhor QoT são preferidas para garantir a integridade do sinal. Este tipo de roteamento pode ser adaptativo, ajustando-se dinamicamente às condições da rede em tempo real, ou fixo, onde a rota é escolhida com base em métricas de qualidade pré-calculadas (CHATTERJEE, 2020).

2.9.7 Roteamento baseado em disponibilidade de espectro - *Spectrum-Aware Routing*

Este método considera a disponibilidade de *slots* de espectro contíguo ao longo da rota, garantindo que haja recursos suficientes para atender à demanda de largura de banda. Pode ser implementado de forma adaptativa, onde a rota e a alocação de espectro são ajustadas dinamicamente conforme a disponibilidade de recursos, ou fixa alternativa, onde rotas e espectros são pré-alocados para diferentes cenários de tráfego (CHATTERJEE, 2020).

2.10 Alocação de espectro

A alocação de espectro em EONs é o processo de atribuir blocos de espectro contínuo e contíguo para estabelecer caminhos de luz entre par nós origem-destino, garantindo que as demandas de largura de banda sejam atendidas de forma eficiente. A alocação de espectro pode ser feita após o roteamento (roteamento seguido de alocação, RSA) ou de maneira simultânea, dependendo da estratégia adotada. As principais políticas de alocação de espectro incluem o uso do primeiro conjunto de *slots* disponível (*First-Fit*) ou do melhor conjunto de *slots* possível (*Best-Fit*), que tentam melhorar o uso do espectro e reduzir a fragmentação (TALEBI et al., 2014; CHATTERJEE, 2020).

Nas subseções subsequentes, serão discutidas algumas políticas de alocação de espectro.

2.10.1 *First-Fit*

A política de alocação de espectro conhecida como *First-Fit* é uma estratégia simples, porém eficiente, amplamente empregada em EONs. Nesse método, os *slots* de espectro são numerados e organizados em uma lista que mantém os índices dos *slots* disponíveis. Quando

uma nova solicitação de conexão é recebida, o *slot* com o menor índice disponível é selecionado e alocado ao caminho de luz solicitado. Após a conclusão da conexão, o *slot* é liberado e retorna à lista de *slots* disponíveis. A principal vantagem desta estratégia reside em sua simplicidade: não há necessidade de informações globais sobre o estado da rede, o que reduz a complexidade computacional e torna o *First-Fit* altamente eficiente. Além disso, ao alocar inicialmente os *slots* de menor índice, a fragmentação do espectro é reduzida, o que contribui para uma utilização mais eficaz dos recursos espectrais (CHATTERJEE, 2020).

2.10.2 *Random-Fit*

Na estratégia *Random-Fit*, é mantida uma lista de *slots* de espectros disponíveis. Quando uma solicitação de conexão é recebida, um conjunto de *slots* é selecionado aleatoriamente a partir da lista e alocado ao caminho de luz correspondente, atendendo à demanda de conexão. Após isso, a lista é atualizada, removendo os *slots* utilizados. Quando a chamada é concluída, os *slots* liberados são reinseridos na lista de *slots* disponíveis. Ao selecionar os *slots* de maneira aleatória, a probabilidade de várias conexões escolherem o mesmo espectro é reduzida, uma vez que os espectros alocados tendem a ficar mais distribuídos. Essa dispersão favorece a implementação da restrição de continuidade do espectro, que exige que o mesmo bloco de espectro esteja disponível ao longo de toda a rota (CHATTERJEE, 2020).

2.10.3 *Last-Fit*

Na estratégia de alocação de espectro *Last-Fit*, o conjunto de *slots* de índice mais alto da lista de *slots* disponíveis é sempre escolhido para atender à solicitação de conexão. Quando a conexão é encerrada, os *slots* utilizados são devolvidos à lista de *slots* disponíveis, podendo ser realocados para futuras conexões (CHATTERJEE, 2020).

2.10.4 *First-Last-Fit*

Na estratégia de alocação de espectro *First-Last-Fit*, todos os *slots* de espectro de cada enlace são divididos em várias partições. Essa estratégia sempre procura escolher os *slots* de índices mais baixos nas partições de número ímpar e os de índices mais altos nas partições de número par da lista de *slots* disponíveis (CHATTERJEE, 2020).

Como discutido anteriormente, o esquema *First-Fit* seleciona os *slots* de índices mais baixos, enquanto o *Random-Fit* escolhe aleatoriamente os *slots* da lista de espectro disponível. Essas abordagens, no entanto, podem resultar em situações em que *slots* de espectro estão disponíveis, mas as solicitações de conexão não podem ser atendidas devido à indisponibilidade de *slots* alinhados e contíguos (restrição de contiguidade e continuidade). Com a técnica de alocação *First-Last-Fit*, espera-se um aumento na disponibilidade de *slots* contíguos alinhados, em comparação com as políticas mencionadas, melhorando assim a probabilidade de aceitação de novas conexões (CHATTERJEE, 2020).

2.10.5 *Least-Used*

A estratégia de alocação de espectro *Least-Used* aloca espectro para um caminho de luz a partir de uma lista de *slots* de espectro disponíveis que foram usados pelo menor número de enlaces na rede. Se houver vários *slots* com o mesmo número mínimo de utilizações, a técnica *First-Fit* é aplicada para escolher o melhor conjunto de *slots*. Dessa forma, busca-se distribuir a carga de forma mais uniforme por todos os *slots* de espectro disponíveis, evitando sobrecarga em determinados segmentos da rede e aumentando a eficiência global da utilização do espectro (CHATTERJEE, 2020).

2.10.6 *Most-used*

A política de alocação de espectro *Most-Used* atribui espectro a um caminho de luz a partir de uma lista de *slots* de espectro disponíveis que foram utilizados pelo maior número de enlaces na rede. De forma semelhante à estratégia *Least-Used*, se vários *slots* tiverem o mesmo uso máximo, o esquema *First-Fit* é empregado para a escolha. O objetivo dessa estratégia é maximizar a reutilização do espectro na rede, concentrando a alocação nos *slots* já amplamente utilizados, o que pode ajudar a liberar outras partes do espectro para futuras conexões (CHATTERJEE, 2020).

2.10.7 *Exact-Fit*

O esquema de alocação de espectro *Exact-Fit* busca alocar um bloco de espectro com o número exato de *slots* de frequência disponível a partir do primeiro *slot* adequado. Se esse bloco exato estiver disponível, ele é alocado para atender à solicitação. Caso contrário, o espectro é alocado de acordo com a estratégia *First-Fit*. Esse método pode ajudar a reduzir a fragmentação do espectro, melhorando a utilização dos recursos disponíveis (CHATTERJEE, 2020).

2.10.8 *MSCL*

De acordo com Almeida et al. (2013), o MSCL (*Min Slot Continuity Capacity Loss*) assume a seleção do melhor conjunto de *slots* de frequência, que, ao serem alocados na rede, resultarão no menor impacto em termos de perda de capacidade de alocação. Para cada solicitação de conexão, a perda de capacidade é calculada considerando a rota solicitada a ser alocada, juntamente com todas as rotas que compartilham pelo menos um enlace. O valor da perda de capacidade para uma demanda de n *slots* em uma rota r é dado pela Eq. 2.27:

$$C^{<r>}(n) = \sum_{p \in I_r} S^{<p>}(\psi, n) - S^{<p>}(\psi', n), \quad (2.27)$$

onde $C^{<r>}(n)$ é a perda de capacidade para uma solicitação de tamanho n *slots* após seu estabelecimento na rota r ; I_r é o conjunto de rotas que interferem na rota r ; p é a rota interferente

atual; ψ representa o estado atual da rede (o conjunto de todos os caminhos e *slots* alocados); ψ' representa o estado da rede após o estabelecimento da solicitação; $S^{<p>}(\psi, n)$ representa o número total de possibilidades de alocação que uma solicitação com tamanho n *slots* tem no caminho p antes do estabelecimento de r . Em outras palavras, é o número de maneiras que uma solicitação de tamanho n pode ser alocada em um caminho específico p antes do estabelecimento de r .

A Eq. 2.27 calcula o impacto que uma solicitação de tamanho n tem na rota r e em todas as rotas que compartilham pelo menos um enlace. É necessário considerar todas as possíveis demandas para a rota r por meio da Eq. 2.28 para obter a perda total de capacidade na rede:

$$C^{<r>} = \sum_{n \in N} C^{<r>}(n), \quad (2.28)$$

onde N é o conjunto de todas as classes de demanda possíveis que podem ser alocadas em r , e $C^{<r>}$ representa a perda total de capacidade para o conjunto N . A posição espectral que atinge o menor valor de $C^{<r>}$, obtida pela Eq. 2.28, será a posição de alocação para a solicitação. Portanto, o valor da perda de capacidade pode ser obtido conhecendo os tamanhos e quantidades das lacunas. Assim, o número de maneiras que uma solicitação pode ser alocada é dado pela Eq. 2.29:

$$s(n) = \sum_{l \in L} s(h_l, n) = \sum_{l \in L} (h_l - n + 1), \quad (2.29)$$

onde $s(h_l, n)$ é o número de maneiras que uma solicitação de tamanho n pode ser alocada em uma lacuna de tamanho h_l ; L é o conjunto de todas as lacunas. A perda de capacidade é obtida comparando esse valor antes e depois de uma alocação potencial por meio da Eq. 2.27.

Para um entendimento mais detalhado do algoritmo MSCL, consulte as referências (ALMEIDA et al., 2013; SANTOS; ALMEIDA-JUNIOR; ARAÚJO, 2021).

2.11 Otimização multiobjetivo

A otimização multiobjetivo é uma técnica amplamente adotada em problemas de engenharia e ciências aplicadas, onde há múltiplos objetivos em conflito. Tais problemas envolvem mais de uma função objetivo que precisa ser minimizada ou maximizada ao mesmo tempo, demandando a busca por soluções que ofereçam o melhor compromisso entre essas metas. Em vez de buscar uma única solução ideal, a otimização multiobjetivo procura um conjunto de soluções chamado de fronteira de Pareto (DEB, 2001; COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007).

2.11.1 Conceitos fundamentais

No contexto da otimização multiobjetivo, os principais conceitos incluem:

- **Solução de Pareto:** Uma solução é tida como Pareto-ótima quando nenhum objetivo pode ser aprimorado sem que ao menos um outro seja prejudicado. Esse princípio é fundamental para o desenvolvimento da fronteira de Pareto (MARLER; ARORA, 2010).
- **Fronteira de Pareto:** Também chamado de conjunto Pareto-ótimo, este termo se refere ao grupo de soluções que são consideradas Pareto-ótimas para um problema específico. Ele oferece um panorama abrangente dos equilíbrios entre diferentes objetivos, possibilitando a escolha da solução que melhor satisfaça os requisitos durante o processo de tomada de decisão. (MIETTINEN, 1999).
- **Dominância de Pareto:** Uma solução “A” domina uma solução “B” se “A” for pelo menos tão boa quanto “B” em todos os objetivos e estritamente melhor em pelo menos um deles (DEB, 2001).

2.11.2 Algoritmos de Otimização Multiobjetivo

Diversos algoritmos foram desenvolvidos para resolver problemas de otimização multiobjetivo, variando desde técnicas analíticas até métodos baseados em heurísticas e meta-heurísticas. Entre os mais utilizados estão:

- **Algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEAs):** como o NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) e o MOEA/D (*Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition*), que utilizam populações de soluções para explorar e aproximar a fronteira de Pareto de maneira eficiente (DEB, 2001; ZHANG; LI, 2007).
- **Métodos baseados em escalarização:** transformam o problema multiobjetivo em um problema de único objetivo, combinando os diferentes objetivos em uma função ponderada ou utilizando outras técnicas, como o método ε -restrito (MIETTINEN, 1999).
- **Métodos híbridos:** combinação de abordagens matemáticas e meta-heurísticas para explorar as vantagens de cada método e superar suas limitações individuais (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007).

2.11.3 Desafios e aplicabilidades

A otimização multiobjetivo apresenta diversos desafios, incluindo:

- **Complexidade computacional:** a busca pela fronteira de Pareto pode ser computacionalmente intensiva, especialmente em problemas com grande dimensionalidade e objetivos conflitantes (DEB, 2001).
- **Avaliação da qualidade das soluções:** determinar métricas que avaliem a proximidade e a distribuição das soluções na fronteira de Pareto.

- **Interação com tomadores de decisão:** traduzir as informações da fronteira de Pareto em decisões práticas pode ser desafiador, especialmente em problemas de alta dimensionalidade (MIETTINEN, 1999).

A aplicação da otimização multiobjetivo em redes ópticas elásticas tem sido utilizada para equilibrar múltiplos fatores, como o uso eficiente do espectro, a QoS e a capacidade de atender à demanda, reduzindo a probabilidade de bloqueio e otimizando a alocação de recursos (ZHANG; LI, 2007).

Dessa forma, a otimização multiobjetivo desempenha um papel essencial na solução de problemas complexos e na busca de soluções sustentáveis e eficientes para sistemas modernos.

2.12 Algoritmo NSGA-II

O NSGA-II é um dos algoritmos evolutivos multiobjetivo mais amplamente utilizados, devido à sua eficiência em lidar com problemas que envolvem múltiplos objetivos conflitantes. Desenvolvido por (DEB et al., 2002), o NSGA-II introduz melhorias significativas em relação à sua versão anterior, o NSGA, com destaque para a redução da complexidade computacional, o uso de uma estratégia de arquivamento elitista e um método de diversidade baseado em distância de aglomeração (*crowding distance*).

2.12.1 Características do NSGA-II

O NSGA-II possui várias características que o tornam adequado para a otimização multiobjetivo:

- **Ordenação por não-dominância:** o algoritmo utiliza um procedimento eficiente para classificar a população em diferentes frentes de Pareto, com complexidade de $O(MN^2)$, onde M é o número de objetivos e N é o tamanho da população.
- **Preservação da diversidade:** a diversidade das soluções é mantida por meio da métrica de *crowding distance*, que avalia o espaçamento das soluções dentro de uma mesma frente de Pareto (DEB et al., 2002).
- **Elitismo:** o NSGA-II incorpora um mecanismo elitista, garantindo que as melhores soluções de uma geração sejam preservadas para a próxima, favorecendo a convergência para a fronteira de Pareto (DEB et al., 2002).
- **Seleção binária por torneio:** a seleção de indivíduos para reprodução é baseada em torneios binários, considerando tanto a ordem de não-dominância quanto a distância de aglomeração (DEB et al., 2002).

2.12.2 Etapas do NSGA-II

O funcionamento do NSGA-II pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. **Inicialização:** uma população inicial P_0 é gerada aleatoriamente e avaliada em relação aos objetivos do problema.
2. **Classificação por frentes:** a população é dividida em frentes de Pareto com base na dominância de Pareto.
3. **Operadores genéticos:** operadores de cruzamento e mutação são aplicados para gerar uma nova população Q_t .
4. **União de populações:** as populações P_t (atual) e Q_t (gerada) são unidas, formando uma população combinada R_t .
5. **Seleção da próxima geração:** a população combinada R_t é classificada por não-dominância, e os melhores indivíduos, com base na ordem de não-dominância e na distância de aglomeração, são selecionados para formar P_{t+1} .

2.12.3 Aplicações do NSGA-II

O NSGA-II é amplamente utilizado em redes ópticas elásticas por sua capacidade de encontrar soluções próximas à fronteira de Pareto. A preservação da diversidade o torna uma ferramenta poderosa para problemas multiobjetivo (DEB et al., 2002; COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007).

2.12.4 Vantagens e limitações

Embora o NSGA-II seja amplamente reconhecido por sua eficácia, algumas limitações incluem a necessidade de ajustes cuidadosos de parâmetros, como o tamanho da população e o número de gerações, além do aumento da complexidade computacional em problemas com alta dimensionalidade ou um grande número de objetivos (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007).

Capítulo

3

Revisão da Literatura em Redes Ópticas Elásticas

Conforme discutido no capítulo anterior, uma EON é uma tecnologia que, entre outras capacidades, tem a habilidade de alocar espectro para caminhos ópticos conforme os requisitos de largura de banda de cada cliente, buscando melhorar a utilização dos recursos disponíveis. Esse gerenciamento eficiente evita o desperdício de espectro e aumenta o desempenho da rede.

Atualmente, há uma crescente preocupação de que a largura de banda utilizável nas fibras ópticas esteja se aproximando rapidamente de seu limite máximo. Diante dessa possibilidade de saturação, a comunidade científica tem se concentrado na busca de soluções que permitam melhorar o uso dos recursos da rede, como a largura de banda da fibra, para acomodar a crescente demanda de tráfego. Nesse contexto, inúmeras pesquisas sobre tecnologias voltadas para o aprimoramento do desempenho das EONs foram realizadas e introduziram técnicas inovadoras para melhorar a utilização dos recursos ópticos.

Neste contexto, este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura, identificando as principais estratégias mais recentes para alocação de recursos em EONs.

3.1 O surgimento

A rápida evolução das redes de comunicação e o aumento da demanda por tráfego de dados de alta capacidade incentivaram o desenvolvimento das EONs, uma tecnologia que melhora o uso do espectro e aumenta a eficiência na transmissão óptica. O ponto de partida para essa evolução foi o trabalho pioneiro de Jinno et al. (2009), que introduziu a arquitetura SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*). Essa abordagem permitiu a alocação flexível de espectro, segmentando-o em fatias ajustáveis de acordo com a demanda, promovendo uma utilização eficiente da largura de banda e reduzindo o desperdício de recursos. A proposta de Jinno et al. foi fundamental para o conceito de EONs como redes adaptáveis, pavimentando o caminho para a implementação de técnicas que melhoram o uso dinâmico do espectro em

cenários de tráfego variável.

Com a consolidação das EONs, surgiram novos desafios relacionados à atribuição de modulação e espectro, roteamento e, mais recentemente, a redução das interferências não-lineares (NLIs - *Non Linear Interference*), que afeta diretamente a qualidade da transmissão e a eficiência espectral, através da atribuição de potência. Em 2011, Poggiolini et al. (2011) desenvolveram um modelo analítico para prever o impacto das NLIs em sistemas ópticos coerentes, abordando a interferência causada pelo ruído de emissão espontânea amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) e a dispersão cromática. Esse estudo estabeleceu as bases para a modelagem das NLIs em redes ópticas de alta capacidade, representando a interferência como ruído gaussiano (GN - *Gaussian Noise*), o que simplifica a previsão de QoT e permite uma alocação mais eficiente de recursos da rede. Em 2012, Carena et al. (2012) publicaram um trabalho que representou um avanço significativo na modelagem analítica dos efeitos de propagação não-linear em enlaces ópticos coerentes não compensados. Este trabalho introduz um modelo perturbativo baseado em uma abordagem semelhante ao fenômeno de mistura de quatro ondas (FWM - *Four Wave Mixing*) para avaliar a interferência gerada durante a propagação do sinal em sistemas DWDM. O estudo detalha a metodologia de segmentação do espectro em componentes espectrais independentes, aplicando o modelo FWM para descrever a interferência gerada a partir das interações desses componentes. Com uma extensa validação simulatória, o estudo analisa formatos de modulação como PM-QPSK, PM-8-QAM e PM-16-QAM, com resultados que mostram uma alta precisão na previsão do alcance máximo do sistema e da potência de lançamento da luz ideal para cada formato. Carena et al. também destacam a aplicabilidade do modelo para o planejamento e a otimização de redes de longa distância coerentes, fornecendo uma ferramenta robusta para avaliar as limitações da QoT e identificar pontos de saturação de desempenho em diferentes configurações de rede. A partir dos resultados obtidos, o estudo sugere que o modelo FWM é uma abordagem eficaz para a previsão de interferências não-lineares em redes ópticas elásticas, uma vez que fornece uma análise detalhada que pode ser ajustada para diferentes tipos de fibra e espaçamentos de canais. Esse nível de precisão e adaptabilidade é essencial para o projeto de redes coerentes de próxima geração, que buscam maximizar o uso do espectro ao mesmo tempo em que mantêm altos padrões de QoT.

Ainda em 2012, Poggiolini (2012) expandem o modelo GN para o contexto de enlaces ópticos coerentes não compensados, abordando as NLIs como um fator crucial na degradação da QoT em sistemas DWDM. O modelo apresentado trata as interferências não-lineares como um ruído gaussiano aditivo (AGN - *Additive Gaussian Noise*), que se acumula de maneira previsível ao longo do enlace, permitindo uma análise mais simplificada e intuitiva da propagação óptica. Este trabalho contribuiu para a literatura ao validar o modelo GN em uma ampla gama de cenários, incluindo diferentes formatos de modulação e tipos de fibra, confirmando sua precisão e relevância como ferramenta de projeto para redes ópticas de alta capacidade. A inovação do modelo GN neste trabalho reside na sua abordagem simplificada para lidar com NLIs, facilitando

a análise de desempenho e o planejamento de redes sem necessidade de complexas simulações. Os autores destacam que o modelo é capaz de prever com precisão a QoT em redes sem compensação de dispersão, especialmente em condições de baixa a média não-linearidade, onde o comportamento do sinal se assemelha ao de um ruído gaussiano. A utilização do modelo GN, conforme apresentado neste estudo, possibilita uma avaliação rápida das limitações de desempenho, reduzindo o tempo de planejamento e tornando-se essencial para a otimização de redes que operam próximas ao limite teórico de eficiência espectral.

Em 2014, Poggiolini et al. (2014) oferece uma abordagem para entender o impacto das NLIs em sistemas ópticos coerentes. Este estudo examina o comportamento das NLIs sob diferentes condições de transmissão, apresentando o modelo GN como uma ferramenta prática para prever a degradação da QoT em sistemas não compensados de dispersão. A partir de simulações e testes experimentais, o estudo valida o modelo GN como um método confiável para prever o desempenho de redes em cenários de baixa a média não-linearidade, destacando que o modelo consegue representar com precisão as limitações teóricas e práticas da propagação óptica não-linear em redes de longa distância. Além disso, discute a aplicabilidade do modelo GN em sistemas de transmissão coerente, demonstrando que ele é altamente eficaz para a previsão de QoT, especialmente em configurações de redes sem compensação de dispersão. Poggiolini et al. também exploram como o modelo pode ser expandido para incluir diferentes tipos de fibra e formatos de modulação, tornando-o uma ferramenta versátil para o projeto e otimização de redes. Essa versatilidade é crucial para o desenvolvimento das EONs, onde a otimização do uso do espectro e a gestão das interferências são essenciais para alcançar altas taxas de transmissão e eficiência espectral.

Em resumo, nota-se que a evolução das EONs partiu do trabalho pioneiro de Jinno et al. (2009) em que a introdução da arquitetura (SLICE - *Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network*) permitiu uma flexibilidade inédita na alocação de espectro, promovendo o uso mais eficiente dos recursos de rede. Posteriormente, os modelos analíticos para NLIs desenvolvidos por Poggiolini et al. (2011), Poggiolini (2012), Carena et al. (2012), Poggiolini et al. (2014), como o modelo GN e a abordagem baseada no fenômeno de FWM, forneceram bases robustas para prever e minimizar os efeitos das NLIs em sistemas ópticos coerentes, particularmente em redes de longa distância. Esses avanços foram fundamentais para melhorar a QoT e suportar o crescimento contínuo na demanda por capacidade de transmissão nas EONs. A aplicabilidade prática dos modelos discutidos, especialmente o modelo GN, oferece um caminho promissor para o planejamento de redes ópticas de alta capacidade, permitindo um balanço entre a eficiência espectral e a confiabilidade da transmissão. Com isso, o cenário atual das EONs avança rumo a redes mais adaptativas e eficientes, essenciais para suportar as necessidades de futuras gerações de redes ópticas, onde a maximização do uso do espectro e a mitigação das NLIs se tornam cruciais para a melhoria da eficiência do sistema.

3.2 Percorrendo o caminho até os avanços mais recentes

Como foi dito anteriormente, as EONs surgiram como uma solução inovadora para enfrentar os desafios impostos pelas crescentes demandas por largura de banda e eficiência na alocação de recursos ópticos. Essa tecnologia tem evoluído significativamente, impulsionada por estratégias voltadas à otimização do espectro disponível e à melhoria do desempenho das redes em cenários de tráfego cada vez mais complexos e dinâmicos.

Nesta seção, busca-se apresentar um panorama de alguns dos principais avanços na pesquisa sobre EONs, revisitando conceitos fundamentais e destacando técnicas relevantes desenvolvidas para a alocação de recursos. Entre os problemas críticos abordados, destacam-se a gestão eficiente do espectro e a redução da probabilidade de bloqueio, desafios centrais para o aprimoramento dessa tecnologia. Com isso, objetiva-se fornecer uma visão do estado da arte, fundamentando a proposta desta pesquisa no contexto das demandas futuras e lacunas ainda existentes na área.

Para alcançar esse objetivo, esta revisão da literatura foi conduzida com base em uma metodologia que incluiu a definição de palavras-chave e strings de busca específicas para identificar os trabalhos mais relevantes. A análise abrangeu publicações a partir do ano de 2009, tendo como critérios de escolha o número de citações e o fator de impacto. Os resultados obtidos permitem uma visão quantitativa e qualitativa das tendências e abordagens predominantes no campo das EONs.

Para iniciar a discussão, parte-se do princípio de que as EONs utilizam transceptores sintonizáveis de largura de banda variável segmentável (S-BVTs - *Sliceable-Bandwidth Variable Transceivers*), os quais oferecem várias opções de configuração, resultando em diferentes parâmetros de transmissão, como taxa de transmissão, nível de modulação, espectro e alcance variável dos caminhos de luz. Essa flexibilidade, característica fundamental dos S-BVTs, pode ser explorada para economizar espectro e reduzir custos, destacando sua relevância no projeto e controle das EONs.

Nesse contexto, diversas técnicas de gerenciamento de espectro têm sido propostas. O trabalho de Talebi et al. (2014), por exemplo, revisa e classifica a literatura sobre o tema, abordando categorias como RSA estático (*offline*), RSA dinâmico (*online*), RSA com adaptação à distância, RSA ciente de fragmentação, agregação de tráfego e sobrevivência.

Complementando a revisão mencionada, as subseções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3 discutem algumas pesquisas recentes relacionadas a essas técnicas, oferecendo uma visão geral sobre as pesquisas sobre alocação de recursos em EONs.

Em seguida, este capítulo também aborda os avanços recentes relacionados à inclusão da potência de lançamento como um novo grau de liberdade, demonstrando como essa abordagem pode contribuir significativamente para o aumento do desempenho das redes. Essa análise é fundamental para estabelecer uma base sólida que sustenta as propostas desenvolvidas nos capítulos subsequentes.

3.2.1 RSA estático

Como definição do problema de RSA estático, pode-se pensar na situação em que a entrada consiste em um conjunto de demandas previstas, geralmente na fase de planejamento da rede, tendo como objetivo atribuir um caminho físico e uma porção contígua de espectro para cada demanda de modo a minimizar a quantidade total de espectro alocado (SIMMONS, 2014; LÓPEZ; VELASCO, 2016; VELASCO; RUIZ, 2017).

Neste contexto, Alaskar, Ahmad e Alyatama (2016) abordam uma formulação de escalonamento multiprocessador do problema de RSA estático em uma EON. Os autores tomam como base uma outra referência onde foi mapeado o problema RSA estático como um problema de escalonamento em sistemas multiprocessadores, onde vários processadores podem ser usados simultaneamente para servir uma tarefa da seguinte forma: dado um sistema multiprocessador que inclui um conjunto de n processadores idênticos (enlaces), um conjunto de n tarefas (demanda de tráfego) e tempo de processamento t (espectro) para a tarefa τ (solicitação), agendar as tarefas com o objetivo de minimizar o tempo total de processamento consumido por todas as tarefas (quantidade de espectro necessária). Como resultado do mapeamento, tem-se uma identidade da rede com um sistema multiprocessador; as solicitações são mapeadas como tarefas, os enlaces como processadores e a quantidade de espectro como o tempo de processamento. Assim, no escalonamento, cada tarefa recebe uma prioridade de acordo com alguma função de ponderação, e uma lista de prioridades é construída, colocando as tarefas em ordem decrescente de sua prioridade. Uma tarefa com a prioridade mais alta é selecionada da lista de prioridades e atribuída ao processador. Os algoritmos de escalonamento de lista diferem principalmente em suas funções de prioridade, e a qualidade da solução é muito sensível às prioridades atribuídas às tarefas. Então, os autores propõem diferentes mecanismos de ordenação de prioridade para obter uma solução de melhor qualidade em um algoritmo de escalonamento de listas, tendo como objetivo utilizar eficientemente os recursos de espectro disponíveis, com respeito tanto à capacidade quanto às restrições de enlaces. O problema de alocação de espectro tem duas dimensões diferentes: largura de banda (tempo de processamento) e os enlaces (número de processadores). O desempenho e a eficiência dos algoritmos foram avaliados com uma variedade de distribuições de demanda e diferentes topologias de rede, e os resultados mostraram que os algoritmos propostos alcançaram melhores desempenhos em relação a algoritmos existentes.

Focando apenas no roteamento, deixado de lado a alocação de espectro (SA), Agrawal, Bhatia e Prakash (2018) demonstraram que os esquemas de roteamento convencionais de rota fixada (FR - *Fixed Routing*), rota fixa alternativa (FAR - *Fixed Alternative Routing*) e enlace disjunto (LD - *Link Disjoint*) não utilizam o espectro de forma eficiente em EONs, isto é, a rota preferencial obtida usando a contagem de saltos (HC - *Hope Counting*), k -caminhos mais curtos (KSP - *k-shortest paths*) ou LD pode consumir mais recursos espectrais do que as outras rotas possíveis para um par de nós de origem-destino. Assim, os autores propuseram um novo esquema de roteamento chamado de k caminhos adaptativos à distância (KDAP - *K-Distance Adaptive Paths*) para realizar FR e FAR utilizando o espectro de uma forma mais eficiente

em comparação aos esquemas de roteamento convencionais, utilizando para isso o formato de modulação, sem considerar o uso de regeneradores. Para a avaliação do desempenho, fazem uma comparação da eficiência de utilização do espectro no KDAP com os esquemas HC, KSP e LD amplamente utilizados em combinação com alguma política de SA presente na literatura. Foram realizadas simulações com três topologias de redes: rede de teste de 7 nós TEST7, NSFNET e rede *backbone* de 24 nós dos Estados Unidos UBN24, avaliando o desempenho dos esquemas resolvendo o problema RSA sob requisitos de tráfego homogêneo e heterogêneo. Os resultados demonstram que há uma variação de desempenho entre os esquemas KSP, HC e LD a depender da topologia de rede. No entanto, o KDAP proposto sempre funciona melhor para todas as redes e cenários de tráfego considerados. O KDAP é até 60% melhor em termos de utilização de espectro.

Outra ideia interessante é apresentada por Yuan et al. (2019), que propuseram um algoritmo de atribuição de espectro chamado (CLIB - *Constrained Lower Indexed Block*) para o problema RSA. O esquema é baseado no algoritmo de roteamento KSP e sua ideia principal é atribuir *slots* de frequência com índices mais baixos em algum caminho para uma solicitação de conexão, com a restrição de que o comprimento do caminho não seja muito aumentado. Para chegar a essa ideia, os autores compararam as políticas de atribuição de espectro e descobriram que, se as fatias ocupadas fossem o mais concentradas possível, então o esquema tinha um bom desempenho de PB. Porém, os métodos existentes não consideravam este fato, levando-os à ideia de projetar um algoritmo de atribuição de espectro com esta finalidade. Então, K-caminhos candidatos são calculados antecipadamente pelo algoritmo de Yen (1971) para cada par origem-destino. Quando uma solicitação de conexão chega, o primeiro bloco de espectro disponível em cada caminho candidato é encontrado. Para dois blocos disponíveis em dois caminhos, se o bloco com índice mais baixo estiver no caminho mais curto, é escolhido sem dúvida; no entanto, se o bloco com índice mais baixo estiver no caminho mais longo, isso trará alguns problemas, porque selecionar este bloco usaria mais recursos da rede. Nesse caso, o algoritmo proposto escolheria o bloco com índice mais baixo no caminho mais longo, desde que o caminho mais longo satisfaça a restrição de que o incremento do comprimento do caminho não seja maior que um determinado limite. Esse esquema agrega os *slots* ocupados em índices mais baixos, deixando os de índices mais altos livres para as solicitações de conexão posteriores, portanto, aumentando a probabilidade de as conexões serem estabelecidas com sucesso. Foram usadas três topologias mais comuns para simulação: NSFNET, rede dos Estados Unidos de 24 nós UBN24 e rede europeia COST239. Os resultados das simulações mostraram que o CLIB obteve uma melhor PB em relação a esquemas conhecidos como *First-Last-Fit* (FLF) e *Most-Used-First-Hybrid-Grouping* (MUF-HG).

Uma proposta baseada em programação linear inteira (ILP - *Integer Linear Programming*) é feita por Araújo et al. (2020), a qual apresenta um novo modelo chamado de (MCF - *Multi-commodity Flow*) no contexto das EONs em conjunto com um procedimento de balanceamento de carga simples, que faz uso da abordagem BSR (*Best Among the Shortest Routes*) para

balancear a rede, gerando caminhos promissores a serem usados em alguma formulação baseada em caminhos da literatura. A formulação (LP-CA - *Link-path Channel Assignment*) é um modelo de ILP baseado na pré-computação das k rotas mais curtas associadas a cada demanda; nesta, é introduzido o conceito de canal para fins de modelagem. Um canal corresponde a um conjunto de *slots* de frequência adjacentes (restrição de contiguidade) que podem ser usados para transportar um sinal óptico com uma banda requerida. Com base nisso, o modelo MCF proposto faz uso do conceito de canal empregado no modelo LP-CA para gerar caminhos promissores. Os resultados obtidos mostraram que o esquema proposto apresentou, em média, resultados superiores ao modelo LP-CA. O procedimento de balanceamento de carga também se mostrou bastante eficiente, obtendo soluções de alta qualidade na maioria das instâncias consideradas pelos autores.

Por fim, Lezama et al. (2021) apresenta uma estratégia de pré-computação para ordenação simples chamada MSF (*Most Subcarrier First*) para obter melhores soluções quando algoritmos inspirados na natureza são aplicados ao problema RSA para otimizar o comprimento médio do caminho (APL - *Average Path Length*) e a utilização do espectro (SU - *Spectrum Usage*) simultaneamente. Os autores mostram que a MSF é a estratégia de pré-computação para ordenação mais eficaz quando comparada a outras heurísticas bem conhecidas na literatura: *First-Fit* (FF), (LPF - *Long Path First*). Apresentam também um exemplo de como o RSA é resolvido com o (ACO - *Ant Colony Optimization*). Finalmente, aplicam a MSF em combinação com três algoritmos inspirados na natureza: Roteamento e Alocação de Espectro através de Otimização por Colônia de Formigas (ACO-RSA - *Ant Colony Optimization Routing Spectrum Allocation*), indexação de posição relativa baseada em evolução diferencial (DE-RPI - *Differential Evolution Relative Position Indexing*) e combinatória geral da evolução diferencial (DE-GC - *Differential Evolution General Combinatory*) para otimizar o SU e o APL. Os experimentos foram realizados utilizando algumas topologias de rede com 5 e 7, 14 e 21, 19 e 39, 40 e 58 nós e enlaces, respectivamente. Na comparação entre os esquemas FF, LPF e MSF com a ACO-RSA, este último economizou até 20% do espectro em médias nas topologias em relação ao pior esquema. Também é mostrado que uma melhoria para ACO-RSA, DE-RSA e DE-GC usando soluções iniciais geradas com a política de ordenação MSF ajuda a obter melhores resultados em termos médios de aptidão. Então, a partir dos resultados das simulações, a pesquisa mostra como a estratégia de pré-computação de ordenação MSF pode ajudar na obtenção de melhores resultados, ou seja, aplicando essa técnica como base antes de usar algoritmos mais elaborados como ACO-RSA, DE-RPI e DE-GC, resultará em uma convergência mais rápida para melhores soluções.

A análise das diferentes abordagens para a resolução do problema de RSA em EONs evidencia a diversidade de estratégias e avanços tecnológicos que têm sido desenvolvidos para enfrentar os desafios de otimização de recursos em cenários estáticos. Desde formulações baseadas em analogias com sistemas multiprocessadores até algoritmos de roteamento adaptativos e técnicas baseadas em programação linear inteira, os trabalhos revisados mostram um progresso

significativo em termos de eficiência espectral, redução da probabilidade de bloqueio e melhor utilização da infraestrutura de rede.

Técnicas como o escalonamento de tarefas com funções de prioridade, esquemas de roteamento adaptativos e métodos baseados em otimização por colônias de formigas destacam-se pela capacidade de explorar o espectro disponível de maneira mais eficiente, muitas vezes superando abordagens convencionais. Além disso, a inclusão de estratégias de pré-computação, como o MSF, e o uso de algoritmos bioinspirados demonstram como inovações metodológicas podem melhorar significativamente o desempenho em topologias de rede variadas.

Os resultados apresentados ao longo desta seção fornecem uma visão geral das técnicas que vêm sendo desenvolvidas no contexto de RSA estático, ressaltando o impacto das diferentes abordagens no desempenho das EONs. Ao mesmo tempo, apontam para novas oportunidades de pesquisa, como a integração de técnicas que combinem otimização de espectro com outros parâmetros da rede, incluindo a potência de lançamento, para alcançar resultados ainda mais robustos.

As próximas seções deste capítulo aprofundarão a discussão sobre as técnicas de alocação de recursos, incluindo abordagens dinâmicas e a integração de múltiplos graus de liberdade, como potenciais soluções para os desafios futuros das EONs.

3.2.2 RSA dinâmico

O roteamento e alocação de espectro dinâmico ou *online* se caracteriza pelas chegadas e permanência de requisições em um tempo aleatório.

Neste contexto, Dallaglio et al. (2015) avalia o desempenho das tecnologias ML-SBVT (*Multi-Lasers SBVT*) e MW-SBVT (*Multi-Wavelength SBVT*) em uma EON com número limitado de transceptores por nó. O desempenho da rede é investigado em função do número de transceptores disponíveis por nó e da carga de rede oferecida em um cenário de tráfego dinâmico. Assim, é proposto um esquema de roteamento e atribuição de espectro e transceptor (RSTA - *Routing, Spectrum and Transponder Assignment*) que integra a seleção do transceptor com o RSA, levando em consideração a tecnologia, a disponibilidade no momento e as restrições de cada transceptor específico. Os resultados da simulação mostraram que o esquema RSTA proposto oferece benefícios em relação ao RSA tradicional em termos da PB. Além disso, os autores demonstraram que a melhor solução de projeto de rede é implantar nós heterogêneos equipados com transceptores baseados em ambas as tecnologias SBVT. As simulações também revelaram que, quando todo o tráfego é composto por supercanais de alta taxa de bits, o MW-SBVT é a tecnologia mais indicada.

Com o objetivo de economizar recursos, uma abordagem denominada algoritmo de minimização da soma ponderada das reduções de recursos ($\min \sum \omega \Delta R$) é proposta por Yuan et al. (2019). Assim, os autores apresentam o conceito de redução de recursos ΔR , que mede a variação de recursos disponíveis em um caminho e em todos os caminhos associados quando um bloco de espectro é atribuído a uma solicitação de conexão, observando as mudanças de

continuidade e contiguidade no caminho. Os resultados da simulação mostram que, quando os parâmetros da métrica são ajustados para valores apropriados, o algoritmo proposto pode diminuir significativamente a PB em comparação a outros trabalhos de *benchmark*.

Uma proposta de provisionamento de serviço dinâmico com peso distribuído (WDSP - *Weight Distributed Service Provisioning*) para RSA é feita por Mahala, Ujjwal e Thangaraj (2021). O trabalho considera uma EON com BVTs com flexibilidade de escolha do formato de modulação e *slots* de espectro contíguos. Assim, o transceptor flexível pode ser sintonizado de tal maneira que possa transmitir a uma taxa específica para uma distância específica a quantidade apropriada de *slots* de espectro e bandas de guarda para exibir a QoS viável. Neste trabalho, o conjunto de rotas é obtido usando o algoritmo de caminho mais curto de Dijkstra. As solicitações de conexão são ordenadas de acordo com a quantidade de *slots* espectrais necessários, e estas são alocadas em *slots* indexados de acordo com seu tamanho em ordem crescente, e, portanto, os *slots* alinhados contíguos e viáveis são aumentados, o que melhora a fragmentação da largura de banda. Como resultado, o bloqueio de conexões devido ao congestionamento da rede é reduzido. A simulação foi realizada usando as topologias de rede PAN-European de 28 nós e 41 enlaces e NSFNET de 14 nós e 21 enlaces. O total de conexões instaladas aumentou em 16–21% em relação ao *benchmark* com as técnicas SPFF (*The Shortest Path First-Fit*) e SPEF (*Shortest Path Exact-Fit*), tradicionalmente usadas para este fim. Além disso, o esquema WDSP aumentou a quantidade de *slots* disponíveis em 22–27%. Em resumo, as simulações demonstram que a técnica proposta cria *slots* disponíveis mais contíguos, reduzindo a PB e aumentando a eficiência espectral, levando a um aumento no total de conexões atendidas.

Finalmente, Dinarte et al. (2021) apresenta um estudo abrangente sobre estratégias de ordenação RSA, e propõe uma política de RSA híbrida que define a ordenação mais adequada (R-SA ou SA-R) a ser usada em cada par de nós origem-destino na rede para combinar os benefícios em uma estratégia mais eficiente que mantém a simplicidade de ambos. Para isso, os autores desenvolveram um processo meta-heurístico evolutivo baseado em algoritmo genético (GA - *Genetic Algorithm*) para selecionar qual ordenação RSA deve ser usada em cada requisição de caminho de luz para cada par de nós origem-destino específico na rede sob tráfego dinâmico. Essa estratégia é chamada de roteamento e atribuição de espectro híbrido (HRSA - *Hybrid Routing and Spectrum Assignment*). A ordenação RSA significa realizar atribuição de espectro em função da rota, ou executar roteamento em função de algumas faixas de espectro candidatas pré-calculadas por alguns critérios de algoritmo de SA. O algoritmo proposto retorna a escolha de ordenação RSA mais adequada para cada par de solicitação de conexão que fornece a PB mais baixa. As simulações foram realizadas em cinco topologias diferentes: NSFNET de 14 nós e 21 enlaces, SMALLNET de 10 nós e 24 enlaces, EON-RT de 28 nós e 34 enlaces, RING de 11 nós e 11 enlaces e TOROIDAL de 9 nós e 18 enlaces, sendo todos os enlaces bidirecionais. O resultado mostrou que o HRSA é capaz de melhorar significativamente o desempenho da EON, reduzindo a PB da solicitação de caminho de luz em até 35% em comparação com as ordenações RSA clássicas. No entanto, o HRSA proposto foi projetado com um único objetivo a

ser otimizado. Assim, os autores apontam que este pode ser aprimorado ao incluir a otimização multiobjetivo para trazer benefícios adicionais e aumentar o desempenho da rede.

A análise das abordagens para RSA dinâmico em EONs revela avanços significativos no desenvolvimento de técnicas voltadas à melhoria do desempenho em cenários de tráfego aleatório. As propostas revisadas demonstram que estratégias inovadoras, como o RSTA, WDSP e HRSA, conseguem abordar eficientemente os desafios de fragmentação do espectro, eficiência espectral e redução da PB.

As soluções que integram tecnologias como SBVTs, algoritmos de ordenação híbrida e métodos de otimização com meta-heurística provaram ser particularmente eficazes na adaptação às dinâmicas do tráfego. Resultados como os obtidos pelo esquema WDSP, com aumentos significativos na quantidade de conexões atendidas e na disponibilidade de *slots*, e pelo HRSA, com redução de PB de até 35%, destacam o potencial de tais abordagens na evolução das EONs.

No entanto, mesmo com os progressos apresentados, as limitações de algumas propostas, como o foco em um único objetivo, abrem espaço para futuras pesquisas. A inclusão de estratégias de otimização multi-objetivo e a avaliação em cenários mais complexos podem ampliar ainda mais o impacto dessas técnicas, respondendo às crescentes demandas.

Os *insights* obtidos nesta seção servirão de base para explorar outras dimensões da alocação de recursos, consolidando o entendimento dos desafios e soluções relacionados ao tráfego dinâmico em EONs.

3.2.3 RSA com adaptação à distância

O conceito de RSA adaptável à distância foi introduzido por Jinno et al. (2010) para explorar o *trade-off* entre o alcance do sinal e a largura de banda ocupada, ajustando o formato de modulação de acordo com a QoT do sinal ao longo do caminho de luz para melhorar a eficiência espectral.

Com respeito a esta abordagem, são destacados aqui alguns trabalhos, a começar por Sambo et al. (2015) que investiga o conceito de RSA com atribuição de código (RCSA) em EONs. Este é um tipo de técnica de adaptação à distância que explora o código variável, ou seja, a taxa de código (redundância) é ajustada dependendo do alcance óptico necessário. Neste caso, a codificação é selecionada para satisfazer a QoT, considerando penalidades como ruído ASE e efeitos de filtragem. Então, a largura da porção do espectro passa a depender dos seguintes fatores: taxa solicitada, formato de modulação, QoT ao longo da rota e o código selecionado. Essa relação foi usada em simulações de rede para comparar o RCSA com um RMSA de *benchmark* baseado em NWDM de formato de modulação adaptativo, considerando os seguintes formatos de modulação: PM-QPSK (*Polarization Multiplexing-Quadrature Phase Shift Keying*), PM-8-QAM (*Polarization Multiplexed-8-Quadrature Amplitude Modulation*), PM-16-QAM (*Polarization Multiplexed-16-Quadrature Amplitude Modulation*). O objetivo foi minimizar a ocupação do espectro, garantindo a QoT, ou seja, utilizando o formato de modulação com mais

eficiência espectral admitido pela camada física. Os resultados mostraram que o RCSA alcança o melhor desempenho, reduzindo a PB em até duas ordens de magnitude em relação ao RMSA.

Em seu trabalho Costa, Ramos e Drummond (2016) propõe uma solução para o problema de roteamento, nível de modulação e atribuição de espectro (RMSA) em cenário de tráfego dinâmico usando controle de modulação, espectro e agregação de tráfego e óptica, chamada de MBM (*Maximize the use of Best Modulation format*). Assim, os autores consideram os aspectos mais importantes de outras abordagens em EONs: agregação de tráfego, para melhor uso dos recursos do canal; agregação óptica, para uso mais eficiente dos recursos físicos; e modulação adaptativa para reduzir o uso dos recursos espectrais da rede. O que se pretendeu realizar em unir essas técnicas foi explorar melhor os recursos da rede óptica para reduzir o uso da largura de banda, obtendo maior compactação óptica usando níveis mais altos de modulação através de vários saltos na topologia virtual. O algoritmo proposto (MBM) visa a maior agregação óptica possível através do roteamento multi-salto, utilizando níveis de modulação mais elevados. Para tanto, uma transmissão óptica entre dois nós distantes deve ser composta por vários caminhos mais curtos que satisfaçam o fator QoT requerido, permitindo que recursos espectrais sejam consumidos usando mais conversões O-E-O (Óptico-Elétrico-Óptico), considerando um *trade-off* entre usar menos espectro e usar mais transceptores. Para avaliar o desempenho do algoritmo MBM, foi realizada uma comparação com outros 5 algoritmos bem conhecidos da literatura relacionada: KSP (*K-Shortest Path*), MSP (*Modified Dijkstra Shortest Path*), SPV (*Spectrum-constraint Path Vector Searching*), FPA (*First-Possible Aggregating*) e MPH-SRNP (*Minimal number of Physical Hops – Spectrum Reservation for Each Node-Pair*). As topologias de rede consideradas foram USANET com 24 nós e 43 enlaces bidirecionais, e PanEuro com 27 nós e 81 enlaces bidirecionais. Por fim, os formatos de modulação disponíveis foram BPSK, QPSK, 8-QAM e 16-QAM. Os resultados da simulação mostram bloqueios reduzidos, com ganhos de até 81% em relação ao algoritmo de *benchmark* que teve o pior resultado.

No mesmo contexto, Khan (2019) propõe um esquema adaptativo de RMSA para tráfego dinâmico em EON que aloca recursos com base nas características elásticas. Este esquema seleciona uma rota do conjunto de caminhos disponíveis que utiliza os recursos com mais eficiência em todos os enlaces durante a fase de operação da rede. As rotas são determinadas a partir do conjunto de caminhos disponíveis com base em um esquema de modulação viável, com taxas de dados mais altas exigindo o menor número de *slots* de frequência (FSs) contíguas. Durante o estágio de operação, as rotas entre os pares de nós de origem-destino são determinadas a partir desses caminhos pré-selecionados, com base na maior quantidade de FSs ociosos em um caminho. Isso tem o objetivo de aumentar a utilização de recursos nas rotas subutilizadas, com máxima contiguidade e mínima fragmentação. Em caso de empate entre rotas com mesmo número de FSs ociosos, o algoritmo seleciona um caminho com menor número de saltos. No subproblema de alocação de espectro, os FSs são indexados em todos os enlaces da rede. Os FSs com índices baixos são alocados para conexões que requerem números pares de FSs contíguos com base no esquema de SA *First-Fit*. Da mesma forma, os FSs com índices altos são alocados

para conexões que exigem números ímpares de FSs contíguos com base no esquema de SA *Last-Fit*. O esquema de SA proposto é chamado de *First-Last-Mixed-Fit* e tem como objetivo minimizar a fragmentação, em comparação com os esquemas de alocação *First-Fit* e *Last-Fit* quando usados individualmente. No esquema de SA *First-Last-Mixed-Fit* os FSs no meio do espectro de frequência serão os menos usados na maior parte do tempo e estarão disponíveis para as futuras solicitações de conexão. O desempenho da estratégia RMSA proposta foi investigado em um cenário em que as conexões chegam à rede aleatoriamente, de acordo com um processo de Poisson, e são uniformemente distribuídas entre todos os pares de nós de origem-destino. As durações das conexões seguem uma distribuição exponencial, com o tempo médio de espera igual a 1. O número de FSs necessários para cada conexão depende do esquema de modulação e alcance óptico. Os resultados da simulação mostram a redução da probabilidade de bloqueio e fragmentação do caminho, e o aumento da contiguidade, em comparação com os esquemas de roteamento baseados em mínimo número de saltos e o *k-distance adaptive paths* (KDAP) Agrawal, Bhatia e Prakash (2018) existentes.

Para resolver o mesmo problema em um cenário com características semelhantes às apresentadas anteriormente, uma estratégia que utiliza aprendizado de máquina chamada de DeepRMSA é apresentada por Chen et al. (2019). Esta abordagem consiste em uma estrutura de aprendizado por reforço profundo para o problema de (RMSA) em EONs. O DeepRMSA aprende as políticas RMSA corretas *online* por parametrização utilizando redes neurais profundas (DNNs - *Deep Neural Networks*). As DNNs são treinadas com experiências de provisionamento de caminho de luz dinâmico. Para isso, é apresentado um mecanismo de treinamento baseado em episódios para o DeepRMSA chamado de DeepRMSA-EP. O DeepRMSA-EP divide o processo de provisionamento dinâmico em vários episódios, cada um contendo o atendimento de um número fixo de solicitações de caminho de luz, e realiza o treinamento ao final de cada episódio. O objetivo de otimização do DeepRMSA-EP em cada etapa do atendimento de uma solicitação é maximizar a recompensa cumulativa no restante do episódio. Assim, há uma necessidade de estimar as recompensas relacionadas a estados futuros desconhecidos. Avaliações com duas topologias de amostra mostram que o esquema pode alcançar reduções de probabilidade de bloqueio de mais de 20, 3% quando comparado com outras técnicas baseadas em roteamento por *k*-caminhos mais curtos e alocação de espectro por *First-Fit*.

No mesmo contexto de Sambo et al. (2015) mas levando em consideração a taxa de erro de bit (BER - *Bit Error Rate*) e considerando a relação entre formato de modulação e alcance máximo para cada solicitação de conexão devido ao acúmulo de penalidades da camada física nos enlaces, Calderon et al. (2020) apresentam um esquema de BER adaptável (BER-*adaptive*) para resolver o problema de RMLSA. O esquema tem como objetivo maximizar as solicitações de conexão bem-sucedidas em redes de longa distância, escolhendo formatos de modulação com a maior eficiência possível. Para isso, usa um limiar BER adaptável para alcançar a comunicação com a melhor QoT, utilizando o valor de BER mais estrito e o formato de modulação com a menor largura de banda possível. O algoritmo proposto conta com dispositivos de regeneração

3R para permitir comunicações de longa distância em casos onde a comunicação transparente não pode ser alcançada. Assim, os autores obtiveram, para um cenário sem regeneradores, um resultado semelhante ao limite de BER fixo para PB, porém com uma QoT mais alta para a maioria das solicitações de conexão. Já para o cenário com regeneradores, o esquema apresentou melhor desempenho, possibilitando comunicações de longa distância com alta QoT e baixa PB.

Por fim, com o objetivo de reduzir o bloqueio por falta de recursos espectrais, Ruiz et al. (2021) propuseram um novo algoritmo de RMSA chamado de *Multipath–Best-Fit* (MP-BF), que divide o espectro em vários caminhos juntamente com a técnica de atribuição de espectro *Best-Fit*. Assim, consegue-se alocar uma demanda que já não seria possível encaixar em uma lacuna. Os resultados mostraram que, usando MP-BF, a rede aumenta seu desempenho em termos de PB em relação a esquemas de caminho único.

O conceito de RSA adaptável à distância desempenha um papel central na otimização de recursos em EONs, explorando o equilíbrio entre alcance do sinal e eficiência espectral. Os trabalhos revisados nesta seção demonstram a evolução significativa desse conceito, desde a introdução de técnicas como o RCSA até abordagens mais avançadas, como a utilização de aprendizado por reforço profundo e algoritmos híbridos.

Entre os principais avanços, destacam-se as soluções que combinam a adaptação à distância com estratégias de controle de QoT, agregação de tráfego e espectro, e otimização dinâmica baseada em aprendizado de máquina. Tais abordagens têm demonstrado resultados expressivos na redução da PB, aumento da eficiência espectral e melhoria da QoT, mesmo em cenários de tráfego dinâmico e redes de longa distância.

Apesar dos progressos alcançados, os desafios permanecem, como o impacto das limitações físicas e o custo computacional associado a algumas estratégias. Nesse sentido, a integração de técnicas como regeneração 3R, modulação adaptativa e algoritmos de aprendizado profundo evidencia o potencial de soluções futuras para enfrentar os crescentes desafios das EONs.

Esses avanços não apenas consolidam o RSA adaptável à distância como uma estratégia essencial, mas também apontam caminhos promissores para o desenvolvimento de redes ópticas mais eficientes e resilientes. A análise apresentada nesta seção serve como base para aprofundar o entendimento das técnicas e explorar novas abordagens nos capítulos seguintes.

3.2.4 Fragmentação

A fragmentação do espectro é um problema que inevitavelmente ocorre em EONs, e que necessita ser gerenciado de forma eficiente. Esta seção se destina a fazer uma breve revisão de trabalhos sobre este tema. É considerado aqui o trabalho feito por Talebi et al. (2014), que revisa a literatura até 2014. Assim, nesta seção, acrescenta-se apenas alguns trabalhos mais recentes.

Sabe-se que a fragmentação de espectro ocorre à medida que os caminhos de luz são configurados. Para diminuir este problema e também a escassez de recursos, Zhu et al. (2016) propõem um algoritmo de RMSA de múltiplos caminhos com reconhecimento de fragmentação para solicitações de reserva antecipada (AR - *Advance Reserve*) e reserva imediata (IR - *Immedi-*

ate Reserve) que divide as conexões em diferentes partes e transfere essas partes ao longo de um ou mais caminhos utilizando S-BVTs. Também desenvolveram um método de medição de ocorrência de fragmentação para avaliar com precisão se esta ocorrerá quando forem atribuídas solicitações aos recursos disponíveis. Dessa forma, a fragmentação do espectro pode ser reduzida e a disponibilidade de recursos aumentará. O algoritmo RMSA projetado, chamado de algoritmo *Multi-Path Fragmentation-Aware* (MPFA), é baseado na medição de ocorrência de fragmentação e possui três estágios: estágio com reconhecimento de fragmentação, estágio de fragmentação paralela e estágio com reconhecimento de fragmentação de vários caminhos. Para diferentes cargas de tráfego e diferentes tempos médios de espera, os autores avaliaram o desempenho do MPFA. Os resultados da simulação mostram que o MPFA pode diminuir a PB e aumentar a utilização de recursos. Por fim, apontaram como trabalho futuro a definição de recursos de transceptores limitados para avaliar como o desempenho do algoritmo é afetado nessa situação.

Uma outra abordagem interessante é feita por Yuan et al. (2018), o qual investiga o problema de RMLSA dinâmico, onde as conexões são configuradas e desativadas em tempo real, causando fragmentação do espectro. Com o objetivo de mitigar esse problema, os autores propuseram uma técnica para tornar as fatias de frequência ocupadas mais concentradas, o que leva à redução da fragmentação. Para isto, as fatias do espectro são divididas em várias partições e tomam-se os limites das partições como *benchmarks*; quando uma solicitação de conexão chega, primeiro se calcula a distância até o *benchmark* mais próximo para cada bloco de espectro disponível e, em seguida, é selecionado aquele com o menor valor de distância. Porém, selecionar um caminho de acordo com esse critério pode ser conflitante em termos de utilização de recursos, pois reduz a fragmentação do espectro, mas pode ser que esse caminho seja o que consome mais recursos da rede. Para otimizar esses dois fatores simultaneamente, esse problema poderia ser formulado como um modelo de otimização multiobjetivo. No entanto, o resultado seria um conjunto de soluções ótimas de Pareto. Como nenhuma das soluções ótimas de Pareto é estritamente melhor que as outras, os autores propuseram um *trade-off* entre esses dois objetivos. Assim, considerando os dois índices anteriores (número de recursos consumidos R e distância até o limite I) durante o processo de atribuição de espectro, onde minimizar R significa usar o mínimo de recursos, enquanto minimizar I implica que os recursos ociosos restantes são mais concentrados ao estabelecer uma conexão, foram propostas três políticas para fazer o *trade-off* entre elas, que são: $R : I$, $I : R$ e $R + I$. A política de $R : I$ considera R como objetivo principal, enquanto a política de $I : R$ define I como principal; já a política $R + I$ toma uma combinação linear $\alpha R + (1 - \alpha)I$ como objetivo de otimização. As simulações são feitas nas topologias NSFNET e UBN, que mostram que a política $R + I$ pode obter o melhor desempenho na maioria dos casos. Os autores compararam a política $R + I$ com dois algoritmos bem conhecidos, o algoritmo *First-Last-Fit* e o algoritmo *Block-Assignment*. Os resultados revelaram que a PB da política $R + I$ é muito menor do que a dos objetos comparativos.

Por fim, Yousefi, Rahbar e Yaghubi-Namaad (2019) apresentam seis novos algoritmos para resolver o problema de fragmentação e reduzir a PB, chamados: *Pure Multipath Spectrum*

Allocation in Two Stages (PM2S), *Multipath with considering PRE-assignment External Fragmentation Metric in Two Stages (PRE-EFM)*, *Multipath with considering POST Assignment (POST-EFM)*, *Fragmentation Measure Metric Aware with Routing and Spectrum Assignment (FMMA-RSA)*, *Fragmentation Measure Metric Aware with Pre-Assignment (FMMA-PRE)* e *Fragmentation Measure Metric Aware with POST-assignment (FMMA-POST)*. O principal objetivo desses algoritmos é reduzir a PB controlando a fragmentação em cada caminho, pois eles tentam diferentes maneiras de atribuir espectro para uma determinada solicitação de conexão dividindo uma demanda de conexão em vários tamanhos para ser configurada em várias rotas. No algoritmo PM2S, a alocação de espectro para uma nova conexão é realizada em duas etapas. A primeira tenta alocar espectro para a conexão. Se não conseguir, ele dividirá a conexão em duas sub-conexões. O PRE-EFM é proposto com base no conceito de multi-caminho e no método de repetição. No entanto, a seleção da rota é realizada com base no cálculo da fragmentação externa (definida como $1 - \frac{\text{número de slots de frequência no maior bloco}}{\text{número total de slots de frequência livres}}$). Da mesma forma, o PRE-EFM é executado em duas etapas de repetição. Assim, o aumento da repetição de atribuição de espectro leva a uma redução da PB em relação ao PM2S, por considerar o problema de fragmentação nos enlaces. O POST-EFM também funciona baseado no conceito de multi-caminho e método de repetição, mas neste algoritmo a métrica de fragmentação externa é calculada e comparada em relação à situação de pós-atribuição dos enlaces. Assim, assumindo que cada caminho poderia alocar os slots de frequência necessários, o valor da fragmentação externa é calculado e o caminho com menor valor desta será escolhido, diferentemente do algoritmo PRE-EFM, que calcula o valor de fragmentação externa com base na situação dos enlaces antes de alocar os slots de frequência para a nova conexão recebida. A definição de fragmentação externa apresenta alguns problemas, pois foca apenas na maior lacuna e no total de slots de frequência disponíveis, pois o mesmo grau de fragmentação aparece para diferentes situações nos caminhos. Assim os autores apresentam uma nova métrica para resolver esses problemas considerando mais condições (lacunas, tamanho das lacunas e número de lacunas) no cálculo da fragmentação chamada de *Fragmentation Measure Metric (FMM)*. Assim, os algoritmos POST-EFM e PRE-EFM são atualizados para funcionar com base no FMM como sua métrica de ordenação de rotas, originando dois novos algoritmos, chamados *Multipath with Pre-assignment Fragmentation Measure Metric (PRE-FMM)* e *Multipath with Post-assignment Fragmentation Measure Metric (POST-FMM)*. Para a simulação, foi usado como *benchmark* os algoritmos RSA-MFPF e FA-RSA proposto por Yu et al. (2012) e Shen, Chen e Sun (2015), respectivamente. Estes algoritmos fornecem a menor PB em comparação com PM2S e *First-Fit*. Já PB do POST-EFM, PRE-EFM, FMMA-RSA, FMMA-PRE e FMMA-POST é reduzida em 50%, 46%, 53%, 62% e 65% em relação ao *First-Fit*, respectivamente. A PB do POST EFM é reduzida em 24% e 43% em relação RSA-MFPF e FA-RSA, respectivamente. Assim, através desses e de outros resultados os autores demonstram que a abordagem proposta é capaz de reduzir significativamente a PB através da redução da fragmentação.

A fragmentação do espectro continua sendo um desafio crítico nas EONs, impactando

diretamente a eficiência espectral e a PB. Os trabalhos revisados nesta seção apresentam avanços significativos no desenvolvimento de algoritmos e métricas para mitigar os efeitos da fragmentação, evidenciando estratégias inovadoras e bem-sucedidas.

Os algoritmos como o MPFA, que incorporam medições de fragmentação e abordagens multi-caminho, demonstram como a integração de técnicas específicas pode aumentar a utilização de recursos e reduzir a PB. Da mesma forma, a introdução de políticas multiobjetivo para balancear o consumo de recursos e a concentração espectral, como na abordagem proposta por Yuan et al. (2018), traz uma nova perspectiva sobre o gerenciamento eficiente do espectro.

Além disso, os algoritmos propostos por Yousefi, Rahbar e Yaghubi-Namaad (2019) evidenciam a importância de métricas mais completas, como o FMM, que consideram múltiplos aspectos da fragmentação e oferecem melhorias substanciais em relação aos métodos tradicionais. A redução da PB em até 65% em relação ao algoritmo *First-Fit* demonstra o impacto positivo dessas abordagens no desempenho das EONs.

Esses avanços reforçam a importância de estratégias adaptativas e métricas refinadas para o gerenciamento de fragmentação em EONs. No entanto, ainda há espaço para pesquisas futuras, como a integração e o aprimoramento de métodos baseados em otimização multi-objetivo. Dessa forma, os trabalhos apresentados nesta seção contribuem significativamente para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e robustas para redes ópticas modernas.

3.2.5 Agregação de tráfego

No contexto da demanda cada vez maior por tráfego de dados e da busca por soluções que melhorem o desempenho das EONs, a técnica de agregação permite o estabelecimento de túneis ópticos transportando várias conexões em um bloco contíguo de espectro sem inserir bandas de guarda entre eles, minimizando assim o uso do espectro e o número de transmissores. Vários algoritmos vêm sendo propostos com essa finalidade, tanto em cenário estático como dinâmico. Neste sentido, Talebi et al. (2014), Miladić-Tešić, Marković e Radojčić (2019) fornece uma revisão da literatura sobre agregação de tráfego e suas aplicações na alocação de recursos de forma eficiente na rede, classificando e discutindo uma série de algoritmos, além de apresentar um resumo comparando e destacando suas principais características e objetivos.

A fim de realizar um pequeno registro aqui, foram selecionados dois trabalhos recentes que envolvem a agregação de tráfego na busca por melhorar o desempenho da rede.

A começar por Assis et al. (2020) que apresenta uma formulação de MILP, bem como abordagens heurísticas e meta-heurísticas para o projeto de múltiplas redes ópticas virtuais (VONs) em uma EON com restrições de formato de modulação, posicionamento do regenerador virtual elástico, continuidade e contiguidade de espectro no RSA. Neste estudo, transceptores ópticos multi-fluxo e regeneradores elásticos são usados para suportar a virtualização de redes ópticas e melhorar a eficiência energética e espectral através do emprego de diferentes taxas de bits em caminhos de luz elásticos. O diferencial da pesquisa é que propõe um mapeamento de VONs sobre um substrato físico considerando a agregação de tráfego para cada topologia

virtual. Assim, busca, através de uma formulação de MILP, caminhos de luz mais adequados (enlaces virtuais) com base na matriz de tráfego da topologia virtual. A agregação de canais elimina a necessidade de muitas bandas de guarda entre caminhos de luz e também economiza transceptores; no entanto, muitas vezes leva à necessidade de realizar conversões O-E-O em nós intermediários. A técnica de formato de modulação adaptativa à distância é empregada para garantir eficiência em termos de espectro para um substrato físico sujeito a diversas topologias virtuais. Como resultado, esse tipo de planejamento, combinando agregação e roteamento, obteve um desempenho melhor do que o problema tradicional de virtualização em EON, apresentando uma economia de 20% a 50% em relação a casos estudados sem agregação de tráfego em grandes redes.

O desenvolvimento de métodos de computação natural trouxe um novo paradigma na resolução de problemas de otimização do mundo real, chamado de meta-heurísticas. Meta-heurísticas estão sendo amplamente consideradas pela comunidade científica na solução de problemas intratáveis, principalmente devido ao tempo computacional, relacionados ao planejamento de redes. Assim, Miladić-Tešić et al. (2021) utiliza a meta-heurística de otimização por colônia de abelhas (BCO - *Bee Colony Optimization*), que é uma técnica de busca aleatória estocástica baseada em população inspirada no comportamento das abelhas na natureza em busca de fontes de néctar, na resolução de problemas de planejamento e dimensionamento de redes ópticas, chamado de planejamento estático. Para tal cenário, é fornecida uma matriz de tráfego que inclui as taxas das conexões solicitadas e os recursos de espectro e energia devem ser planejados para um arranjo ideal. Dessa forma, com base na previsão de demandas de tráfego, transmissores ópticos devem ser dimensionados, implicando isto nos custos da rede, pois este, dentre outros fatores, depende do número de transmissores utilizados. Assim, os autores focam na técnica de agregação de tráfego aplicada na camada óptica, incorporando esta técnica na lógica de otimização do BCO, propondo um modelo para minimizar o número de transmissores, maximizando sua utilização. Os resultados indicam que, aplicando a técnica de agregação juntamente com a BCO, um número significativo de transmissores pode ser economizado e, conseqüentemente, a eficiência energética é melhorada.

A técnica de agregação de tráfego apresenta-se como uma solução eficiente para otimizar o uso de recursos espectrais e minimizar custos em EONs, atendendo à crescente demanda por tráfego de dados. A revisão de trabalhos recentes demonstra como a combinação de agregação com abordagens avançadas, como formulações de MILP e meta-heurísticas, pode proporcionar ganhos significativos tanto em cenários estáticos quanto dinâmicos.

Os estudos de Assis et al. (2020) e Miladić-Tešić et al. (2021) destacam os benefícios dessa técnica em diferentes contextos. Enquanto o primeiro trabalho demonstra que a agregação integrada a uma formulação de MILP pode economizar até 50% dos recursos em redes com virtualização, o segundo utiliza a meta-heurística BCO para reduzir o número de transmissores necessários, aumentando a eficiência energética e espectral. Ambos os trabalhos evidenciam o papel crucial da agregação na redução de bandas de guarda, eliminação de redundâncias e

planejamento mais eficiente da rede.

Esses avanços reforçam o potencial da agregação de tráfego como uma estratégia indispensável para o planejamento e a operação de EONs de alto desempenho. No entanto, desafios permanecem, como a complexidade computacional de algumas abordagens e a necessidade de equilibrar custos de rede com eficiência operacional. A exploração contínua de métodos híbridos e a aplicação em cenários dinâmicos e de larga escala oferecem caminhos promissores para pesquisas futuras.

3.2.6 Alocação e atribuição de regeneradores

Em redes ópticas transparentes ou totalmente ópticas, as rotas são determinadas de forma a cumprir requisitos de QoT. Por outro lado, podem existir rotas que não cumprem tais requisitos, logo não poderão ser acessadas. Para isso, é necessária a inserção de dispositivos regeneradores em algum nó intermediário da rota para realizar a regeneração 3R (re-amplificação, re-formatação e re-sincronização de tempo). Neste sentido, duas técnicas pioneiras para realizar a atribuição de regeneradores em EONs translúcidas foram propostas por Chaves et al. (2015) chamadas de *First Longest Reach Regenerator Assignment* (FLR-RA) e *First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment* (FNS-RA). A primeira tenta utilizar o formato de modulação com a maior eficiência espectral, enquanto a outra visa transmitir o sinal óptico o mais longe possível antes de passar por um processo de regeneração. Como consequência, a FLR-RA implanta vários regeneradores, porém economiza espectro; já a FNS-RA utiliza um número menor de regeneradores, mas consome mais largura de banda. Na configuração da rede, foi considerado que os regeneradores 3R são capazes de realizar conversão de espectro e conversão de formato de modulação, e que cada nó é equipado com um conjunto de regeneradores virtualizados compartilhados. Cada regenerador tem a capacidade de regenerar fluxos à taxa de bits de 100 Gb/s, podendo combinar regeneradores para regenerar fluxos de taxa de bits maiores. O ruído do transmissor e dos amplificadores ópticos é considerado na avaliação das penalidades físicas. Para a simulação, foi gerado um conjunto de solicitações de chamadas que chegam seguindo um processo de Poisson, e o tempo de espera segue uma distribuição exponencial. A carga de rede utilizada foi de 100 Erlangs. Cada par de nós origem-destino para cada chamada é escolhido aleatoriamente usando uma distribuição uniforme. Cada solicitação de chamada é estabelecida através de um caminho de luz comutado por circuito unidirecional. O algoritmo de roteamento e atribuição de espectro procura um caminho de luz candidato para a solicitação de chamada recebida. Foi usado o *k-shortest path* como algoritmo de roteamento e a heurística *First-Fit* para atribuição de espectro. A taxa de bits de transmissão de cada chamada foi escolhida aleatoriamente entre 100, 200 ou 400 Gb/s. Todos os nós possuem a mesma quantidade de regeneradores. Através dos resultados, os autores concluíram que o uso de regeneradores para reduzir a largura de banda média utilizada pelos caminhos de luz nem sempre é a estratégia mais eficiente. Sua eficiência depende do número de regeneradores, *slots* de frequência disponíveis e da carga da rede.

Uma outra abordagem interessante é apresentada por Madani (2016), um esquema

escalonável para (RP - *Regenerator Placement*) e RMSA em conjunto em EONs translúcidas. Para isto, em uma primeira fase de RP, introduz um modelo MILP que é invocado repetidamente para encontrar a sequência ótima de locais para alocação dos regeneradores. Em uma segunda fase, introduz uma formulação matemática baseada em caminhos para resolver o problema de RMSA, dado um conjunto de localizações de regeneradores. Os locais para a regeneração são escolhidos no modo *offline*, em que um determinado conjunto de solicitações de demanda deve ser atendido com uso espectral mínimo. Sempre que o volume de tráfego oferecido é muito alto para ser acomodado pelo *pool* de *slots* de frequência e locais de regeneração disponíveis, um novo regenerador é colocado em um nó estratégico e o problema é tentado novamente até que uma solução seja encontrada. Os regeneradores são alocados em uma arquitetura de regeneração 3R O-E-O realizada pela interconexão de um par de transceptores em *back-to-back*. O emprego desta arquitetura com adaptabilidade de nível de modulação foi introduzido para melhorar o rendimento da rede. Para a simulação estática, foi preparada uma matriz de demanda de tráfego completa que especifica a largura de banda solicitada entre todos os pares de nós. A matriz de tráfego foi gerada assumindo que as solicitações de largura de banda são distribuídas uniformemente em um intervalo predefinido. Todos os enlaces de fibra são bidirecionais e têm capacidades de banda de passagem iguais que são divididas em um número fixo de *slots* de frequência. A topologia de rede escolhida foi Deutsche Telecom (DT) de 14 nós. Para cada par de nós, até três caminhos alternativos de salto mais curtos, juntamente com seus atributos, como contagem de saltos, distância física e a maior modulação aplicável, foram computados *offline*. Na simulação foi verificado que o MILP não conseguiu resolver o problema de provisionamento de serviços *offline* em grandes redes de *backbone* sob condições operacionais realistas. Assim, os autores introduziram algoritmos heurísticos inspirados na noção de rota baseada em impacto e verificaram a otimalidade das soluções e aplicabilidade da heurística proposta para analisar grandes redes, por reduzir o uso de espectro, aumentando o *throughput* da rede com bom *trade-off* em relação ao custo.

Como já visto, na transmissão de supercanais em redes de longa distância pode ser preciso regenerar o sinal, o que resulta em conexões de caminho de luz translúcidas, cada uma consistindo de vários segmentos de caminho transparentes. Também já mencionado, a regeneração de portadoras ópticas pode ser realizada por meio de transceptores em configurações *back-to-back*. O uso deste equipamento envolve alguns custos, assim o número de nós de regeneração está sujeito a minimização em uma abordagem típica de planejamento de rede. Outra consideração é que sempre que a regeneração do sinal é aplicada, frequentemente assume-se que o mesmo formato de modulação é mantido em cada segmento do caminho de luz, levando ao uso de formatos de modulação menos eficientes e, conseqüentemente, ao desperdício de recursos de transmissão em segmentos de caminho curto. Por este motivo, permitir a conversão da modulação pode ser benéfico em termos de utilização do espectro. Neste contexto, Klinowski e Walkowiak (2016) estudaram os potenciais ganhos de desempenho resultantes do uso de regeneração de sinal juntamente com a conversão do formato de modulação em EONs translú-

cidas, realizando a transmissão em supercanal. Para isto, os autores formularam um esquema de roteamento, atribuição de espectro e alocação de transceptor e regenerador (RSTRA - *Roating, Spectrum, Transponder and Regenerator Assignment*), possibilitando a otimização conjunta da rota, alocação de espectro e seleção de formato de modulação. Para as simulações foram usadas três cenários de EONs translúcidas diferentes: rede genérica alemã DT12, europeia EURO28 e americana US26 com 12 e 40, 28 e 82, 26 e 84 nós e enlaces, respectivamente. Os autores consideraram três situações: (i) o número de locais de regeneração de cada caminho de luz é minimizado, (ii) qualquer configuração de locais de regeneração é permitida para cada caminho de luz e (iii) regeneração e formatos de modulação flexíveis em segmentos de caminho de luz são permitidos. Para comparar esses cenários, desenvolveram um algoritmo heurístico eficiente implementado dentro da abordagem de recozimento simulado. Os resultados das simulações indicaram que a regeneração flexível, bem como a conversão da modulação, podem ser benéficas em termos de utilização de espectro e transceptores em redes de longa distância; no entanto, a economia é insignificante em uma rede de pequena distância.

Neste mesmo contexto, Brasileiro, Valdemir e Soares (2019) propuseram um novo algoritmo para definir a modulação do sinal e alocar regeneradores chamado (CIRA - *Circuit Invigorating Regenerator Assignment*). O algoritmo CIRA visa alocar o menor número de *slots* de frequência e aumentar a QoT do circuito estabelecido. Para isto, o estabelecimento de um novo caminho de luz é condicionado a: (i) a rota escolhida possuir recursos espectrais disponíveis; (ii) a QoT for aceitável; e (iii) QoT for aceitável para todos os outros circuitos já ativos na rede. O algoritmo CIRA deve resolver o problema de RA ao configurar o circuito óptico. Após a escolha da rota, o algoritmo CIRA (i) seleciona os nós regeneradores e (ii) escolhe o formato de modulação para cada segmento transparente. Ele busca um formato de modulação visando alcançar um nó regenerador mais próximo do nó de destino. Essa proposta foi comparada às técnicas FLR e FNS de Chaves et al. (2015) em diferentes cenários considerando os algoritmos MSU-RP (*Maximum Simultaneously Used - Regenerator Placement*), MU-RP (*Most Used - Regenerator Placement*), NDF (*Node Degree First*) e DA (*Distance Adaptive Regenerator Localization Algorithm*) de Chaves et al. (2012) e obteve melhores resultados. Para a simulação, foi utilizada a seguinte configuração: topologias NSFNET e EON com todos os enlaces bidirecionais com 400 *slots* cada e 200 regeneradores distribuídos em cada topologia. A largura de banda de cada *slot* foi de 12,5 GHz. O algoritmo Dijkstra foi usado para o roteamento e a estratégia *First-Fit* foi usada para a alocação de espectro. Para a topologia NSFNET, o algoritmo CIRA apresentou redução média na PB de 45, 15% quando comparado ao FLR e 66, 49% em comparação ao FNS. Na topologia EON, a redução da PB do CIRA é de 37, 37% quando comparado ao FLR e 57, 39% em relação ao FNS. O fortalecimento do circuito está associado à escolha do formato de modulação mais adequado aos efeitos da camada física, que não é necessariamente o formato mais complexo possível. A definição do formato de modulação realizada pelo CIRA permite a criação de circuitos mais resistentes, tanto aos efeitos da camada física no próprio circuito quanto pelo acúmulo de interferências causadas por possíveis outros

novos circuitos.

Com o mesmo objetivo da proposta supracitada, Cavalcante et al. (2019) propuseram uma metodologia baseada em grafos auxiliares para melhor avaliar as escolhas de atribuição de regeneradores em EONs translúcidas em cenário de tráfego dinâmico. A proposta utiliza um grafo auxiliar para identificar rapidamente a solução de menor custo dentre todas as possibilidades existentes de conectar o nó de origem ao nó de destino de uma requisição de conexão. Para isto, considera nós translúcidos intermediários ao longo da rota, suas respectivas quantidades de regeneradores disponíveis, formatos de modulação, taxa de bits de transmissão solicitada e restrições impostas pelas penalidades da camada física. A metodologia proposta considera que cada possível segmento transparente em uma rota é representado por uma aresta em um grafo auxiliar. As funções de custo de aresta apropriadas são projetadas e a decisão sobre onde usar os recursos de regeneração é realizada por um algoritmo de roteamento usando o grafo auxiliar construído. As funções de custo são comparadas em termos de PB de requisições de conexão em algumas redes usando a metodologia proposta e outras heurísticas disponíveis na literatura que tratam do problema de atribuição de regeneradores em EONs translúcidas. Os cenários de simulação envolveram três diferentes topologias físicas de rede (NSFNET, US Backbone e European), ruído ASE, amplificadores em linha e pré-amplificadores, além de perdas e ganhos nos sinais ópticos ao longo dos caminhos de luz. As solicitações de conexão seguem um processo de Poisson e os tempos de espera dos caminhos de luz seguem uma distribuição exponencial. Os pares de nós de origem-destino e a taxa de bits de transmissão de cada solicitação de conexão (entre 100 e 500 Gbps) são escolhidos uniformemente. Assim, ao definir adequadamente a respectiva função de custo de aresta, a metodologia proposta pôde não apenas replicar algumas heurísticas previamente propostas na literatura, mas também criar estratégias que apresentem desempenho superior em todos os cenários e condições analisados.

Em EONs existe um *trade-off* entre regeneração e uso de espectro. Dessa forma, a PB pode ser reduzida pela utilização de regeneradores. Os algoritmos de provisionamento que levam em conta essa compensação consideram a regeneração como um custo a ser minimizado ou como um recurso a ser usado de forma inteligente, pois é limitado. Neste sentido Gonzalez-Montoro, Finochietto e Bianco (2021) avaliam diferentes estratégias de provisionamento que abordam cenários de regeneração limitada e ilimitada em EONs chamadas de estratégias conscientes de recursos, as quais visam selecionar a melhor combinação de espectro disponível e recursos de transceptores para estabelecer um caminho de luz translúcido. Então propuseram uma estratégia adequada a ambos os cenários que difere de outras propostas da literatura que são agnósticas aos recursos disponíveis da seguinte forma: dado um conjunto ótimo $P(p)$ de soluções candidatas para provisionar uma demanda de tráfego no caminho p , uma delas precisa ser selecionada, e essa decisão necessita estar ciente dos recursos disponíveis ao longo do caminho. Duas estratégias podem ser usadas para esse fim. A primeira, seleciona a melhor solução dado um orçamento de espectro chamado de ciente de limite (TA - *Threshold Aware*), pois um limite dos *slots* de frequência é usado para determinar o melhor candidato, representando uma eficiência de espectro

alvo para atendimento das demandas. A ideia é que a regeneração é um custo que precisa ser minimizado, mas dentro de um orçamento de espectro. Essa abordagem é adequada para cenários com capacidade total de regeneração, sendo esses recursos suficientes para atender a uma meta de eficiência. No entanto, se a regeneração for limitada, é necessária uma abordagem diferente. Para tal, em uma segunda estratégia, o algoritmo de utilização consciente (UA - *Utilization Aware*), seleciona a solução que melhor atribui os recursos disponíveis para evitar o esgotamento do espectro ou dos transceptores. O objetivo da UA é alocar recursos para minimizar a probabilidade geral de bloqueio e, portanto, maximizar o tráfego da rede. Para isto, a utilização do espectro $U_s(p)$ e dos transceptores $U_t(p)$ ao longo do caminho p é primeiro computada para determinar qual recurso é mais crítico. Em ambos os casos, a utilização é definida como a quantidade de recursos utilizados em relação aos existentes ao longo do caminho. A quantidade de transceptores disponíveis em cada nó é proporcional ao grau do nó. Assim, $U_t(p)$ é calculado como a razão da soma de transceptores em serviço ao longo do caminho sobre a soma de todos os transceptores disponíveis em cada nó. Com essa abordagem, a seleção de candidatos é sempre feita de forma que o provisionamento tenha o mínimo impacto no recurso mais utilizado. Se $U_s(p)$ for maior que $U_t(p)$, então o espectro é considerado o recurso crítico que precisa ser salvo. Assim, a solução candidata r que minimiza o custo do espectro $S(r)$ é selecionada. No entanto, se $U_t(p)$ for maior que $U_s(p)$, então a solução candidata r que minimiza o custo de regeneração $T(r)$ é escolhida. Os resultados da simulação mostraram quando a capacidade total de regeneração é assumida, o custo de regeneração pode ser reduzido em mais de 30% em comparação com a solução opaca e em 10% em comparação com os algoritmos mais conhecidos (FLR e FNS propostos por Chaves et al. (2015)); e para o caso limitado, pode reduzir a PB em milhares de vezes em comparação com a solução transparente e em centenas de vezes em comparação com os algoritmos FLR e FNS. Assim, conscientização de recursos ajuda a diminuir a PB enquanto aumenta a capacidade real da rede, devido a uma atribuição mais eficiente de recursos de espectro.

Por fim, Lozada et al. (2021) faz um estudo do impacto do uso de diferentes esquemas de amplificação e regeneração 3R na PB, consumo de energia, eficiência espectral e energética em EONs com cenário de tráfego dinâmico em duas configurações de rede: transparente e translúcida. Para fins de comparação, os autores consideram cinco configurações de rede enumeradas de 1 a 5, para as quais o problema de RMLSA é resolvido. Em todas as configurações, os amplificadores compensam as perdas. As configurações de 1 a 4 são transparentes. A configuração 1 possui *spans* com amplificadores de fibra dopada com Érbio (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*). A configuração 2 possui *spans* com amplificadores de fibra híbrido Raman/EDFA (HFA - *Híbrid Fiber Amplifier*). Os *spans* da configuração 3 são compostos por amplificadores Raman de fibra distribuída (DFRA - *Distributed Fiber Raman Amplifier*) e na 4 são compostos por amplificadores EDFA e DFRA alternados. A configuração 5 é translúcida baseada em amplificadores EDFA e regeneradores 3R. Foi feito um modelo da camada física para cada configuração de rede para determinar o alcance máximo dos sinais ópticos. Através da simulação, foi calculada a PB e o consumo de energia das diferentes configurações de rede. Em termos de bloqueio, os

resultados mostram que a configuração 2 e 3 oferecem a menor PB, com pelo menos 1 e 3 ordens de magnitude de diferença em relação à configuração 1 e 5 em altas e baixas cargas de tráfego, respectivamente. Em termos de consumo de energia, as alternativas de melhor desempenho são aquelas com o pior bloqueio, a configuração 1, enquanto a 3 exibe o maior consumo de energia com a 2 seguindo de perto. Esta situação demonstra um claro *trade-off* entre desempenho de bloqueio e custo de energia que deve ser considerado ao projetar uma EON dinâmica. Assim, os autores identificam que a configuração 2 é uma alternativa promissora para reduzir significativamente a PB em EONs dinâmicas de área ampla sem um aumento considerável no consumo de energia.

Nesta seção, foi abordada a importância dos dispositivos regeneradores em EONs translúcidas para atender aos requisitos de QoT em cenários de longa distância. Os trabalhos revisados demonstraram que o uso de regeneradores 3R é uma solução eficaz para mitigar a PB, melhorar a eficiência espectral e garantir a QoT, especialmente em condições de alta carga de tráfego.

Entre as abordagens analisadas, destacaram-se estratégias pioneiras como FLR-RA e FNS-RA, que equilibram a eficiência espectral e o uso de regeneradores. Além disso, técnicas mais avançadas, como CIRA e métodos baseados em grafos auxiliares, mostraram resultados superiores na redução da PB, ao combinar a alocação eficiente de regeneradores com a seleção dinâmica do formato de modulação. Estratégias conscientes de recursos, como TA e UA, também foram cruciais para otimizar o uso de espectro e transceptores, ampliando a capacidade real das redes.

A análise revelou ainda o impacto significativo de diferentes configurações de amplificação e regeneração em termos de PB, consumo de energia e eficiência espectral. Essas descobertas destacam um claro *trade-off* entre desempenho de bloqueio e custo energético, reforçando a necessidade de soluções balanceadas para redes de área ampla e tráfego dinâmico.

Por fim, os resultados apresentados indicam que o avanço em técnicas de regeneração e amplificação, aliado a algoritmos heurísticos e modelos de otimização, oferece uma base sólida para o desenvolvimento de EONs mais resilientes, eficientes e preparadas para atender às crescentes demandas de tráfego de dados.

3.2.7 Eficiência energética

Com o desenvolvimento contínuo das tecnologias da Internet, as demandas de tráfego de dados são cada vez maiores e estão crescendo rapidamente, o que leva ao aumento do consumo de energia, tornando isto uma questão crítica em redes ópticas nos últimos anos. As redes ópticas de grade fixa tradicionais não são adaptáveis, portanto, não podem usar os recursos de forma eficiente para minimizar o consumo de energia. Por outro lado, as EONs podem ser configuradas de forma eficiente energeticamente, adaptando os recursos alocados às demandas de conexões e às condições físicas da rede. O problema de roteamento, modulação e alocação de espectro com eficiência energética (EE-RMSA - Energy Efficiency - RMSA) em EON pode ser considerado como o problema que encontra um caminho óptico com eficiência energética que atenda à

demanda de tráfego de cada solicitação de conexão, considerando o consumo dos dispositivos de rede durante o cálculo da rota. Neste contexto, no trabalho realizado por Fallahpour et al. (2014) é proposto um algoritmo de RSA que busca eficiência energética (EE-RSA) com capacidade de RP. Assim, o caminho de luz mais eficiente em termos de consumo de energia é encontrado tendo como métricas de otimização, além do consumo de energia, a eficiência espectral e a PB. Os autores mostraram que existe um formato de modulação ótimo que minimiza a PB e o consumo de energia, tendo em vista a compensação entre eficiência espectral, formato de modulação, BER, e OSNR, pois a eficiência espectral aumenta para formatos de modulação altos, enquanto a BER diminui, e a BER pode ser melhorada com o aumento da OSNR, por aumentar a potência de transmissão ou mais reconstrução do sinal por mais regeneração 3R.

Neste mesmo sentido Tan, Gu e Ji (2017) propõem um modelo MILP e um correspondente algoritmo heurístico que consideram conjuntamente o formato de modulação adaptativa e a agregação óptica possibilitada pelos transceptores de largura de banda variável segmentável (S-BVTs) no processo de RSA para satisfazer os requisitos de solicitações de caminho de luz. Foram considerados três equipamentos para o consumo de energia: S-BVT, cruzador de conexão óptica de banda variável (BV-OXC - *Bandwidth Variable - Optical Cross-Connect*) e amplificador óptico EDFA. Como o modelo MILP é computacionalmente intratável para um grande número de solicitações de caminho de luz em uma topologia de rede grande, o problema foi resolvido por meio de algoritmos iterativos baseados em janela de espectro (SW - *Spectrum Window*) e operadores genéticos os quais geram iterativamente as soluções viáveis de alocação de recursos que atendem as solicitações de caminho de luz, os requisitos de QoS e minimizam o consumo de energia. Juntamente com o processo de busca iterativa, prefere-se agregar solicitações de caminho de luz de baixa capacidade em transceptores ativos que possuem recursos extras, explorando todo o espaço de busca com o objetivo de minimizar o consumo de energia. No processo de busca iterativa, todas as soluções possíveis de alocação de rotas e formatos de modulação são consideradas, então escolhe-se uma solução ótima que considera tanto o consumo de energia quanto a PB. Os resultados foram validados simulando um grande número de solicitações de conexão em uma topologia de rede de 8 nós e uma topologia de 14 nós. Os resultados da simulação mostram que o método iterativo proposto supera os algoritmos de comparação em PB e consumo de energia em topologias de rede pequena e grande. Também demonstram que o algoritmo EE-RMSA proposto alcança quase o mesmo desempenho que o MILP em uma rede de 8 nós com menor tempo computacional e rendimento melhor do que os algoritmos existentes sob diferentes taxas médias de tráfego.

Um outra proposta apresentada em Hadi e Pakravan (2018) que investiga o problema de alocação de recursos com eficiência energética restrita a requisitos de QoT em EONs baseadas em OFDM, e propõe um algoritmo rápido de dois estágios para resolvê-lo. A primeira etapa do algoritmo trata do roteamento, agregação e ordenação de tráfego e visa principalmente a minimização do número de amplificadores ópticos e transceptores implantados. Os autores desenvolvem uma ILP para roteamento e agregação do tráfego e um procedimento heurístico

que produz sua solução quase ótima em um tempo de execução menor. Na segunda etapa, são otimizados os parâmetros do transceptor para minimizar o consumo total de energia. Os autores mostram como a OSNR e o consumo de energia do transceptor são representados por expressões convexas e usam os resultados para fornecer uma formulação convexa para otimizar seus parâmetros. Ao contrário das formulações convencionais, consideram a potência óptica transmitida como uma variável de otimização ajustada para cada caminho de luz, e mostram como isso melhora o consumo de energia dos diferentes elementos da rede. Os resultados da simulação demonstram que o algoritmo proposto para roteamento e agregação de tráfego é cerca de duas ordens de magnitude mais rápido do que sua ILP equivalente, reduzindo o consumo de energia da rede em mais de 9% em comparação com o cenário em que nenhuma agregação de tráfego é realizada. Também é demonstrado que a formulação convexa para atribuição de parâmetros dos transceptores é uma ordem de magnitude mais rápida do que sua contraparte não-linear inteira mista, e reduz seu consumo de energia em mais de 13% em comparação com um esquema de configuração fixo. Além disso, no trabalho é investigado o efeito da atribuição de modulação adaptativa no consumo de energia, concluindo que não é necessário ter transceptores complexos suportando um grande número de formatos de modulação. Por fim, analisam o impacto da capacidade e complexidade do transceptor na agregação do tráfego e a compensação entre custo de implantação (CapEx - *Capital Expenditure*) e custo de operação (OpEx - *Operational Expenditure*) nestes termos.

Geralmente a eficiência espectral e o consumo de potência são otimizados separadamente, a exemplo de Hadi e Pakravan (2018) apresentado anteriormente. Assim, Munasinghe et al. (2021) propuseram um novo esquema de RMSA ciente das PLIs para incrementar a eficiência espectral conjuntamente com a redução do consumo de energia em EONs. Ao contabilizar as penalidades em tempo real, o esquema mitiga as limitações associadas às abordagens de banda de guarda e alcance de transmissão fixos, oferecendo uma maior eficiência espectral. Além disso, em redes grandes, os recursos são provisionados com vista no horário de pico do tráfego, e por isso, uma quantidade significativa de potência é consumida fora desse horário. Com o uso eficiente do espectro disponível, o esquema permite acomodar mais tráfego com facilidade, especialmente durante os horários de pico, o que possibilita o planejamento da rede com menos recursos de fibra, reduzindo seu CapEx. Além disso, roteando o tráfego de maneira eficiente energeticamente, o esquema identifica e desliga os *links* que ficam ociosos, reduzindo o consumo de energia e, conseqüentemente, o OpEx da rede. O modelo das PLIs usado foi o apresentado em Johannisson e Agrell (2014) o qual discute em detalhes a derivação de algumas equações do modelo GN reunidas em Poggiolini et al. (2014). Por fim, como resultado, os autores concluem que o esquema proposto incrementa a eficiência espectral em 53% e reduz o consumo de potência em 20%.

Neste mesmo contexto, Halder et al. (2021) propõe um esquema de RSA com eficiência espectral e energética para uma EON com conhecimento de regenerador(es) (E-S-RSM-RSA) em ambiente estático, garantindo a capacidade de sobrevivência baseada em multi-caminhos

e otimizando o consumo de energia e a utilização do espectro em conjunto. Os regeneradores, depois de colocados nos locais intermediários da EON, ajudam a reduzir o espectro necessário para uma demanda de tráfego associada a uma solicitação de conexão às custas de seu consumo de energia. Garantir a sobrevivência também leva a um aumento no consumo de energia devido à redundância de provisionamento. Dessa forma, tem-se um *trade-off* entre o consumo total de energia, utilização do espectro e alocação de regeneradores. Como já foi bastante argumentado na literatura, a exemplo de Talebi et al. (2014), Sena et al. (2022), o problema E-S-RSM-RSA é NP-Difícil, então os autores formularam um modelo de ILP de duas etapas (E-S-RSM-RSA-ILP) para o problema, que é tratável apenas para redes de pequeno porte, e propuseram uma heurística E-S-RSM-RSA-heu baseada no algoritmo evolucionário NSGA-II para resolver o problema para redes de grande porte. O desempenho da heurística é avaliado em termos de utilização do espectro, consumo de energia, quantidade de regeneradores alocados, etc., e posteriormente comparado com os resultados do modelo ILP. Duas topologias para teste: NSFNET e COST-239 são usadas para realizar experimentos de simulação para a heurística E-S-RSM-RSA-heu. Concluiu-se que, com o aumento da qualidade do projeto de sobrevivência, tanto a utilização do espectro quanto o número de regeneradores utilizados aumentam para todas as topologias consideradas. Além disso, o *trade-off* entre a utilização do espectro e o consumo de energia foi comprovado experimentalmente.

A eficiência energética em EONs tornou-se um tema crucial diante do aumento exponencial das demandas por tráfego de dados e do impacto crescente do consumo de energia. Os trabalhos revisados nesta seção destacam abordagens inovadoras que integram eficiência energética e espectral, utilizando técnicas avançadas de roteamento, modulação e alocação de espectro (EE-RMSA) para atender aos requisitos de QoS e otimizar os recursos disponíveis.

Entre as contribuições mais relevantes, destacam-se:

- Algoritmos como EE-RSA e MILP: Demonstraram soluções eficazes para balancear eficiência energética, PB e eficiência espectral, proporcionando ganhos substanciais em consumo de energia e rendimento computacional.
- Integração de heurísticas e técnicas iterativas: Como apresentado por Tan, Gu e Ji (2017) e Hadi e Pakravan (2018), possibilitam a redução do tempo computacional e maior economia de energia, especialmente em cenários com grande número de solicitações.
- Incorporação de PLIs e estratégias de desativação de enlaces: Propostas como as de Munasinghe et al. (2021) e Halder et al. (2021) introduzem modelos que maximizam o uso eficiente de recursos fora dos horários de pico e ajustam o consumo com base na carga de tráfego, reforçando a sustentabilidade operacional das redes.

Os resultados obtidos evidenciam o impacto positivo de soluções que conciliam eficiência energética e espectral, abordando também o *trade-off* inerente ao uso de regeneradores e à

sobrevivência da rede. Embora avanços significativos tenham sido alcançados, desafios como a complexidade computacional, o CapEx e OpEx ainda demandam soluções mais otimizadas.

Em resumo, as estratégias propostas fornecem um caminho promissor para a evolução das EONs, garantindo maior sustentabilidade e adaptabilidade frente às crescentes demandas das redes ópticas modernas.

3.3 Recentes avanços em alocação de recursos em EONs

Ao longo dos anos, o desenvolvimento das EONs continuou a avançar, com esforços para aprimorar a alocação de recursos e reduzir o uso de espectro. A seguir, serão apresentados alguns trabalhos mais recentes nesta temática.

Partindo do trabalho de Vale e Almeida (2019) que aborda o problema de potência, roteamento, nível de modulação e atribuição de espectro (PRMLSA - *Power, Routing, Modulation Level, and Spectrum Assignment*) nas EONs, acrescentando a variável de potência ao tradicional RMLSA. A introdução do PRMLSA busca otimizar a QoT e o uso de espectro, considerando os impactos do ruído ASE e das NLIs em redes totalmente ópticas. Três algoritmos de alocação de potência são propostos: atribuição de potência egoísta (EPA - *Egoistic Power Assignment*), que utiliza a máxima potência de cada sinal, atribuição de potência suficiente (EnPA - *Enough Power Assignment*), que utiliza a menor potência possível que ainda satisfaça o OSNR, e atribuição de potência adaptativa (APA - *Adaptive Power Assignment*), que adapta a potência com uma margem de segurança para futuras interferências. O APA demonstrou melhor desempenho em cenários de alta densidade de tráfego, reduzindo significativamente a PB e melhorando a eficiência do espectro ao se ajustar dinamicamente às condições da rede. No entanto, sua complexidade computacional é maior, devido à necessidade de consultas em banco de dados para ajuste da potência em tempo real, o que limita sua aplicação prática. Vale e Almeida concluem que o APA é uma abordagem promissora para EONs, especialmente com infraestrutura computacional adequada, e destacam a importância de algoritmos dinâmicos para enfrentar os desafios de escalabilidade em redes ópticas de alta demanda.

O uso de algoritmos adaptativos tornou-se ainda mais relevante em 2020, quando Santos e Abrão (2020b) introduziram uma abordagem inovadora para a alocação dinâmica de potência em EONs. O estudo propõe um algoritmo baseado na otimização de busca por furacão (HSO - *Harricane Search Optimization*), combinado com um mapa caótico, denominado de atribuição de potência com mapa caótico de busca por furacão (PA-CHSO - *Power Assignment - Chaotic map Harricane Search*). Este método visa controlar dinamicamente os níveis de potência óptica transmitida, adaptando-se às variações de cada enlace causadas por flutuações de tráfego e outros efeitos de interferência de canal. Essa adaptação é possível graças a monitores de desempenho óptico (OPMs - *Optical Performance Monitors*), que fornecem parâmetros de QoT em tempo real. O artigo destaca a eficácia do PA-CHSO em cenários realistas, mostrando sua capacidade de ajustar a transmissão mesmo em condições com incertezas, resultando em melhorias significativas

no uso de recursos e na estabilidade da QoT. Os resultados numéricos confirmam que o PA-CHSO supera algoritmos tradicionais em termos de complexidade, demonstrando um compromisso entre exploração e intensificação na busca da solução ideal.

Ainda em 2020, Santos e Abrão (2020a) apresentaram o algoritmo adaptativo CHSO (A-CHSO - *Adaptive - CHSO*), um avanço do trabalho anterior, o qual busca resolver o problema complexo de controle de potência em EONs adaptando dinamicamente os níveis de potência para atender às flutuações de tráfego e interferências no canal, mantendo a QoT. Esse controle adaptativo da potência é realizado por meio de uma adaptação do parâmetro de incremento de potência r_0 , utilizando uma função linear que ajusta o valor de r_0 com base no estado atual da rede, o que permite ajustar a potência transmitida de acordo com as variações de qualidade estimadas por OPMs. Comparado a métodos tradicionais, como o EPA e EnPA, o A-CHSO apresenta um desempenho significativo em termos de complexidade computacional e eficiência energética. O A-CHSO oferece um equilíbrio entre desempenho e complexidade, sendo uma alternativa mais prática para operações em tempo real em EONs. A estratégia caótica do algoritmo permite explorar o espaço de busca eficientemente, evitando mínimos locais e acelerando a convergência para soluções ideais. Assim, o estudo mostrou que o A-CHSO reduz significativamente as margens de potência na rede, aumentando a eficiência espectral e energética, além de possibilitar uma redução nos custos operacionais da rede.

Outro avanço importante é o ajuste adaptativo de BER para redes de ampla área. Este estudo realizado por Calderon et al. (2020) propõe um algoritmo que ajusta o limiar de BER de forma adaptativa, maximizando a taxa de aceitação de conexões enquanto preserva a qualidade de sinal através do uso eficiente de formatos de modulação e dispositivos regenerativos. A principal inovação do algoritmo BER-*Adaptive* RMLSA reside em sua capacidade de ajustar os limiares de BER em resposta às condições variáveis da rede, priorizando a melhor QoT possível para cada conexão e utilizando formatos de modulação mais eficientes em termos de espectro. Esse método é particularmente relevante em cenários de alta demanda e em redes de longa distância, onde dispositivos de regeneração 3R são necessários para manter a QoT. O algoritmo proposto supera as limitações de métodos convencionais de RMLSA, que utilizam valores de BER fixos, oferecendo maior flexibilidade e eficiência espectral ao adaptar dinamicamente os parâmetros de modulação e alocação de recursos de rede.

Um outro trabalho que se utiliza do modelo GN para estimar a OSNR de um canal é o estudo de Rezaee, Sheikhabad e Beygi (2021). Os autores examinam três arquiteturas de plano de controle — (GMPLS - *Generalized Multi-Protocol Label Switching*), GMPLS com PCE - *Path Computation Element* (GMPLS/PCE) e SDN - *Software Defined Networking* — para EONs, considerando as limitações físicas da camada óptica, como ruído de NLIs e ruído ASE. O principal objetivo é avaliar a capacidade dessas arquiteturas de manter a QoT em redes dinâmicas, reduzindo a PB de conexões. Para tal, utiliza o modelo GN para estimar a relação OSNR dos canais, considerando fatores de modulação de fase cruzada (XPM) e modulação de fase própria (SPM), além do ASE gerado nos amplificadores ópticos. Essa análise é aplicada às

topologias Pan-Europeia e NSFNET, fornecendo um panorama detalhado de como as diferentes arquiteturas respondem ao aumento da carga de tráfego e às variações de potência de transmissão. Os resultados mostram que o plano de controle SDN, por ser totalmente centralizado, apresenta uma melhora de quase 50% na PB em cargas de tráfego em torno de 200 Erlang, comparado ao GMPLS e GMPLS/PCE. Essa redução significativa no bloqueio é atribuída à capacidade do SDN de gerenciar centralmente os recursos e adaptar-se rapidamente às mudanças nas condições da rede, otimizando o uso de espectro e reduzindo o impacto das interferências. Além disso, o estudo avalia o impacto da potência de lançamento na PB, identificando que a potência ideal para o menor bloqueio está em torno de 0 dBm para todas as arquiteturas. Esse valor de potência maximiza a OSNR sem amplificar excessivamente as NLIs, resultando em uma QoT mais estável e adequada. As simulações mostram que, em cargas de tráfego elevadas, a indisponibilidade de recursos é o principal fator para o aumento na PB, enquanto em cargas mais baixas, a restrição de QoT imposta pelo NLI assume maior relevância. Essa análise reflete a relevância das arquiteturas de plano de controle QoT-aware em EONs, enfatizando como a escolha da arquitetura impacta o desempenho geral da rede em termos de QoT e eficiência de espectro, fornecendo *insights* valiosos para o projeto e a operação de redes ópticas dinâmicas.

Diante do crescimento exponencial da demanda por largura de banda e do aumento no consumo de energia em redes de telecomunicações, Munasinghe et al. (2021) apresenta um esquema inovador de alocação de recursos em EONs que busca otimizar a eficiência espectral e o consumo de potência simultaneamente. O estudo propõe um modelo que minimiza o desperdício de espectro e o consumo de potência ao levar em conta as limitações impostas pela camada física. Essas limitações incluem o ruído ASE e as NLIs, que são modeladas com precisão através do modelo GN. O modelo desenvolvido utiliza uma formulação de programação linear inteira para redes menores, onde o esquema de roteamento, formato de modulação e espectro são otimizados para cada solicitação de conexão. Para redes maiores e dinâmicas, os autores apresentam uma heurística de baixa complexidade que mantém o desempenho de otimização em um nível elevado. A heurística leva em consideração a topologia da rede e as condições de tráfego, ajustando-se às mudanças e reduzindo o número de enlaces ativos. Esse ajuste minimiza o consumo de energia, ao mesmo tempo em que otimiza a utilização do espectro ao alocar o caminho e os *slots* de espectro para cada conexão de maneira eficiente. Os resultados numéricos demonstram que a abordagem proposta aumenta significativamente a eficiência do espectro, possibilitando que a rede acomode mais conexões sem ampliar os recursos de fibra. Além disso, o esquema reduz o consumo de energia ao “desligar” enlaces ociosos em momentos de baixa demanda, o que contribui para uma economia de energia durante as horas fora do pico de tráfego. Os autores concluem que o esquema de otimização conjunta proposto representa uma melhoria notável em relação a métodos tradicionais que focam separadamente na eficiência espectral ou no consumo de potência, oferecendo uma solução robusta e de fácil implementação para o crescente cenário das EONs.

Uma outra possibilidade de ampliar os recursos de espectro é o uso das bandas L e

S. Neste sentido, Correia et al. (2021) aborda estratégias de controle de potência e análise de desempenho para sistemas de transporte óptico multibanda que operam nas bandas C, L e S. Seu estudo propõe o uso de multiplexação por divisão de banda (BDM - *Bandwidth Division Multiplexing*) como alternativa à multiplexação por divisão espacial (SDM - *Spatial Division Multiplexing*). Enquanto o SDM requer a instalação de fibras adicionais, o BDM explora o espectro não utilizado nas fibras existentes, permitindo a ampliação da capacidade sem necessidade de novos cabos. Para maximizar a QoT, o estudo utiliza estratégias de controle de potência que ajustam o ganho e a inclinação dos amplificadores ópticos, levando em consideração efeitos de espalhamento Raman e os parâmetros de atenuação e NLIs dependentes da frequência. O controle de potência otimizado permite reduzir a PB de conexão em diferentes topologias de rede, alcançando uma OSNR quase plana ao longo das três bandas, com destaque para a banda S, que ainda apresenta desafios em termos de qualidade devido às limitações dos amplificadores disponíveis. Os autores concluem que a abordagem BDM, quando comparada ao SDM, oferece uma alternativa viável e econômica para a expansão de capacidade, embora o SDM ainda tenha uma leve vantagem em capacidade total.

No contexto dos caminhos ópticos, existem diversas variáveis que podem ser consideradas. Entre elas, destacam-se os tipos de amplificadores e suas configurações, além da possibilidade de regeneração do sinal. Uma proposta que leva em consideração essas variáveis é apresentada por Lozada et al. (2021), que investiga o impacto de diferentes configurações de amplificação e regeneração na PB e no consumo de energia em EONs dinâmicas de grande escala. Para isso, são consideradas cinco configurações distintas de rede (NCI 1 a NCI 5), cada uma com diferentes combinações de EDFA, amplificadores híbridos Raman/EDFA (HFA), amplificadores distribuídos Raman (DFRA) e regeneradores 3R. As configurações NCI 1 a 4 utilizam amplificação óptica em toda a rede (transparente), enquanto a NCI 5 emprega regeneradores 3R em nós intermediários (translúcida). A pesquisa adota um modelo físico que leva em conta os efeitos de ruído ASE e NLIs, utilizando o modelo GN para estimar o alcance máximo de transmissão dos sinais ópticos para diferentes formatos de modulação, como PM-QPSK, PM-16-QAM e PM-64-QAM. Os resultados mostram que as configurações baseadas em HFA e DFRA (NCI 2 e NCI 3) apresentam a menor PB, enquanto a configuração NCI 1, baseada unicamente em EDFA, oferece o menor consumo de energia. No entanto, há um claro *trade-off* entre a eficiência energética e a PB: as configurações com menor bloqueio (NCI 2 e NCI 3) possuem maior consumo de energia devido à necessidade de altos ganhos de amplificação para alcançar maiores distâncias de transmissão. A configuração NCI 2, com um ganho Raman de 0,25, é identificada como uma alternativa promissora para reduzir significativamente a PB sem um aumento proibitivo no consumo de energia, apresentando uma melhoria de 1 a 3 ordens de magnitude na PB em relação às outras configurações em cargas de tráfego altas e baixas, respectivamente. Além disso, a configuração translúcida (NCI 5) com regeneradores 3R reduz a PB em comparação com a configuração NCI 1, embora ainda apresente um desempenho inferior às configurações baseadas em HFA e DFRA. A análise revela que, apesar de os regeneradores permitirem o estabelecimento

de conexões de longa distância ao regenerar o sinal, eles têm um impacto limitado na eficiência espectral em razão de sua capacidade de atender a apenas um usuário por vez. Além disso, o uso de regeneradores aumenta significativamente o consumo de energia, particularmente quando configurados para atender a um tráfego elevado. Isso ressalta a importância de escolher entre uma arquitetura de amplificação e regeneração com base nas necessidades de desempenho e nos custos energéticos da rede. Os autores concluem que a escolha de amplificadores e regeneradores é essencial para equilibrar o desempenho e o consumo energético em EONs. As configurações NCI 2 e NCI 3, baseadas em amplificadores Raman, são recomendadas para redes que exigem baixa PB, enquanto o NCI 1 oferece uma alternativa energeticamente eficiente para redes com menores requisitos de QoT. A pesquisa sugere que, para redes de larga escala, o uso de tecnologias de amplificação avançadas, como os amplificadores Raman, pode ser mais vantajoso em termos de QoT e eficiência energética.

Outro tema em destaque atualmente é a aplicação de técnicas de inteligência artificial na atribuição de recursos em redes ópticas. Nesse contexto, e considerando o aumento de aplicações com requisitos específicos de transmissão que demandam suporte a diferentes níveis de qualidade de serviço (QoS), incluindo conexões orientadas a fluxo (FORs - *Flow Oriented Requests*) e orientadas a dados (DORs - *Data Oriented Requests*), Hajipour, Habibi e Beyranvand (2022) explora a implementação de EONs capazes de gerenciar múltiplas classes de serviço de forma eficiente, utilizando redes neurais artificiais (ANNs - *Artificial Neural Networks*) para priorização e provisão de recursos. Dessa forma, os autores introduzem dois métodos de RSA que utilizam parâmetros de controle ajustáveis para gerenciar o consumo de recursos com o auxílio de um modelo de regressão ANN para ajustar esses parâmetros de acordo com as políticas de priorização da rede. Esse modelo ANN permite decidir os valores dos parâmetros ideais para manter baixos índices de bloqueio, melhorando a alocação de recursos entre as classes de serviços com base nas condições dinâmicas de carga da rede.

Abordagens utilizando meta-heurísticas para alocação de recursos em redes ópticas também estão em evidência no cenário atual de pesquisa. A exemplo disso, a proposta de Sena et al. (2022) apresenta uma abordagem inovadora para o planejamento de EONs, utilizando o algoritmo genético de ordenação não-dominada (NSGA-II - *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*) para otimização multiobjetivo. O objetivo principal é otimizar a alocação de recursos e mitigar os impactos das NLIs. Os autores destacam a relevância de considerar os modelos de canal que podem prever com precisão as distorções da camada física para melhorar a QoT. Neste contexto, o modelo GN é utilizado para representar os efeitos cumulativos do ruído aditivo e das NLIs, o que permite uma estimativa da margem de OSNR em diferentes formatos de modulação. A técnica proposta pelo estudo utiliza estratégias de alocação de espectro e potência para minimizar o bloqueio e otimizar o uso total do espectro. A pesquisa explora três análises de Pareto que examinam as relações conflitantes entre minimização de largura de banda, maximização da margem mínima de OSNR e maximização da soma das margens de OSNR. Os resultados numéricos demonstram que o método evolutivo pode fornecer um planejamento de

rede que economiza recursos espectrais ao eliminar a necessidade de bandas de guarda entre canais. Além disso, a abordagem comparativa com métodos convencionais evidenciou que a técnica proposta oferece uma solução viável para o planejamento de redes estáticas.

Continuando o seu trabalho de 2019, Vale, Almeida e Assis (2022) ao abordar o problema de PRMLSA em EONs propõem duas novas estratégias: SLA-Path - *Shortest and Least Allocated Path*, que inclui uma inspeção dinâmica da densidade espectral de potência dos enlaces, e RBSA - *Route-Based Spectrum Assignment*, que considera o comprimento do caminho para a alocação do espectro. Essas estratégias são desenvolvidas para minimizar a complexidade computacional e a PB de chamadas, mantendo uma abordagem adaptativa às condições de tráfego dinâmico da rede. O estudo parte do princípio de que a atribuição de potência influencia diretamente a QoT, e a combinação de fatores como a distribuição de potência e a distância do caminho impacta a performance geral da rede. O modelo utilizado avalia o impacto dos ruídos ASE e das NLIs na OSNR. Os resultados destacam que o uso combinado de SLA e RBSA reduziu a PB para um valor significativamente menor comparado aos observados com os algoritmos de roteamento e alocação de espectro tradicionais como *Shortest-Path* combinado com o *First-Fit*.

O trabalho de Santos e Abrão (2022) aborda o problema da alocação conjunta de espectro e potência (SPA - *Spectrum and Power Assignment*) em EONs. Os autores propuseram três algoritmos para resolver o problema de SPA: um método analítico baseado em otimização combinatória (SPA-CO - *Spectrum and Power Assignment - Combinatory Optimization*), um método de baixa complexidade baseado em transmissão adaptativa à distância (SPA-DAT - *Spectrum and Power Assignment - Distance Adaptive Transmission*) e um algoritmo distribuído baseado no modelo de Verhulst (SPA-V). O estudo utilizou monitoramento de desempenho óptico para medir a QoT e introduziu métricas de margem residual (RM - *Residual Matric*) e espectro residual (RS - *Residual Spectrum*) para normalizar a alocação de potência e espectro, respectivamente. Os resultados numéricos mostraram que o SPA-V apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho e complexidade computacional. O SPA-CO garantiu a solução ótima, mas com alto custo computacional, enquanto o SPA-DAT ofereceu melhorias modestas a um custo computacional mais baixo. A análise concluiu que é possível alcançar uma alocação eficiente de potência e espectro com técnicas adaptativas que consideram a variabilidade do tráfego e as características dinâmicas da rede, mantendo baixos índices de bloqueio e alta eficiência espectral.

Visando à redução de custos, mas introduzindo um novo desafio: o vazamento de sinais e a *crosstalk*, os quais impactam na QoT, Ghasrizadeh, Arpanaei e Beyranvand (2024) aborda a alocação de recursos em EONs sem filtros, um tipo de rede que utiliza acopladores e divisores passivos em vez de módulos ópticos reconfiguráveis, como os ROADMs. A pesquisa destaca a relevância de integrar as bandas C e L para aumentar a faixa de espectro utilizável, a qual é uma solução viável para lidar com o aumento da demanda por largura de banda com a chegada das tecnologias 5G e 6G. Os autores propõem uma formulação de programação linear inteira para resolver problemas relacionados à seleção em árvores, roteamento, modulação e alocação de espectro (Q-TRMSA - *Tree Routing, Modulation and Spectrum Assignment*) em redes EONs

sem filtros operando nas bandas C e L. Além disso, desenvolvem algoritmos heurísticos para lidar com redes em larga escala. O estudo demonstra que o método proposto, denominado MX5, é capaz de evitar bloqueios e interrupções em cenários com *throughput* de até 110 Tbps, enquanto a transmissão convencional na banda C atinge *throughput* inferior (cerca de 40 Tbps). Os resultados também indicam que a escolha do método de atribuição de modulação afeta significativamente o uso do espectro, a PB e o desempenho geral da rede. Os autores apresentam uma “regra prática” para equilibrar o uso do espectro, o bloqueio, as falhas e o número de transceptores da banda L necessários.

Com base nos trabalhos discutidos, fica evidente que a evolução das EONs tem sido impulsionada por avanços em algoritmos de alocação de recursos, controle adaptativo de potência e otimização multiobjetivo. Esses desenvolvimentos buscam equilibrar o uso eficiente do espectro, a QoT e o consumo de energia, enfrentando desafios impostos por cenários de alta densidade de tráfego e pela crescente demanda por largura de banda. Estratégias como o uso de meta-heurísticas, controle adaptativo, inteligência artificial e integração de múltiplas bandas espectrais demonstram ser soluções promissoras para atender aos requisitos das redes futuras.

Embora cada abordagem apresente vantagens específicas, como a redução da PB, a melhoria da eficiência energética ou a ampliação da capacidade espectral, as limitações em termos de complexidade computacional e custo operacional ainda são obstáculos a serem superados. Os estudos indicam que o sucesso da implementação dessas técnicas depende de infraestruturas robustas, capazes de lidar com os requisitos dinâmicos e escaláveis das EONs.

Assim, as pesquisas nesta área apontam para a necessidade de soluções integradas que combinem diferentes técnicas e modelos, promovendo uma operação mais eficiente e sustentável das redes ópticas. O uso de estratégias baseadas em inteligência artificial, otimização adaptativa e controle centralizado apresenta um caminho promissor para enfrentar os desafios de escalabilidade e qualidade de serviço nas redes de próxima geração.

3.4 Considerações finais

Este capítulo revisou os principais avanços na alocação de recursos em EONs, evidenciando o papel crucial dessa tecnologia na sustentação das crescentes demandas de tráfego de dados. Os estudos analisados demonstraram o impacto significativo de estratégias inovadoras em diferentes dimensões, como eficiência espectral, consumo energético, PB e QoT.

Destacaram-se os modelos que integram potência adaptativa e regeneradores 3R, abordagens baseadas em inteligência artificial e algoritmos bioinspirados, além de estratégias para minimizar a fragmentação e otimizar o uso de espectro em múltiplas bandas. Essas técnicas mostram que o equilíbrio entre complexidade computacional, OpEx e eficiência é alcançável, mesmo diante dos desafios impostos por redes dinâmicas e de longa distância.

Por fim, os resultados evidenciam que a evolução contínua das EONs depende não apenas de melhorias técnicas e teóricas, mas também de estratégias que integrem múltiplos graus de

liberdade, como potência, espectro e regeneração, promovendo redes mais adaptativas, resilientes e sustentáveis para atender às futuras gerações de comunicação óptica.

Capítulo

4

Metodologia

Neste capítulo, são apresentados detalhadamente os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da presente Tese de Doutorado, cujo principal objetivo é propor e avaliar novas estratégias para a alocação de recursos em EONs, levando em consideração as penalidades impostas pela camada física. A metodologia visa, portanto, proporcionar um aumento na eficiência espectral, uma redução na perda de capacidade de alocação nos enlaces e uma diminuição da PB de conexão na rede.

A abordagem adotada integra uma análise quantitativa por meio de simulações computacionais, permitindo avaliar a eficácia das estratégias desenvolvidas em cenários variados e com diferentes parâmetros de rede, validando as estratégias propostas por meio da comparação dos resultados obtidos com outras metodologias utilizadas na literatura.

Dessa forma, este capítulo oferece uma visão clara e estruturada do processo de desenvolvimento, teste e análise das novas estratégias propostas, garantindo a reprodutibilidade dos experimentos e a robustez dos resultados apresentados.

4.1 Hipótese

A hipótese central desta pesquisa reside na suposição de que a combinação da estratégia MSCL Almeida et al. (2013) com a atribuição de potência baseada no modelo GN para a previsão das PLIs resulta em melhorias significativas no desempenho das EONs. A expectativa é que esta abordagem permita a inserção de circuitos em rotas específicas com níveis de potência que maximizem a margem de OSNR para o próprio canal de entrada, ao mesmo tempo em que minimizem o impacto nos canais já estabelecidos na mesma rota. Essa estratégia visa proporcionar ganhos na QoT e, conseqüentemente, maior eficiência espectral, permitindo a utilização de níveis de modulação mais avançados.

Essa hipótese é sustentada pelo fato de que a OSNR é influenciada por diversos fatores, como o número de spans, a quantidade de enlaces, as perdas e os ganhos introduzidos pelos amplificadores, além da largura de banda e da posição do canal no espectro. A posição espectral

do canal afeta diretamente o nível de ruído acumulado e, portanto, a qualidade do sinal. Além disso, a estratégia MSCL gera, para cada rota, o conjunto de slots de frequência que resulta na menor perda de capacidade de alocação de espectro. Dessa forma, a escolha da rota deve considerar não apenas a previsão de PLIs e a margem de OSNR, mas também o impacto na eficiência espectral global, garantindo um uso mais otimizado dos recursos da rede.

Assim, ao integrar essas variáveis no processo de alocação, espera-se que a abordagem proposta promova uma gestão mais eficiente dos recursos espectrais, reduza a probabilidade de bloqueio e melhore o desempenho global da rede.

4.2 Método de pesquisa

A técnica de pesquisa adotada nesta Tese de doutorado é embasada em uma abordagem quantitativa fundamentada em simulações computacionais. Essa metodologia é essencial para avaliar a eficácia e a eficiência das estratégias desenvolvidas para a alocação de recursos em EONs. As simulações são projetadas para explorar cenários variados, abrangendo diferentes topologias e cargas de rede, garantindo que os resultados obtidos sejam generalizáveis e relevantes para aplicações práticas.

O processo de pesquisa inclui uma etapa de validação dos algoritmos propostos. Essa etapa envolve não apenas a verificação dos resultados em relação aos objetivos definidos, como eficiência espectral e PB de conexão, mas também uma comparação com outras estratégias presentes na literatura. Tal comparação é feita por meio de análises de gráficos de PB em função da carga de rede, que asseguram a significância dos resultados e a identificação de possíveis vantagens ou limitações das novas abordagens.

Em relação às rotas, foram utilizados os k caminhos mais curtos. Isso significa que a estratégia de roteamento foi escolhida para direcionar o tráfego pelos k caminhos mais curtos, com base na minimização da distância percorrida. Essa decisão estratégica teve como objetivo reduzir os impactos das degradações da camada física na rede.

No contexto da geração de chamadas, a rotina desenvolvida assume que as conexões com a rede ocorrem de forma dinâmica, ou seja, aleatória, sem previsão de solicitações futuras. Essa aleatoriedade abrange diversos aspectos, como: (i) o nó de origem, (ii) o nó de destino, (iii) a taxa de bits, (iv) o instante da requisição de chamada e (v) a duração.

Neste trabalho, para cada simulação, são geradas 100.000 requisições de conexão modeladas como um processo de Poisson, com intervalos e durações seguindo distribuições exponenciais. Isso foi feito com o objetivo de refletir um tráfego dinâmico e aleatório.

Devido à natureza aleatória e independente das chegadas, o tempo entre chegadas consecutivas (T_{chegada}) segue uma distribuição exponencial, dada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \quad (4.1)$$

no qual

- λ é a taxa média de chegada (chamadas por unidade de tempo);
- t é o intervalo de tempo entre duas chamadas consecutivas.

Este modelo é amplamente utilizado em redes ópticas devido à sua simplicidade e à capacidade de representar tráfego com características estocásticas.

A duração das chamadas ($T_{\text{duração}}$) também foi modelada como uma variável estocástica, utilizando a distribuição exponencial, pois é a abordagem mais comum para modelar durações homogêneas. Sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad t \geq 0, \quad (4.2)$$

na qual

- $\mu = \frac{1}{\bar{T}_{\text{duração}}}$ é a taxa média de término das chamadas;
- $\bar{T}_{\text{duração}}$ é o tempo médio de duração das chamadas.

Então, são propostas duas metodologias para a alocação de recursos em EONs, ambas focadas na mitigação das degradações da camada física e na redução da PB.

A primeira abordagem combina o ajuste de potência com a alocação de espectro para mitigar as degradações da camada física e reduzir a perda de capacidade de alocação de espectro. O algoritmo de alocação de espectro utilizado é o MSCL, pois este busca encontrar os *slots* de frequência que resultam na menor perda de capacidade de alocação nos enlaces da rota. Para fins de testes, serão utilizadas as topologias de rede NSFNET (Fig. 12) e DT14 (Fig. 13), caracterizadas por diferentes números de nós e comprimentos de enlace. O comprimento de cada *span* foi fixado em 80 Km, com um coeficiente de atenuação da fibra de $\alpha = 0.2$ dB/km, resultando em perdas nas fibras e ganhos nos amplificadores de pelo menos 16 dB.

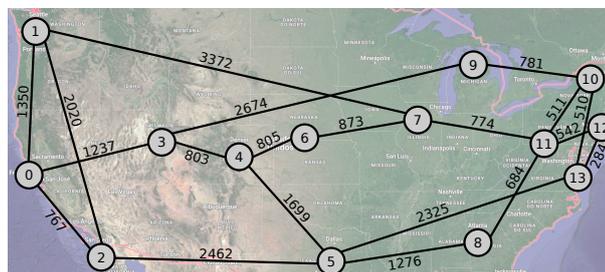


Figura 12 – Topologia da rede NSFNET.

A segunda proposta utiliza otimização multiobjetivo (MOO) para minimizar o uso do espectro e maximizar a OSNR, ajustando a potência de forma otimizada e reduzindo a SCI e XCI. Para isso, foi empregado o algoritmo NSGA-II, com uma população de 100 indivíduos e 250 gerações, utilizando mutação polinomial com taxa $1/n$, onde n é o número de variáveis de decisão.

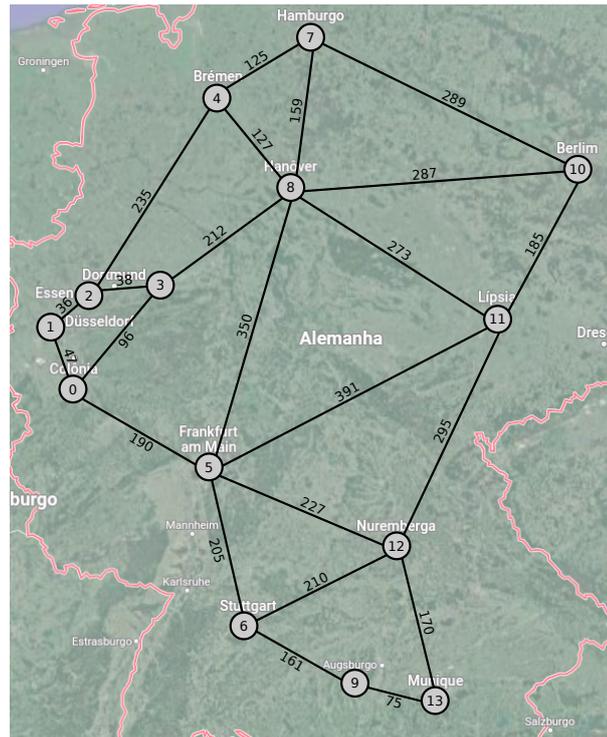


Figura 13 – Topologia da rede DT14.

Adicionalmente, o algoritmo MSCL gera todos os conjuntos de *slots* disponíveis para a otimização, minimizando a perda de capacidade de alocação. A estratégia de roteamento considera os caminhos mais curtos disponíveis nas topologias NSFNET e DT14, com características distintas que influenciam os efeitos das penalidades da camada física.

A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros das redes utilizados em ambas as propostas. Esses valores foram selecionados para avaliar os impactos de diferentes níveis de modulação, taxas de bits e configurações de enlaces na PB e na qualidade do sinal.

Tabela 2 – Parâmetros de simulação.

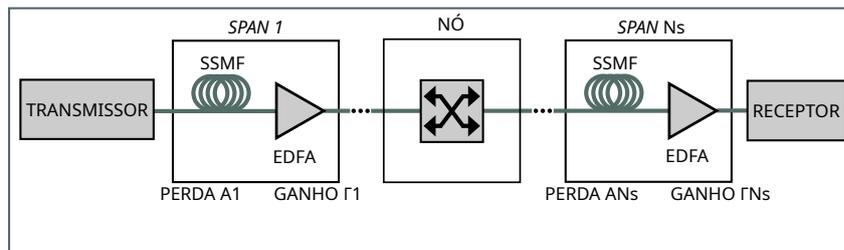
Parâmetro	Valor
R_b	[100, 200, 300, 400] Gbps
\mathcal{M}	[4, 8, 16, 32, 64] QAM
L_s	80 Km
$OSNR_{in}$	30 dB
Δf	Variável
B_o	12.5 GHz
ν	193.85 THz
α	0.2 dB/km
Ω	100 a 200 Erlangs
N_s	128
γ	$1.30 \text{ W}^{-1} \cdot \text{Km}^{-1}$
β_2	$20 \cdot 10^{-24} \text{ s}^2 \cdot \text{Km}^{-1}$

Ambas as propostas foram desenvolvidas para explorar diferentes estratégias de alocação de recursos, considerando as limitações e peculiaridades das redes ópticas elásticas.

4.3 Modelo da rede

Nesta pesquisa, considera-se uma EON transparente, cuja topologia é representada pelo grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{E})$, onde \mathcal{N} e \mathcal{E} representam o conjunto de nós e enlaces bidirecionais, respectivamente. Assume-se que os recursos de espectro da fibra são quantificados em unidades de frequência contíguas chamadas *slots*, de largura de banda 12,5 GHz Gerstel et al. (2012). Todos os nós podem se comunicar com qualquer outro. Cada enlace é composto por vãos (*spans*) que têm um comprimento $L_s = 80$ Km acompanhado por um amplificador óptico EDFA como na Fig. 14. Um caminho de luz pode passar por vários enlaces. O número de *spans* de uma conexão ao longo de uma rota é representado por N_s . Todos os nós são equipados com S-BVTs que podem transmitir e receber conexões moduladas em M diferentes níveis de modulação e R_b taxas de bits. Uma conexão é caracterizada pelo par de nós de origem e destino $(s, d) \in \mathcal{N}$ e taxa de dados R_b . Para cada formato de modulação disponível, é requerido um limiar mínimo de OSNR ($OSNR_{th}$). Cada nó da rede é baseado na tecnologia NWDM e, devido à sua forma espectral, a PSD G pode ser calculada como p/B , em que p é a potência e B a largura de banda do canal, calculada através da Eq. 4.4. Outros fatores que são levados em consideração são a frequência da portadora f e a rota, que consiste de uma sequência de enlaces ligando a origem ao destino. Assume-se que as perdas são totalmente compensadas pelos ganhos dos amplificadores e que os efeitos de dispersão são compensados por processamento digital de sinal e não são considerados nas penalidades da camada física. Assim, a QoT da conexão pode ser estimada pelo modelo GN (POGGIOLINI, 2012; POGGIOLINI et al., 2014).

Figura 14 – Enlace transparente.



Fonte: Autoria própria

Com base nas considerações feitas acima, para construir o algoritmo de alocação de recursos, são necessárias algumas definições:

- i Sendo \mathcal{D} o conjunto de conexões, uma conexão $i \in \mathcal{D}$ é caracterizada por um par de nós (s_i, d_i) e uma taxa de dados R_i , ocupando portanto, uma largura de banda $\Delta f_i = \frac{R_i}{\mathcal{M}^i}$.
- ii Seja $\mathcal{LP}_{s,d} = \{\mathcal{LP}_{s,d}^1, \mathcal{LP}_{s,d}^2, \dots, \mathcal{LP}_{s,d}^k, \dots, \mathcal{LP}_{s,d}^K\}$ o conjunto de todos os k caminhos candidatos entre (s, d) pré-computados usando o algoritmo de Yen (YEN, 1971).
- iii Seja $\mathcal{L}_{s,d} = \{\mathcal{L}_{s,d}^1, \mathcal{L}_{s,d}^2, \dots, \mathcal{L}_{s,d}^k, \dots, \mathcal{L}_{s,d}^K\}$ o conjunto de todos os comprimentos dos caminhos entre (s, d) em quilômetros.

- iv Seja R_b^i a taxa de bits requerida por uma conexão entre um par (s_i, d_i) .
- v Seja $\mathcal{R} = \{R_b^1, R_b^2, \dots, R_b^t, \dots, R_b^T\}$ o conjunto de todas as taxas de bit.
- vi Seja $\mathcal{M} = \{\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2, \dots, \mathcal{M}_m, \dots, \mathcal{M}_M\}$ o conjunto de todos os formatos de modulação disponíveis nos S-BVTs.
- vii Seja $\mathcal{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_p, \dots, p_P\}$ um vetor de potência discreta variando entre 0 e p_{max} dada pela Eq. 2.20.
- viii Seja a matriz $\mathcal{SM}(M, K)$ que armazena a quantidade de *slots* de frequência necessários para uma taxa de bits $R_b^i \in \mathcal{R}$ a um formato de modulação $\mathcal{M}^m \in \mathcal{M}$, onde M e K são a quantidade de elementos de \mathcal{M} e $\mathcal{LP}_{s,d}$, respectivamente.
- ix Seja a matriz $\mathcal{SCI}(M, K)$ que armazena as SCIs relacionadas à escolha de cada elemento de \mathcal{SM} .
- x Seja a matriz $\mathcal{XCI}(M, K)$ que armazena as XCIs relacionadas à escolha de cada elemento de \mathcal{SM} a uma dada potência $p_p \in \mathcal{P}$.
- xi Seja o vetor $\mathcal{ASE}(K)$ que armazena os ruídos ASE relacionadas à escolha de cada coluna de \mathcal{SM} a uma dada potência $p_p \in \mathcal{P}$.

Com base nas considerações acima mencionadas, o algoritmo de alocação de recursos recebe como parâmetros de entrada a topologia \mathcal{G} , o conjunto das eficiências espectrais \mathcal{M} e as demandas de tráfego $R_i, \forall i \in \mathcal{D}$. As saídas são a frequência da portadora f_i , a largura de banda Δf_i , PSD $G_i(f_i)$, a rota e o nível de modulação.

A seguir, serão propostas e discutidas estratégias para resolver o problema explicitado neste capítulo. Tais esquemas são baseados na subdivisão do problema em subproblemas.

4.4 Técnicas propostas

4.4.1 Alocação de recursos através da heurística P-MSCL

Aqui, propomos uma técnica de alocação de recursos para EONs que utiliza uma versão modificada da heurística MSCL Almeida et al. (2013), denominada MSCL-O (MSCL-ordenado), em conjunto com uma atribuição de potência. Esta técnica é chamada P-MSCL (Potência e Atribuição de Espectro com MSCL).

A técnica MSCL-O busca identificar os *slots* de frequência que oferecem a menor perda de capacidade para a alocação de espectro dentro de um conjunto de k rotas. Cada rota e seus respectivos *slots* são classificados de acordo com a menor perda de capacidade. Esta abordagem difere da técnica original ao identificar os *slots* que resultam na menor perda de capacidade em k

rotas, formando um par (rota, conjunto de *slots*) e ordenando cada par de acordo com a menor perda de capacidade.

A proposta baseia-se na premissa de que integrar a técnica MSCL-O com a atribuição de potência pode aumentar a eficiência da rede. Assim, para um par (rota, conjunto de *slots*) classificado segundo a menor perda de capacidade para a alocação espectral, o algoritmo de atribuição de potência busca estabelecer uma margem predeterminada entre o OSNR mínimo e máximo para o canal, visando reduzir as penalidades impostas pela camada física. Caso a OSNR desejada não seja alcançada, a estratégia recorre ao próximo conjunto de rotas e *slots*. Se ainda assim não for possível, reduz-se o nível de modulação e repete-se o procedimento.

A seguir, detalharemos a ideia central desta proposta, descrevendo a heurística desenvolvida. Inicialmente, apresentaremos seus componentes fundamentais, incluindo roteamento e alocação de espectro, seguidos pela atribuição de potência. Por fim, discutiremos a integração da heurística ao algoritmo de Controle de Admissão de Chamadas (CAC - *Call Admission Control*).

4.4.1.1 Descrição das etapas

A Fig. 15 descreve o procedimento de roteamento e alocação de espectro proposto neste estudo. Inicialmente, k rotas são geradas entre todos os pares de nós origem e destino utilizando o algoritmo de Yen (1971) de forma *offline* (passo 1). Quando uma solicitação de conexão é recebida (passo 3), as k rotas correspondentes ao par origem-destino dessa conexão são preparadas (passo 2).

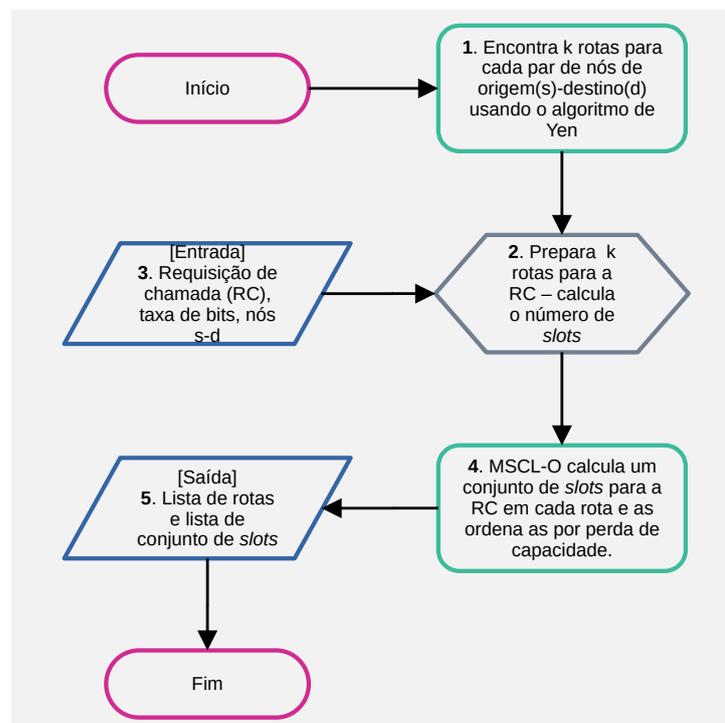


Figura 15 – Etapa de Roteamento e Alocação de Espectro - **RSA**.

Subsequentemente, calcula-se o número de *slots* necessário com base no nível de modula-

ção estabelecido para a solicitação de conexão e na taxa de bits requerida. Para isso, determina-se primeiramente a taxa de símbolos por meio da Eq. 4.3:

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2(M) \times P} \quad (4.3)$$

no qual R_s é a taxa de símbolos, M o formato de modulação e P o número de polarizações.

Em seguida, calcula-se a largura de banda necessária (B) multiplicando a taxa de símbolos pelo fator de *roll-off* (α), conforme a Eq. 4.4:

$$B = R_s \times (1 + \alpha). \quad (4.4)$$

Por fim, obtém-se o número de *slots* de frequência (N_s) através da Eq. 4.5:

$$N_s = \left\lceil \frac{B}{\Delta f} \right\rceil \quad (4.5)$$

onde Δf representa a largura de banda de cada *slot* de frequência.

No próximo passo (passo 4), o algoritmo MSCL-O é empregado para buscar o conjunto de *slots* em cada rota que resulta na menor perda de capacidade na alocação espectral, e o valor da perda associada é calculado. Este processo é repetido para todas as k rotas, e os resultados são ordenados em ordem crescente de perda de capacidade. O resultado deste passo consiste em um conjunto de k rotas, cada uma acompanhada pelos respectivos conjuntos de *slots* que resultam na mínima perda de capacidade em cada rota (passo 5).

A etapa subsequente é a atribuição de potência (PA), que começa imediatamente após o RSA. A Fig. 16¹ ilustra o algoritmo de atribuição de potência ativado ao receber a solicitação de conexão, a rota designada e o nível de modulação correspondente (passo 1). Este algoritmo utiliza parâmetros específicos da rota, como coeficiente de atenuação da fibra, figura de ruído dos amplificadores, espectro, entre outros, para calcular o SCI, XCI e o ruído ASE usando a Eq. 2.16, Eq. 2.17 e Eq. 2.18 (passo 3).

Com base nessas quantidades calculadas, estima-se a potência máxima utilizando a Eq. 2.20, enquanto o OSNR máximo é determinado através da Eq. 2.15. Esses valores são então utilizados para atribuir potência ao canal, configurando-a como a potência mínima necessária mais uma margem de segurança (passos 3 a 7). Teoricamente, esta abordagem busca aumentar a eficiência espectral e garantir a qualidade da transmissão, considerando características específicas da rota e efeitos adversos, como ruídos e interferências, que podem impactar o desempenho do sistema.

Nesta versão, o algoritmo incorpora um fator de margem de OSNR fixo, configurado em 60% da diferença entre a OSNR mínima e a máxima alcançável com base no estado atual da rota. Este valor foi escolhido para equilibrar o bloqueio espectral e o bloqueio por QoT.

¹ A sigla CRpe indica que há ou não há potência suficiente para atender à solicitação.

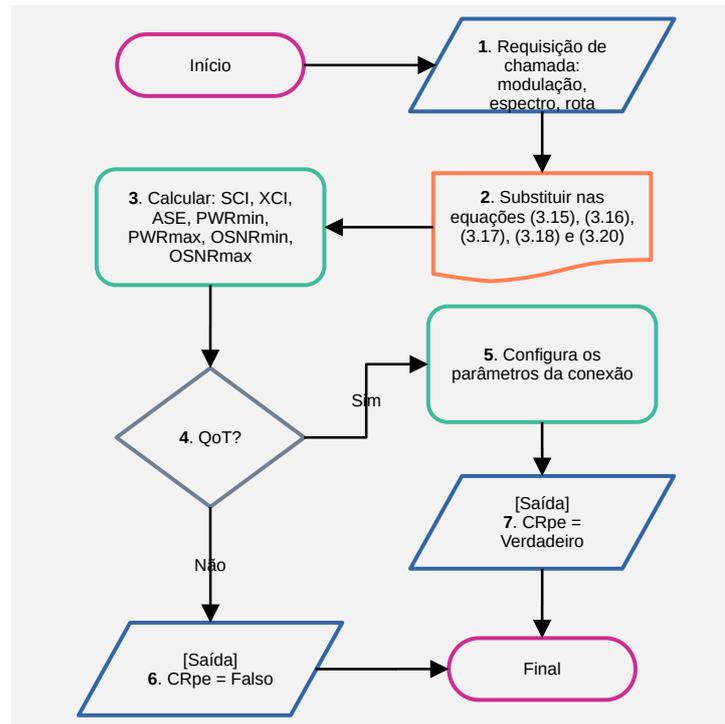


Figura 16 – Etapa de Atribuição de Potência - PA.

4.4.1.2 Estratégia de alocação de recursos

Esta etapa, visualizada na Fig. 17, opera no contexto do CAC. Quando uma solicitação de chamada é recebida, o objetivo é selecionar o nível de modulação mais eficiente. Essa determinação leva em conta a taxa de bits associada à chamada, o que, por sua vez, permite o cálculo do número necessário de *slots*. Em seguida, as k rotas pré-geradas para o par de nós de origem e destino relacionado à chamada são selecionadas e, subsequentemente, aplica-se o processo RSA.

Após esta etapa, cada uma das k rotas e seus respectivos *slots* são sequencialmente enviados para a etapa de PA. O processo é considerado completo se a QoT requerida, acrescida de uma margem de segurança, for alcançada. No entanto, caso essa condição não seja atendida, o nível de modulação é reduzido, e todo o procedimento é repetido.

4.4.1.3 Análise comparativa com as técnicas *Just Enough* e *Maximum Power*

A abordagem P-MSCL é um método de alocação de recursos para EONs que combina sinergicamente a heurística MSCL-O com uma estratégia de atribuição de potência. Conforme mencionado anteriormente, a técnica MSCL-O é destinada a localizar slots de frequência que minimizam a perda de capacidade durante a alocação espectral em cada um dos k caminhos. Ao unir o MSCL-O a um esquema de atribuição de potência, nosso método visa melhorar o desempenho da rede ao conectar eficientemente a posição espectral dos slots atribuídos à OSNR. Essa conexão é essencial, pois uma maior QoT permite níveis de modulação mais eficazes, diminuindo o consumo de recursos espectrais. A técnica P-MSCL refina essa abordagem ao

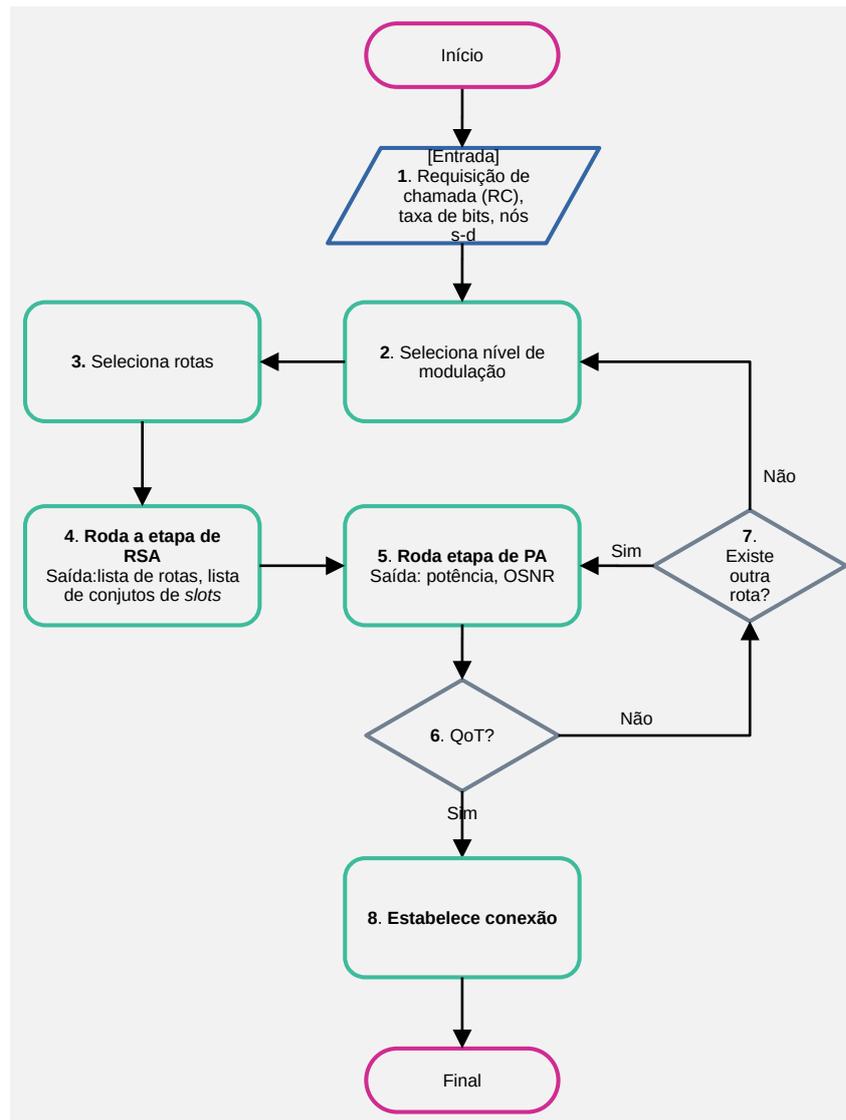


Figura 17 – Estratégia de Alocação de Recursos - Etapa CAC.

estabelecer uma margem entre o OSNR mínimo e máximo necessário para cada canal, o que atenua os efeitos das imperfeições da camada física e incrementa a eficiência geral da rede.

Para fins de comparação, realizaremos uma análise comparativa utilizando dois métodos amplamente aceitos de alocação de potência para demonstrar a eficácia da técnica P-MSCL: JE - *Just Enough* e MP - *Maximum Power*. A estratégia JE atribui apenas a potência necessária para estabelecer a conexão. Por outro lado, a estratégia MP proporciona a potência que resulta na OSNR máxima possível para o canal nas condições da rota. Com essa análise, esperamos que as vantagens do P-MSCL em equilibrar a eficiência espectral com a QoT sejam evidenciadas, oferecendo *insights* valiosos para melhorar a alocação de recursos em EONs.

4.4.2 Alocação de recursos através da otimização multiobjetivo

Nesta seção, o objetivo é desenvolver uma técnica de alocação de recursos para EONs utilizando otimização multiobjetivo (MOO - *Multi-objective Optimization*) para otimizar o uso

do espectro e da potência, reduzindo os efeitos não lineares da camada física e melhorando o desempenho da rede.

Para alcançar este objetivo, ao receber uma solicitação de conexão no CAC, todas as combinações possíveis de demanda de *slots* de frequência são geradas combinando os níveis de modulação disponíveis \mathcal{M} com a taxa de bits solicitada $R_b^i \in \mathcal{R}$. Em seguida, a heurística MSCL é usada para identificar o conjunto de *slots* em cada uma das k rotas que resultam na menor perda de capacidade de alocação para a demanda, considerando cada nível de modulação. Desta forma, para cada rota, obtém-se m conjuntos de *slots* de frequência, formando uma matriz onde as colunas representam as rotas e as linhas representam os conjuntos de *slots* $S_{m,k}$ de acordo com o nível de modulação. Esta matriz é então usada em uma otimização multiobjetivo para minimizar o uso do espectro e maximizar o OSNR.

Consideramos aqui a hipótese de que integrar a técnica MSCL com a atribuição de potência em uma MOO pode melhorar a eficiência da rede. Além de selecionar os *slots* de frequência para reduzir a perda de capacidade de alocação (fragmentação espectral), o objetivo é escolher, entre os conjuntos de *slots* identificados, aquele que, combinado com um valor ótimo de potência, maximize o OSNR e minimize o uso do espectro.

A maximização do OSNR será alcançada por meio de vários fatores: a SCI e a XCI são inversamente proporcionais à largura de banda, enquanto a XCI é diretamente proporcional às potências dos canais já alocados ao longo da rota, além de depender da posição espectral onde o canal será atribuído. Além disso, o ruído ASE depende da rota. Assim, uma escolha ótima desses fatores é esperada para melhorar o desempenho da rede, minimizando as penalidades na camada física.

4.4.2.1 Descrição das etapas

A Fig. 18 ilustra o procedimento proposto de RSA. Inicialmente, utilizando o algoritmo de Yen *offline*, k rotas são geradas entre todos os pares de nós origem-destino (passo 1). Quando uma solicitação de conexão é recebida (passo 2), as k rotas correspondentes ao par origem-destino $\mathcal{LP}_{s,d}$ dessa conexão são preparadas, e o número de *slots* de frequência para cada nível de modulação em \mathcal{M} é calculado de acordo com a taxa de bits solicitada \mathcal{R}_b (passo 3). Em seguida (passo 4), com base no número de *slots* calculado no passo 3, o algoritmo MSCL busca o conjunto de *slots* em cada rota, resultando na menor perda de capacidade na alocação espectral para cada nível de modulação. Finalmente (passo 5), uma matriz $m \times k$ é gerada, onde seus elementos são conjuntos de *slots* correspondentes a cada nível de modulação (linhas) e às rotas (colunas), como representado na matriz \mathcal{SM} . Se a matriz não contiver pelo menos um elemento com um conjunto de *slots* de frequência, a conexão será bloqueada devido à falta de espectro disponível (passo 6).

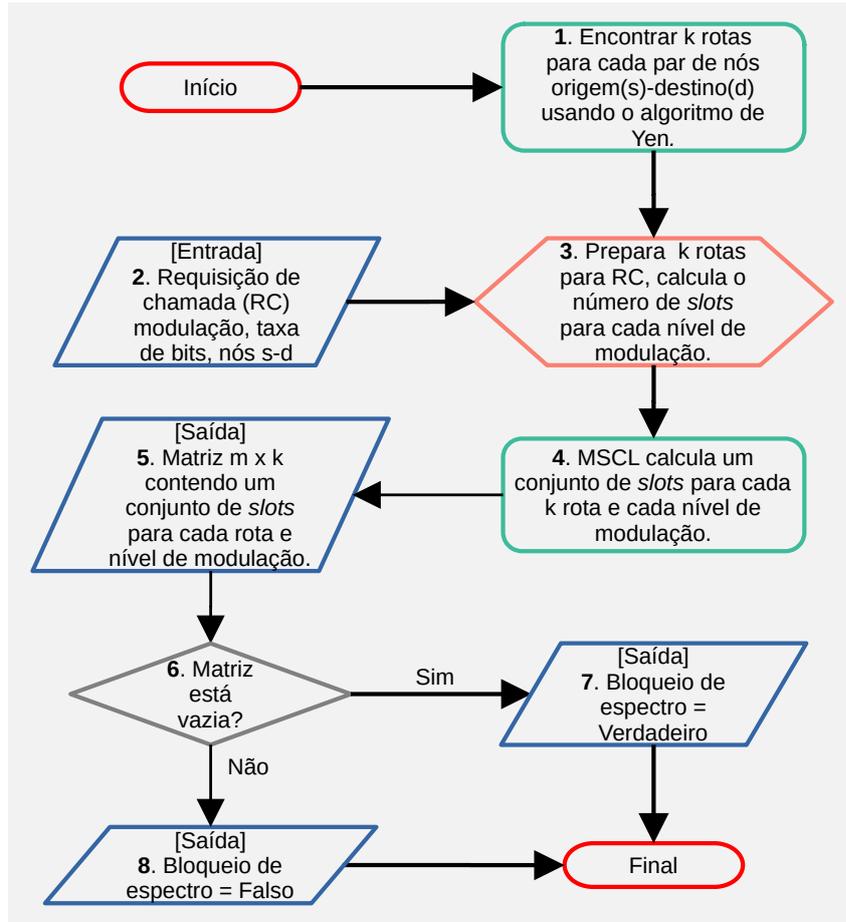


Figura 18 – Etapa de RSA.

$$SM = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \cdots & S_{1,k} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \cdots & S_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m,1} & S_{m,2} & \cdots & S_{m,k} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A próxima fase é a MOO e começa imediatamente após o processo de RSA. A Fig. 19 descreve o processo de otimização, onde a matriz gerada na etapa anterior serve como entrada (passo 1). Cada elemento da matriz SM é utilizado na Eq. 2.16, Eq. 2.17 e Eq. 2.18. Em seguida, as matrizes SCI e \mathcal{XCI} , que possuem as mesmas dimensões da matriz SM , pois também dependem da rota e da modulação, e o vetor ASE , que possui a mesma dimensão das colunas de SM , pois depende apenas da rota, são calculados (passo 2). Cada uma dessas matrizes é posteriormente substituída elemento a elemento na Eq. 2.15 para calcular o OSNR. As funções objetivo são (1) a função OSNR (Eq. 2.15) e (2) o tamanho de cada elemento da matriz de SM . Neste processo, o objetivo é maximizar (1) e minimizar (2). Após encontrar os valores das variáveis que atendem a esses objetivos, torna-se possível definir a rota, o espectro, a potência e a modulação para o canal a ser inserido. Se nenhum valor de potência satisfizer o requisito mínimo de OSNR, a conexão será bloqueada devido à insuficiência de QoT.

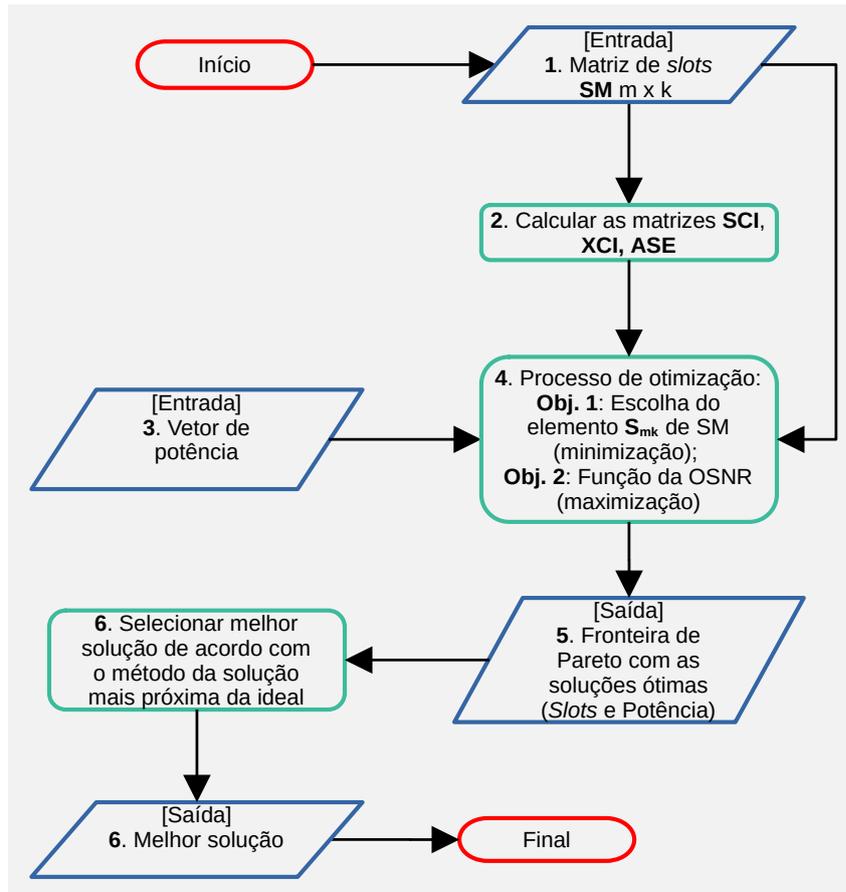


Figura 19 – Etapa de Otimização.

4.4.2.2 Definição geral do problema

O problema de otimização multiobjetivo tem como objetivo minimizar o uso do espectro e maximizar a OSNR para cada solicitação de conexão recebida, enquanto atende à restrição de QoT.

Variáveis de decisão:

- P_{ch} : Potência de lançamento da luz do canal ch na fibra óptica.
- $S_{m,k}$: Conjunto de *slots* de frequência alocados ao canal ch .
- R_k : Rota alocada ao canal ch .
- M_m : Nível de modulação utilizado para o canal ch .

Objetivos:

1. Minimização do uso do espectro do canal:

$$f_1(S) = \min \sum_{m,k \in SM} S_{m,k} ,$$

em que $S_{m,k}$ é o conjunto de *slots* a ser alocado ao canal ch .

2. Maximização da OSNR:

$$f_2(P) = \max \left(\frac{P_{ch}}{SCT P_{ch}^3 + \mathcal{XCT} P_{ch} + ASE} \right),$$

em que os coeficientes SCT , \mathcal{XCT} , e ASE são matrizes.

Restrição: QoT mínima (limite inferior de OSNR):

$$OSNR_{ch} \geq OSNR_{\min}, \quad \forall ch$$

Uma técnica como o NSGA-II apresentada em Deb (2010) pode ser aplicada para resolver o problema de otimização multiobjetivo. A abordagem envolve:

1. Gerar uma população inicial de soluções aleatórias (S, P, R, M).
2. Avaliar as funções objetivo $f_1(S)$ e $f_2(P)$.
3. Aplicar operadores genéticos (seleção, *crossover*, mutação).
4. Evoluir a população para obter uma Fronteira de Pareto (FP), um conjunto de soluções em que é impossível melhorar um objetivo sem piorar pelo menos outro, segundo Deb (2010), representando o conjunto de soluções não dominadas.
5. Selecionar a melhor solução com base no critério da menor distância euclidiana até a solução ideal.

4.4.2.3 Menor distância euclidiana para a solução ideal

Na otimização multiobjetivo, um dos desafios centrais é identificar soluções que equilibrem adequadamente os diferentes objetivos em conflito. Uma abordagem comum para resolver esse problema é a utilização do conceito de **distância euclidiana**, que mede a proximidade de uma solução em relação a um ponto ideal, ou seja, um ponto que otimiza simultaneamente todos os objetivos considerados. Neste contexto, o ponto ideal representa uma referência teórica que, embora nem sempre seja alcançável na prática, serve como um guia para avaliar a qualidade das soluções encontradas.

Assim, dado um ponto $P_1 = (p_{11}, \dots, p_{1l}, \dots, p_{1L})$ no conjunto ótimo de Pareto, a distância para um ponto ideal $P_2 = (p_{21}, \dots, p_{2l}, \dots, p_{2L})$, onde $l = 1, 2, \dots, L$ é o número de objetivos, pode ser calculada pela chamada distância Euclidiana, que é definida como (FUENTE; VEGA-RODRÍGUEZ; PÉREZ, 2018):

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{\sum_{l=1}^L (p_{1l} - p_{2l})^2}. \quad (4.7)$$

No caso específico deste trabalho, onde a FP é composta por soluções que otimizam dois objetivos (espectro utilizado e margem de OSNR), a distância euclidiana é uma métrica eficaz para quantificar quão próxima uma solução está do ponto ideal. Para garantir que o cálculo da distância seja coerente, é necessário normalizar os valores dos objetivos no intervalo $[0, 1]$. Dessa forma, o ponto ideal $P_2 = (1, 1)$ representa a situação em que o uso do espectro é minimizado (nível de modulação máximo) e a margem de OSNR é maximizada. A distância euclidiana entre um ponto P_1 no conjunto ótimo de Pareto e o ponto ideal P_2 é então calculada conforme a Equação 4.7, fornecendo uma medida quantitativa da qualidade da solução em relação ao cenário ideal. Essa abordagem permite uma análise mais estruturada e comparativa das soluções ao longo da FP.

4.4.2.4 Estratégia de alocação

Esta fase, representada na Fig. 20, opera no contexto do CAC. Quando uma solicitação de chamada é recebida, o próximo passo é encaminhá-la à fase RSA, conforme mostrado na Fig. 18. Na fase RSA, desde que não haja bloqueio devido à indisponibilidade de espectro, é gerada uma matriz $SM_{m,k}$ contendo conjuntos de *slots* de frequência associados às rotas e aos níveis de modulação.

Subsequentemente, na fase de otimização, a matriz SM , as matrizes SCT , XCI , o vetor ASE e o vetor de potência são usados para formular as funções objetivo a serem otimizadas. Como resultado, as soluções ótimas formam a FP. Uma solução na FP resultante do processo de otimização é selecionada utilizando o método da menor distância euclidiana à solução ideal. A melhor solução selecionada é então usada para configurar a potência do canal e estabelecer a conexão, desde que a QoT alcançada seja superior à QoT mínima exigida e os outros canais possam suportar a inserção de um novo canal.

4.5 Conclusão

Neste capítulo, foi apresentado o arcabouço metodológico desenvolvido para a Tese de Doutorado, abrangendo desde a descrição do modelo de rede até as técnicas propostas para a alocação de recursos em EONs. As metodologias propostas, baseadas em heurísticas e em otimização multiobjetivo, foram cuidadosamente detalhadas, ressaltando suas premissas, etapas e contribuições para a mitigação das penalidades da camada física e a redução da probabilidade de bloqueio. O uso de simulações computacionais foi enfatizado como ferramenta essencial para a validação das estratégias desenvolvidas, permitindo a análise da eficácia e eficiência das soluções em cenários variados. Ao consolidar os fundamentos técnicos e experimentais que sustentam esta pesquisa, o capítulo estabelece uma base sólida para a discussão dos resultados e a avaliação comparativa com as abordagens tradicionais, apresentadas nos capítulos subsequentes.

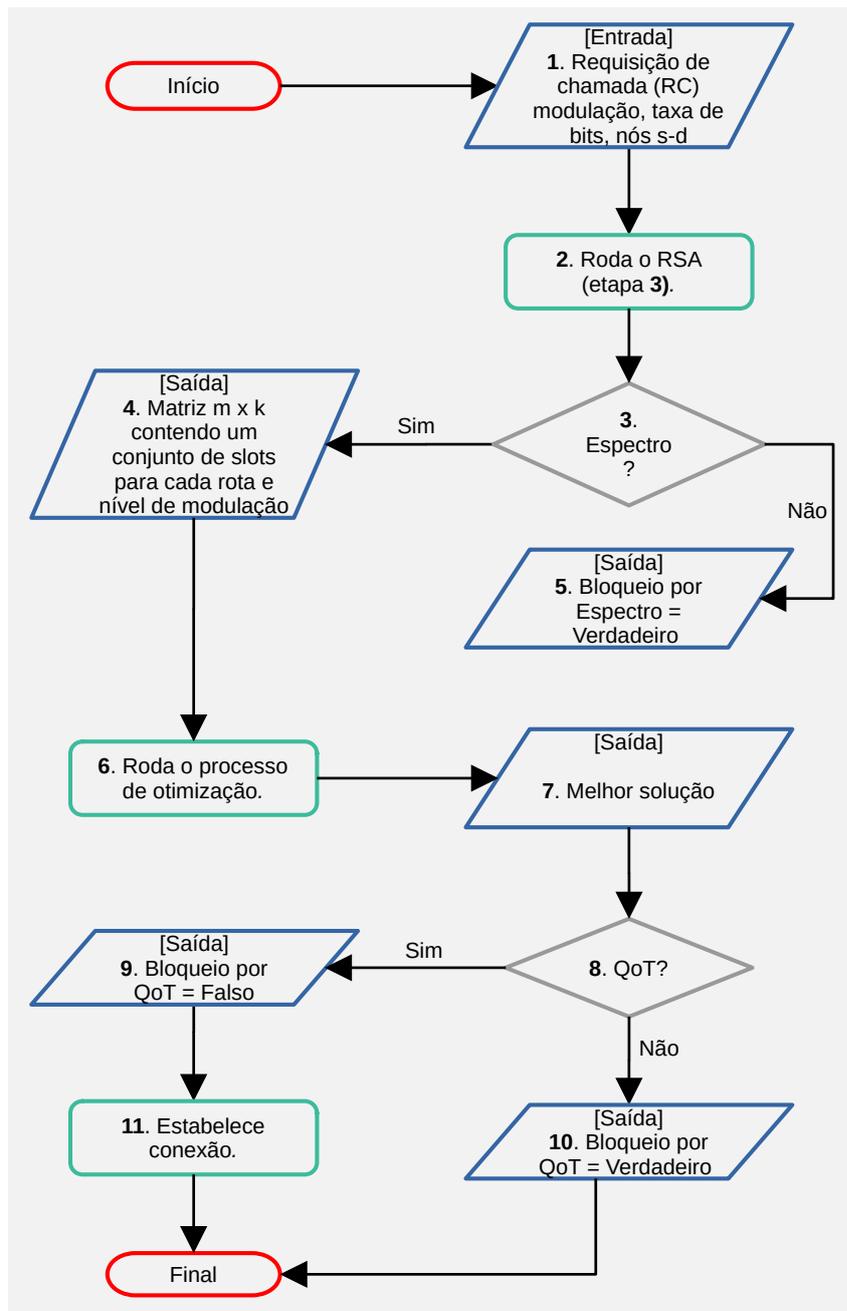


Figura 20 – Etapa de Controle de Admissão de Chamadas (CAC).

Capítulo

5

Resultados

Neste capítulo, apresentamos os resultados obtidos a partir da aplicação das metodologias desenvolvidas para a alocação de recursos em redes ópticas elásticas, conforme descrito nos capítulos anteriores. As análises foram realizadas utilizando duas topologias de rede distintas: NSFNET, com enlaces mais longos, e DT14, caracterizada por enlaces mais curtos. Essas topologias permitiram avaliar a eficácia das heurísticas propostas em diferentes cenários, considerando variações na carga da rede e nas condições físicas dos enlaces.

O foco principal deste estudo é investigar o impacto das técnicas propostas na redução da PB, no aprimoramento do uso do espectro e na mitigação das penalidades impostas pela camada física. Além disso, os resultados incluem uma análise comparativa com metodologias previamente estabelecidas na literatura, destacando os avanços obtidos pelas abordagens propostas.

A avaliação de desempenho foi realizada com base na métrica da PB, variando parâmetros como o número de rotas candidatas (k) e a carga de rede, que foi ajustada incrementalmente entre 100 e 200 Erlangs. As simulações também analisaram o tempo de execução das heurísticas, considerando a complexidade computacional associada ao aumento do número de rotas candidatas.

Os resultados apresentados demonstram a superioridade das heurísticas propostas, especialmente a MO-PMRSA, em relação às abordagens comparativas. Além disso, destacamos os benefícios do ajuste dinâmico otimizado de potência e espectro, que permite uma alocação de recursos mais eficiente e robusta, mesmo em cenários desafiadores, como aqueles caracterizados por enlaces longos e alta densidade de tráfego. Nos tópicos subsequentes, discutiremos detalhadamente os principais achados deste estudo, reforçando a relevância das contribuições para o avanço no estado da arte em redes ópticas elásticas.

5.1 Alocação de recursos através da heurística P-MSCL

Para a análise numérica, como já mencionado no capítulo anterior, foram usadas duas topologias de rede distintas: NSFNET (Fig. 12) e DT14 (Fig. 13). A topologia NSFNET é

caracterizada por enlaces mais longos, enquanto a topologia DT14 apresenta enlaces mais curtos. O objetivo deste estudo é avaliar a eficácia da heurística proposta na melhoria do uso do espectro e da densidade espectral de potência (PSD) específica de cada conexão, reduzindo as penalidades da camada física e minimizando a perda de capacidade de alocação. Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos a partir da média de quatro simulações, com a carga de rede variando incrementalmente de 100 a 200 Erlangs em passos de 20 Erlangs.

A avaliação de desempenho foi baseada na PB, definida como a razão entre as solicitações bloqueadas e o total de solicitações, sendo os resultados apresentados em função da carga de rede oferecida. Adicionalmente, variou-se o número de rotas candidatas (k) para avaliar seu impacto na PB.

A heurística chamada P-MSCL foi desenvolvida e implementada para enfrentar os desafios associados à alocação de espectro e potência em redes ópticas. Para fins de comparação, escolhemos as metodologias propostas por Vale e Almeida (2019), Vale, Almeida e Assis (2022), Santos, Almeida-Junior e Araújo (2021), além de duas abordagens bastante utilizadas na literatura, JE -*Just Enough* e MP -*Maximum Power*, usando a PB como a principal métrica para avaliar o desempenho.

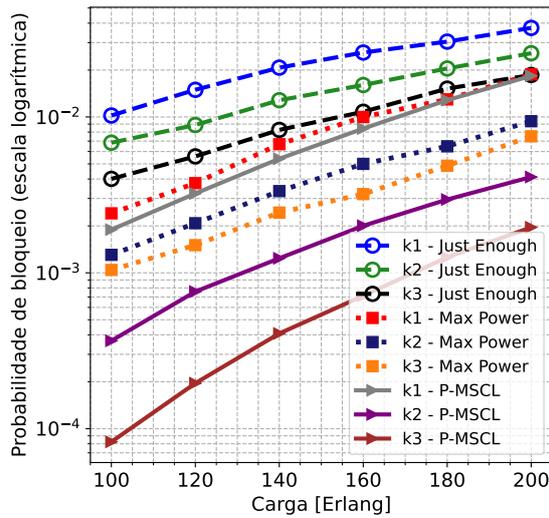
Na Fig. 21a, os gráficos demonstram que, na rede NSFNET (Fig. 12), a técnica MP supera consistentemente a estratégia JE para $k = 2$ e $k = 3$. Essa superioridade pode ser atribuída às penalidades severas na camada física devido aos enlaces longos, que restringem a entrada de novos canais com baixo OSNR.

Essa observação é justificada pelo impacto da atenuação e dos efeitos degradantes, como o ruído ASE e o XCI, na qualidade do sinal em enlaces mais longos. Ajustar a potência para um nível mais elevado aumenta efetivamente o OSNR, reduzindo essas penalidades. Consequentemente, a estratégia MP oferece uma leve vantagem de desempenho em comparação à estratégia JE, onde a potência pode precisar ser otimizada para facilitar a adição de novos canais devido ao excesso de potência.

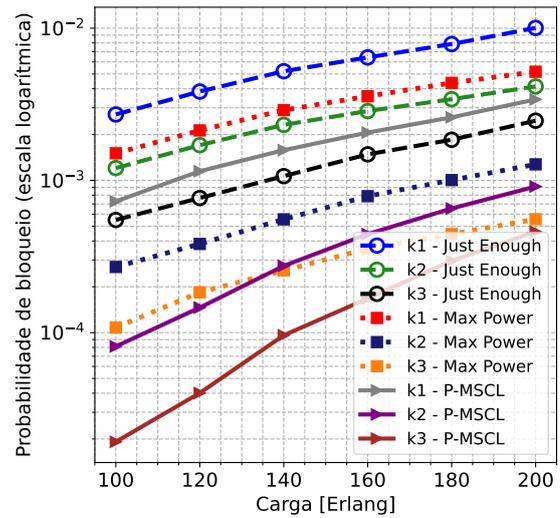
A técnica MP demonstrou superioridade em relação às demais na rede DT14 (Fig. 13), caracterizada por enlaces mais curtos. Enlaces mais curtos diminuem a atenuação e as penalidades na camada física, permitindo à estratégia MP maximizar o OSNR, alocar novos canais e minimizar o uso do espectro, conforme ilustrado na Fig. 21b.

Os resultados nas Fig. 21a e Fig. 21b confirmam que o algoritmo P-MSCL, com seu ajuste dinâmico de margens de OSNR, supera a estratégia MP na rede NSFNET. Ao evitar canais com baixo OSNR e prevenir a degradação do OSNR devido ao excesso de potência, o P-MSCL permite um uso mais eficiente do espectro e da potência, resultando em uma melhor gestão das penalidades na camada física. Com sua adaptabilidade em tempo real às condições de tráfego em evolução, o P-MSCL emerge como uma solução eficaz para a alocação de recursos em EONs.

A Fig. 22a, Fig. 22b, Fig. 23a e Fig. 23b demonstram a superioridade da heurística P-MSCL em comparação com duas estratégias alternativas. A Atribuição Adaptativa de Potência (APA), proposta em Vale e Almeida (2019), integra a alocação de potência com a técnica



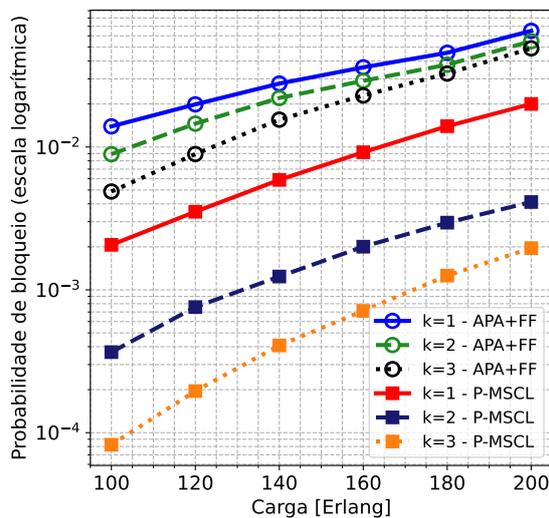
(a) Comparação das técnicas de alocação de potência *Just Enough*, *Maximum Power* e P-MSCL na topologia da rede NSFNET.



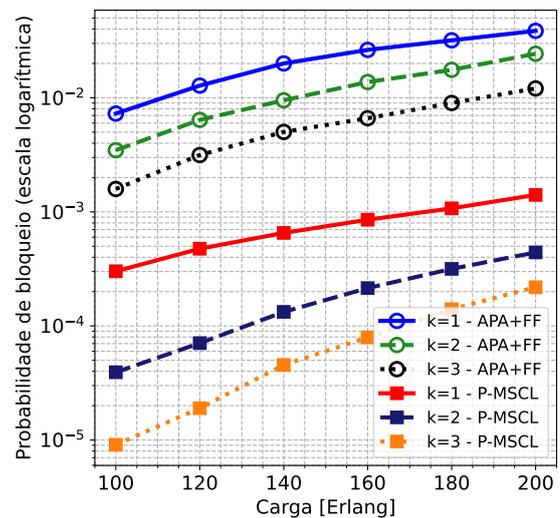
(b) Comparação das técnicas de alocação de potência *Just Enough*, *Maximum Power* e P-MSCL na topologia da rede DT14.

Figura 21 – Comparação das técnicas de alocação de potência *Just Enough*, *Maximum Power* e P-MSCL na topologia de rede NSFNET e DT14.

de alocação de espectro *First-Fit*, onde a potência dos canais é atribuída com uma margem determinada pela carga da rede. A segunda estratégia, MSCL-C (MSCL Combinado), proposta em Santos, Almeida-Junior e Araújo (2021), não considera penalidades da camada física e aceita conexões com base apenas em critérios de distância, utilizando um nível de modulação fixo.



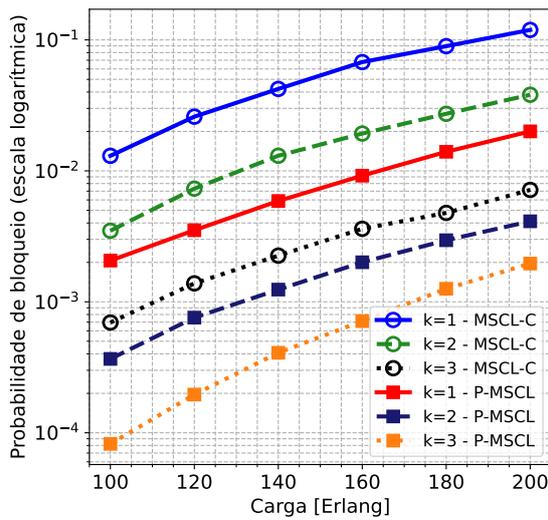
(a) Comparação das estratégias P-MSCL e APA na topologia NSFNET.



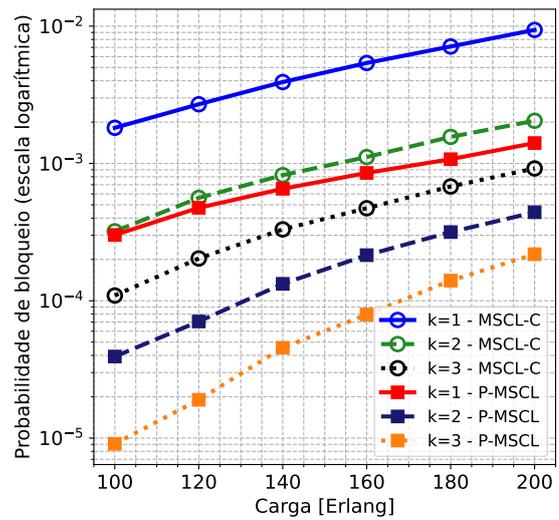
(b) Comparação das estratégias P-MSCL e APA na topologia DT14.

Figura 22 – Comparação das técnicas P-MSCL e APA nas topologias de rede NSFNET e DT14.

A análise comparativa entre as abordagens P-MSCL, JE e MP fornece evidências significativas da efetividade da estratégia P-MSCL sob distintas demandas e configurações de rede. Essa avaliação indica que a heurística P-MSCL supera as técnicas MP e JE. A principal razão



(a) Comparação das estratégias P-MSCL e MSCL-C na topologia NSFNET.



(b) Comparação das estratégias P-MSCL e MSCL-C na topologia DT14.

Figura 23 – Comparação das técnicas P-MSCL e MSCL-C nas topologias de rede NSFNET e DT14..

para seu desempenho superior é o ajuste dinâmico de potência e espectro, aliado à sua habilidade de minimizar as PLIs. Esse ajuste é essencial em cenários de enlaces longos, onde as PLIs são significativas. A heurística P-MSCL evita os problemas de baixo OSNR frequentes na técnica JE e a degradação causada pelo excesso de potência, comum na técnica MP.

Além disso, a heurística P-MSCL, que atribui valores intermediários de potência, destaca-se por proporcionar um equilíbrio que permite novas conexões sem comprometer a QoT. Esse equilíbrio é essencial em topologias com enlaces longos, onde o controle das PLIs é fundamental para o uso eficiente do espectro. Isso nos fornece uma direção clara para abordar o problema.

Os resultados das simulações indicam uma redução substancial na PB ao utilizar a heurística P-MSCL em comparação com as outras abordagens. Essa melhoria é atribuída à operação sinérgica dos algoritmos de Atribuição de Potência (PA) e MSCL-O. Isso ocorre devido à variação no número de *slots* necessários para uma conexão com determinada taxa de bits, de acordo com o nível de modulação mais eficiente aceito, relacionado à QoT de cada rota. Assim, ao testar rotas e seus respectivos espectros em uma ordem que prioriza a mínima perda de capacidade, o algoritmo PA aumenta a probabilidade de atingir uma margem de QoT satisfatória. Ademais, o aumento no número de rotas candidatas ($k \geq 1$) eleva a probabilidade de encontrar espectro disponível, reduzindo a PB global.

A superioridade observada da heurística P-MSCL na topologia DT14 pode ser atribuída ao impacto reduzido de não linearidades, decorrente de potências de lançamento da luz na fibra óptica mais baixas nos canais devido aos enlaces mais curtos. Esse cenário permite alcançar níveis de modulação mais eficientes, reduzindo o número de *slots* necessários e, conseqüentemente, a perda de capacidade de alocação. Essa combinação de fatores minimiza as penalidades da camada física e melhora o desempenho geral da rede, permitindo uma melhor utilização dos

recursos espectrais disponíveis e aprimorando a QoT.

Como resultado, a heurística P-MSCL demonstra maior eficácia na rede DT14, evidenciando sua capacidade de adaptação a condições variadas de rede e de otimizar a alocação de espectro e potência. Essa capacidade é crucial para maximizar a capacidade da rede e minimizar a PB, tanto em redes com enlaces mais curtos, onde menores potências de lançamento e maiores OSNR podem ser aproveitados para transmissões mais eficientes, quanto em redes com enlaces mais longos, onde os efeitos não lineares tornam a alocação de potência e espectro mais desafiadora.

Essa análise abrangente destaca a eficácia da heurística P-MSCL na melhoria da alocação de recursos em redes ópticas, oferecendo um avanço significativo em relação aos métodos existentes. Os ganhos de desempenho observados reforçam a importância de considerar tanto as penalidades da camada física quanto a disponibilidade espectral no projeto de algoritmos de alocação de potência e espectro.

Por fim, a Fig. 24 apresenta o tempo de execução correspondente às curvas da Fig. 22a para a heurística P-MSCL. Observa-se que, à medida que k aumenta, a complexidade também cresce, resultando em tempos de execução mais longos. Além disso, nota-se que a curva de tempo de simulação diminui à medida que a carga aumenta. Isso ocorre porque, em sistemas onde o tráfego de comunicação é modelado como um processo de Poisson e a duração das chamadas segue uma distribuição exponencial, um aumento na carga traduz-se em uma maior taxa de chegada de chamadas (λ), o que, por sua vez, reduz o tempo de simulação.

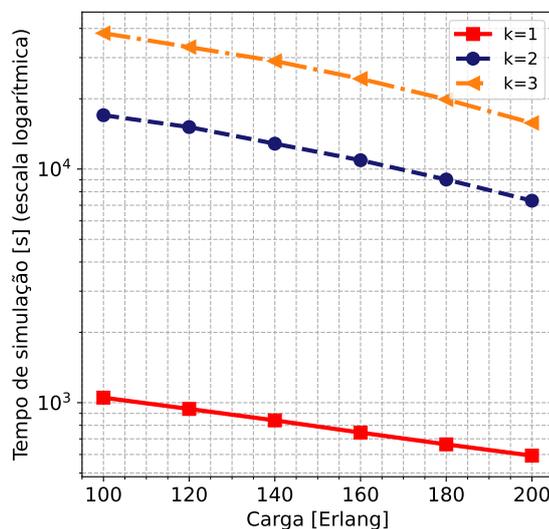


Figura 24 – Tempo de simulação da P-MSCL em função da carga de rede para a topologia NSFNET.

5.2 Alocação de recursos através da otimização multiobjetivo

Os resultados aqui demonstrados representam um avanço significativo em comparação com o estudo de Silva et al. (2024) demonstrado na seção anterior, oferecendo uma compreensão

mais profunda e abrangente do problema de alocação de recursos em redes ópticas elásticas. A comparação dos resultados com os do artigo anterior valida as hipóteses iniciais e destaca melhorias significativas trazidas pela nova abordagem.

Silva et al. (2024) propuseram um estudo que focava na implementação de um algoritmo heurístico para alocação de recursos em uma rede óptica elástica transparente. Este algoritmo demonstrou eficiência significativa na redução da PB, um dos principais desafios em redes ópticas. Os resultados indicaram melhorias notáveis no uso do espectro e na OSNR. No entanto, algumas limitações foram identificadas, especialmente em cenários de alta densidade de tráfego.

Uma das principais limitações observadas foi o método utilizado para calcular a margem de OSNR, definida como uma porcentagem da diferença entre o OSNR mínimo requerido e o OSNR máximo alcançado na rota naquele momento. Embora funcional, essa abordagem não oferece uma PSD otimizada, resultando em uma utilização subótima dos recursos da rede. Em cenários de alto tráfego, essa falta de otimização na PSD limita o desempenho geral do sistema, impedindo uma alocação mais eficiente da capacidade de transmissão, o que poderia reduzir ainda mais a PB e melhorar a utilização dos recursos espectrais.

A Fig. 25 compara a heurística P-MSCL com a nova proposta MO-PMRSA em um cenário com enlaces mais longos, especificamente na rede NSFNET. Os resultados indicam que o desempenho da técnica MO-PMRSA é significativamente superior devido ao ajuste dinâmico otimizado de potência e espectro, além de sua capacidade de reduzir as PLIs.

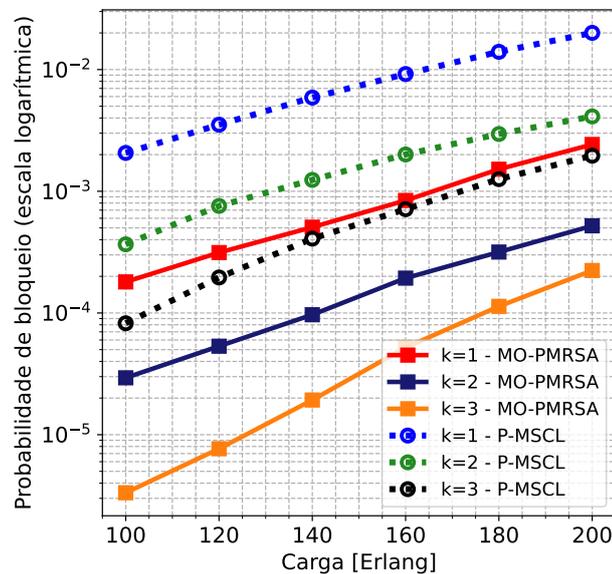


Figura 25 – Resultados do MO-PMRSA versus P-MSCL na topologia NSFNET.

Na rede DT14, os enlaces são mais curtos (Fig. 26). Enlaces mais curtos resultam em menor atenuação e redução de outros efeitos degradantes, o que minimiza as PLIs. Isso, por sua vez, permite o uso de esquemas de modulação mais avançados, que fazem uso mais eficiente do espectro disponível e possibilitam melhores valores de OSNR. Conseqüentemente, a eficiência espectral da rede é aumentada, melhorando a capacidade de transmissão enquanto se alcançam melhores valores de OSNR, aumentando assim a robustez da rede.

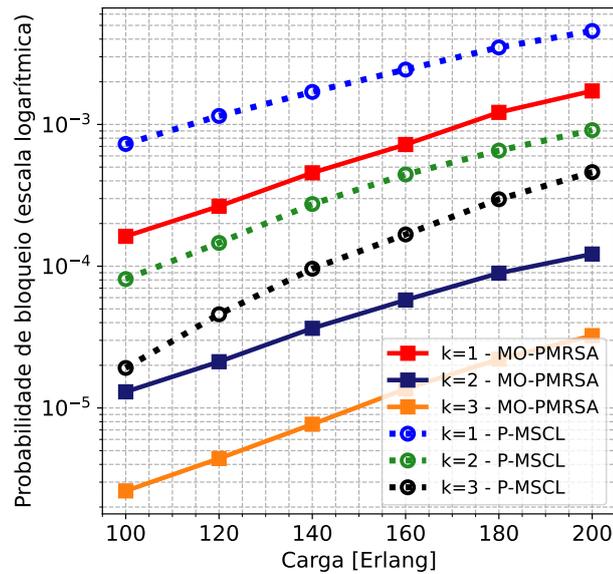


Figura 26 – Resultados do MO-PMRSA versus P-MSCL na topologia DT14.

Pode-se observar na Fig. 25 e na Fig. 26 que a principal vantagem do MO-PMRSA reside na sua capacidade de controlar efetivamente as PLIs, que se tornam particularmente críticas em cenários de enlaces longos. O ajuste dinâmico de potência permite uma alocação de recursos mais precisa, evitando subutilização e saturação espectral, melhorando, assim, a eficiência da rede. Ao otimizar potência e espectro de forma conjunta, o MO-PMRSA maximiza a OSNR enquanto minimiza as PLIs, garantindo QoS.

Além de otimizar a utilização do espectro, a técnica MO-PMRSA assegura a integridade do sinal ao mitigar os efeitos adversos das degradações físicas, que são especialmente desafiadores em redes com enlaces longos. Como resultado, o algoritmo melhora significativamente o desempenho da rede, garantindo uma alocação de recursos mais eficiente e robusta.

A técnica MO-PMRSA destaca-se como a de melhor desempenho geral. Sua abordagem de ajuste dinâmico otimizado de potência e espectro, combinada com o foco na redução das PLIs, permite um uso mais eficiente dos recursos disponíveis, assegurando maior capacidade para acomodar novos canais, mesmo em cenários desafiadores com enlaces longos.

A Fig. 27 representa uma Fronteira de Pareto (FP) em um dado instante, quando uma solicitação de conexão chega à rede representada pela topologia NSFNET com uma carga de 180 Erlang. Como mostrado na Fig. 27, a distribuição de pontos ao longo da FP evidencia um claro *trade-off* entre o uso do espectro e a OSNR. À medida que o uso do espectro diminui, a OSNR também reduz, pois a SCI e a XCI são inversamente proporcionais à largura de banda do canal. Adicionalmente, a OSNR é inversamente proporcional a essas interferências.

Este trabalho propõe um método de seleção de soluções conhecido como "Solução Mais Próxima do Ideal", aplicado à FP. Para demonstrar a eficácia dessa abordagem, experimentos adicionais foram realizados, selecionando soluções nos extremos da FP, priorizando individualmente cada objetivo.

Na Fig. 28b, em redes com enlaces curtos, como DT14, os resultados das soluções

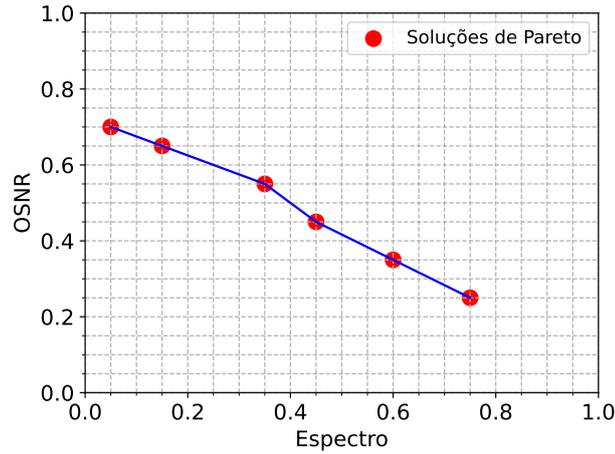
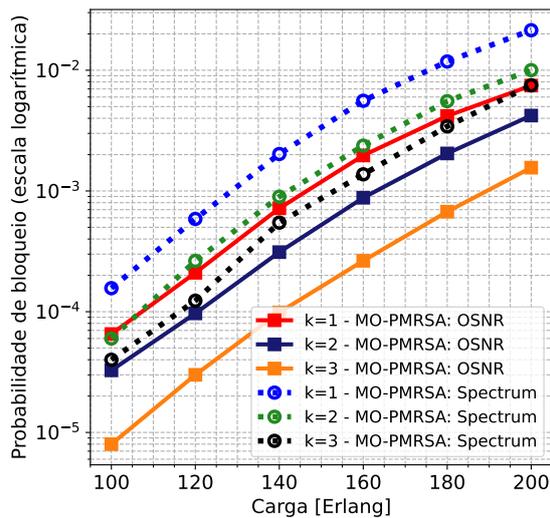
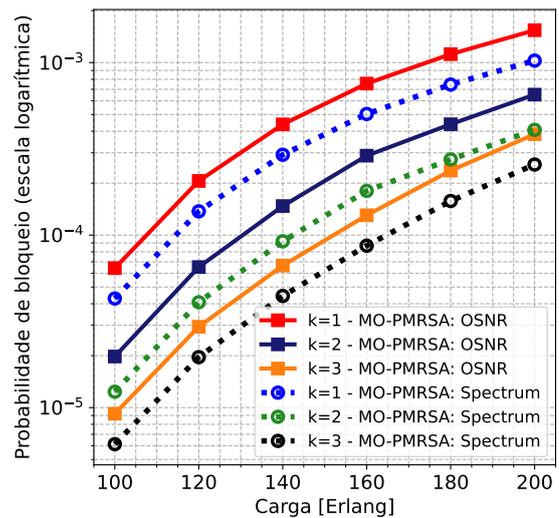


Figura 27 – Fronteira de Pareto.

extremas na FP tendem a ser semelhantes devido à redução das PLIs. Entretanto, a solução "Mais Próxima do Ideal" apresenta um melhor equilíbrio e desempenho geral.



(a) Resultados do MO-PMRSA com soluções extremas na topologia NSFNET.



(b) Resultados do MO-PMRSA com soluções extremas na topologia DT14.

Figura 28 – Resultados do MO-PMRSA com soluções extremas.

A respeito da complexidade computacional, a Fig. 29 ilustra o tempo de execução das curvas mostradas na Fig. 25 para a estratégia MO-PMRSA. Nota-se um incremento no tempo de simulação em relação à heurística P-MSCL, indicando um aumento na complexidade computacional. Esse aumento é esperado devido à natureza da otimização multiobjetivo empregada pela estratégia MO-PMRSA, que demanda maior esforço computacional para explorar e avaliar soluções no espaço de Pareto. Apesar disso, o incremento de complexidade é compensado pelos benefícios obtidos em termos de alocação eficiente de recursos e melhoria nos objetivos considerados, tornando a abordagem vantajosa em cenários onde a qualidade das soluções é prioritária.

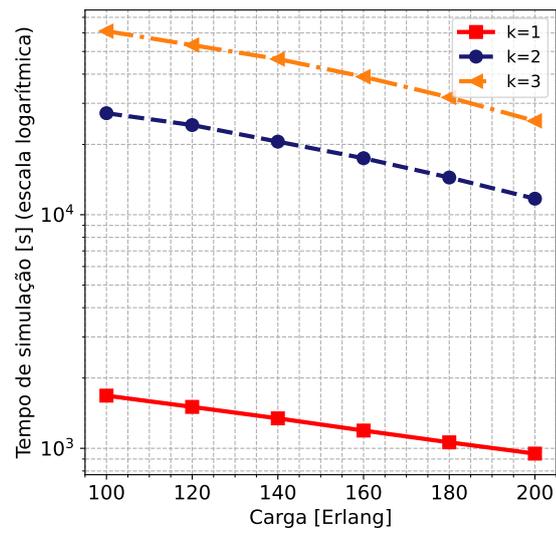


Figura 29 – Tempo de simulação da MO-PMRSA em função da carga de rede para a topologia NSFNET.

Capítulo

6

Conclusão

A EON apresentada por Jinno et al. (2009) introduziu avanços significativos no cenário das comunicações ópticas, permitindo uma utilização mais eficiente do espectro óptico. Contudo, essa flexibilidade trouxe também maior complexidade ao gerenciamento da rede, devido ao aumento no número de parâmetros envolvidos, especialmente quando comparadas às amplamente difundidas redes WDM. A elasticidade, frequentemente associada à adaptação dinâmica das larguras de banda dos canais, viabiliza a utilização eficiente do espectro e promete atender às crescentes e diversificadas demandas com menor ociosidade de recursos.

A introdução do modelo GN por Poggiolini (2012) revolucionou a análise de sistemas ópticos ao tratar os efeitos não lineares, como SCI, XCI e FWN, como ruído gaussiano aditivo. Essa abordagem analítica simplificada tornou possível otimizar a potência de lançamento da luz na fibra óptica para equilibrar eficiência de transmissão e efeitos não lineares, reduzindo custos computacionais e acelerando o planejamento de redes ópticas de alta capacidade. Trabalhos posteriores, como Poggiolini et al. (2014) expandiram o modelo GN para sistemas coerentes com modulações avançadas (como QPSK e 16-QAM), cenários de espectro não uniforme e EONs, onde ele demonstrou grande utilidade ao prever o impacto da potência de lançamento em métricas como QoT e probabilidade de bloqueio. Com sua aplicabilidade em enlaces longos e tráfego dinâmico, o modelo GN tornou-se uma ferramenta essencial tanto para a pesquisa acadêmica quanto para a engenharia de redes.

Nesse contexto, as técnicas de gerenciamento de recursos têm se consolidado como um dos principais focos de pesquisa em comunicações ópticas, especialmente no que diz respeito aos problemas de roteamento, alocação de espectro e atribuição de potência, conhecidos como PRMLSA.

A presente Tese de Doutorado inicialmente introduziu os conceitos fundamentais relacionados às EONs, detalhando os principais dispositivos que as compõem, juntamente com uma descrição de seus fundamentos e algoritmos clássicos de roteamento e alocação de espectro. Além disso, foi conduzida uma extensa revisão da literatura. Um ambiente computacional também foi desenvolvido para simular vários cenários de EONs transparentes com tráfego dinâmico.

Em qualquer processo de transmissão, os sinais podem ser prejudicados tanto pelo meio físico quanto pelas interações entre os próprios sinais, como o ruído ASE e as interferências não lineares. Para descrever esses efeitos, foi empregado o modelo GN. Esse modelo revelou uma relação direta entre a potência de lançamento e as penalidades nos canais durante a transmissão: potências demasiadamente altas amplificam as não linearidades e diminuem a eficiência, enquanto potências muito baixas não garantem a qualidade essencial entre o transmissor e o receptor, comprometendo a transmissão.

Métricas como QoT e probabilidade de bloqueio foram examinadas nesta pesquisa e são diretamente afetadas pela potência atribuída aos sinais. A adição da atribuição de potência como mais um grau de liberdade no planejamento de EONs, principalmente com tráfego dinâmico e um alto número de solicitações, tem se revelado um desafio importante e contemporâneo, apresentando ainda lacunas substanciais na literatura (VALE; ALMEIDA, 2019; VALE; ALMEIDA; ASSIS, 2022; SILVA et al., 2024).

Neste trabalho, apresentamos uma contribuição abrangente para a alocação eficiente de recursos em EONs, combinando abordagens heurísticas e técnicas avançadas de otimização multiobjetivo. As estratégias propostas foram concebidas para minimizar o uso do espectro e maximizar a QoT, considerando as penalidades da camada física, como interferências SCI, XCI e ruído ASE, enquanto se adaptam a diferentes condições de rede e demandas de tráfego.

A heurística P-MSCL demonstrou ser uma solução robusta ao integrar estratégias de atribuição de potência dinâmica com a técnica MSCL-O para alocação de espectro. Essa abordagem mostrou-se eficaz na redução de fragmentação espectral, redução de perdas de capacidade de alocação espectral e melhoria da continuidade dos *slots* de espectro. Os resultados das simulações, realizadas nas topologias NSFNET e DT14, destacaram uma redução substancial na PB em comparação com métodos convencionais, como APA, proposto por Vale e Almeida (2019) e MSCL-C proposto por Santos, Almeida-Junior e Araújo (2021). Em particular, a topologia DT14, com enlaces mais curtos, se beneficiou da adaptação da P-MSCL às condições específicas da rede, maximizando a OSNR e aumentando a eficiência espectral.

Complementarmente, a técnica MO-PMRSA, baseada em otimização multiobjetivo, mostrou-se superior em cenários mais complexos, como aqueles caracterizados por enlaces de longa distância e maior severidade de penalidades físicas. Integrando a heurística MSCL com uma estratégia de ajuste dinâmico de potência, o MO-PMRSA foi capaz de balancear múltiplos critérios de desempenho, oferecendo soluções otimizadas que atendem simultaneamente aos requisitos de espectro e QoT. A capacidade de minimizar interferências não lineares e evitar problemas de degradação relacionados ao excesso de potência fez do MO-PMRSA uma abordagem altamente eficaz para gerenciar redes com altos níveis de complexidade.

A análise comparativa entre as técnicas revelou que, enquanto a P-MSCL oferece um excelente equilíbrio para redes de médio alcance, o MO-PMRSA destaca-se como uma solução mais adequada para redes de longa distância, devido à sua capacidade de ajustar dinamicamente os parâmetros de rede e mitigar penalidades da camada física. Ambas as estratégias demonstraram

avanços significativos na melhoria do desempenho das EONs, reduzindo a PB e promovendo operações de rede mais eficientes e confiáveis.

Os resultados apresentados reafirmam a importância de integrar heurísticas e meta-heurísticas para abordar os desafios da alocação de recursos em EONs. A adoção de técnicas de otimização multiobjetivo, como o MO-PMRSA, e de abordagens baseadas em heurísticas, como a P-MSCL, oferece uma base sólida para o desenvolvimento de soluções futuras, promovendo maior eficiência, adaptabilidade e resiliência em infraestruturas de comunicação óptica cada vez mais complexas. Esses avanços ressaltam o papel crítico das estratégias inovadoras no gerenciamento de recursos em ambientes dinâmicos e desafiadores.

6.1 Considerações finais

Esta Tese de Doutorado explorou de forma abrangente as técnicas de alocação de recursos em EONs, com ênfase na redução da probabilidade de bloqueio, no aprimoramento da eficiência espectral e na mitigação das penalidades da camada física. Por meio de heurísticas propostas, investigou-se o impacto dessas abordagens em diferentes cenários, utilizando as topologias NSFNET e DT14, que representam características contrastantes de rede, como enlaces longos e curtos, respectivamente.

Os resultados obtidos destacaram o potencial das soluções desenvolvidas para atender às crescentes demandas por largura de banda em redes ópticas. As principais contribuições desta pesquisa incluem:

- **Melhoria da eficiência espectral:** As heurísticas propostas demonstraram uma utilização mais eficiente do espectro, reduzindo lacunas e fragmentações ao longo dos enlaces.
- **Redução significativa da PB:** Em comparação com metodologias previamente estabelecidas, as soluções apresentaram reduções expressivas na PB, mesmo sob condições de alta carga de tráfego.
- **Integração de múltiplos aspectos:** A abordagem considerou simultaneamente fatores como o roteamento, a alocação de espectro e os efeitos da camada física, oferecendo soluções robustas para cenários dinâmicos.

Adicionalmente, a análise comparativa evidenciou que as metodologias propostas não apenas superam soluções existentes, mas também oferecem uma base para a evolução de redes ópticas de alta capacidade.

6.1.1 Limitações do trabalho

Embora esta pesquisa tenha alcançado resultados relevantes, algumas limitações merecem destaque:

- Complexidade computacional: O MO-PMRSA apresentaram alta complexidade, tornando desafiadora sua aplicação em redes de larga escala.
- Cenários específicos: As simulações foram realizadas com topologias específicas, necessitando de simulações em outras várias topologias reais para a generalização para outras configurações de rede.
- Impacto da dinâmica do tráfego: Apesar de considerar cenários dinâmicos, o estudo poderia ser ampliado para analisar situações mais complexas, como redes heterogêneas e com variações abruptas no tráfego.

6.1.2 Trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos, algumas direções para trabalhos futuros incluem:

- Aprendizado de máquina: Explorar algoritmos de aprendizado de máquina, como redes neurais profundas e aprendizado por reforço, para desenvolver soluções adaptativas que atendam às necessidades dinâmicas das EONs.
- Avaliação em cenários reais: Ampliar o estudo para incluir topologias reais de rede e padrões de tráfego mais complexos, garantindo maior aplicabilidade dos resultados.
- Estudo de custos energéticos: Considerar o impacto do consumo de energia das soluções, propondo métricas que equilibram desempenho e sustentabilidade.
- Avaliar as estratégias considerando todas as opções secundárias de espectro disponíveis em cada rota oferecidas pelo algoritmo MSCL, e não apenas a opção que resulta na menor perda de capacidade de alocação, como foi feito nesta tese.

Ao seguir essas direções, espera-se contribuir ainda mais para a evolução das EONs, garantindo que atendam às crescentes demandas por capacidade e eficiência em redes ópticas de próxima geração.

Referências

AGRAWAL, A.; BHATIA, V.; PRAKASH, S. Spectrum efficient distance-adaptive paths for fixed and fixed-alternate routing in elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 40, p. 36–45, jan 2018. ISSN 10685200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1068520017302869>>. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 64.

AGRAWAL, G. P. *Nonlinear Fiber Optics*. NY, United States of America: Elsevier, 2019. ISBN 978-0-12-817042-7. Citado na página 35.

AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 5. ed. New Jersey: Wiley, 2021. ISBN 9781119737384. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 35.

ALASKAR, R. W.; AHMAD, I.; ALYATAMA, A. Offline routing and spectrum allocation algorithms for elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 21, p. 79–92, jul 2016. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427716000072>>. Citado na página 57.

ALMEIDA, R. C. et al. Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks. *Electronics Letters*, v. 49, p. 359–361, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 48, 49, 87 e 92.

ANDREWS, L. C. *Special Functions of Mathematics for Engineers*. 2. ed. Oxford, UK: SPIE, 1997. ISBN 9780819483713. Citado na página 42.

ARAÚJO, C. M. et al. On solving the capacitated routing and spectrum allocation problem for flexgrid optical networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 181, p. 107–125, nov 2020. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128620311907>>. Citado na página 58.

ASSIS, K. D. R. et al. Virtualization of elastic optical networks and regenerators with traffic grooming. *Journal of Optical Communications and Networking*, The Optical Society, v. 12, n. 12, p. 428–441, nov 2020. ISSN 1943-0639. Disponível em: <<https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-12-12-428>>. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.

BRASILEIRO, Í.; VALDEMIR, J.; SOARES, A. Regenerator assignment with circuit invigorating. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 34, p. 58–66, nov 2019. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427718301644>>. Citado na página 72.

CALDERON, F. I. et al. BER-adaptive RMLSA algorithm for wide-area flexible optical networks. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 128018–128031, 2020. ISSN 21693536. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9139484>>. Citado 4 vezes nas páginas 19, 42, 64 e 80.

CARENA, A. et al. Modeling of the impact of nonlinear propagation effects in uncompensated optical coherent transmission links. *Journal of Lightwave Technology*, v. 30, p. 1524–1539, 5

2012. ISSN 0733-8724. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6158564/>>. Citado 3 vezes nas páginas 43, 54 e 55.

CAVALCANTE, M. A. et al. An auxiliary-graph-based methodology for regenerator assignment problem optimization in translucent elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 53, p. 102–108, dec 2019. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520019301853>>. Citado na página 73.

CHATTERJEE, B. *Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design, Control, and Management*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020. ISBN 9781138611719. Citado 18 vezes nas páginas 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 43, 44, 45, 46, 47 e 48.

CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 17, n. 3, p. 1776–1800, 2015. ISSN 1553-877X. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7105364>>. Citado 4 vezes nas páginas 19, 25, 26 e 27.

CHAVES, D. A. R. et al. Novel strategies for sparse regenerator placement in translucent optical networks. *Photonic Network Communications*, v. 24, p. 237–251, dec 2012. ISSN 1387-974X. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11107-012-0384-9>>. Citado na página 72.

CHAVES, D. A. R. et al. Heuristic algorithms for regenerator assignment in dynamic translucent elastic optical networks. In: *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015. v. 2015-August, p. 1–4. ISBN 978-1-4673-7880-2. ISSN 21627339. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7193555/>>. Citado 3 vezes nas páginas 70, 72 e 74.

CHEN, X. et al. Deepprmsa: A deep reinforcement learning framework for routing, modulation and spectrum assignment in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 37, n. 16, p. 4155–4163, aug 2019. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8738827>>. Citado na página 64.

CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 29, n. 9, p. 1354–1366, may 2011. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5727897/>>. Citado na página 19.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. V. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. *Genetic Algorithms and Evolutionary Computation*, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 52.

CORMEN, T. H. et al. *Introduction to Algorithms, fourth edition*. 4. ed. Massachusetts, USA: MIT Press, 2022. ISBN 9780262367509. Citado na página 44.

CORREIA, B. et al. Power control strategies and network performance assessment for c+l+s multiband optical transport. *Journal of Optical Communications and Networking*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 13, p. 147–157, jul 2021. ISSN 1943-0620. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-13-7-147>>. Citado na página 82.

- COSTA, L. R.; RAMOS, G. N.; DRUMMOND, A. C. Leveraging adaptive modulation with multi-hop routing in elastic optical networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 105, p. 124–137, aug 2016. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128616301785>>. Citado na página 63.
- DALLAGLIO, M. et al. Routing, spectrum, and transponder assignment in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 33, n. 22, p. 4648–4658, nov 2015. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7254110>>. Citado na página 60.
- DEB, K. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.
- DEB, K. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. [S.l.]: Wiley, 2010. Citado na página 100.
- DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- DINARTE, H. A. et al. Routing and spectrum assignment: A metaheuristic for hybrid ordering selection in elastic optical networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 197, p. 108–117, oct 2021. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128621003054>>. Citado na página 61.
- ESSIAMBRE, R.-J. et al. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 28, p. 662–701, 2 2010. ISSN 0733-8724. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5420239/>>. Citado na página 37.
- FALLAHPOUR, A. et al. Energy efficient routing and spectrum assignment with regenerator placement in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, n. 10, p. 2019–2027, may 2014. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6804642>>. Citado na página 76.
- FUENTE, D. de la; VEGA-RODRÍGUEZ, M. A.; PÉREZ, C. J. Automatic selection of a single solution from the pareto front to identify key players in social networks. *Knowledge-Based Systems*, Elsevier, v. 160, p. 228–236, nov 2018. ISSN 09507051. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950705118303691>>. Citado na página 100.
- GERSTEL, O. et al. Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 50, n. 2, p. s12–s20, feb 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6146481>>. Citado na página 91.
- GHASRIZADEH, M. S.; ARPANAEI, F.; BEYRANVAND, H. Qot-aware tree selection, routing, modulation, and spectrum assignment for filterless eons over the c+l-band. *Journal of Optical Communications and Networking*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 16, p. 127–141, 2 2024. ISSN 1943-0620. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-16-2-127>>. Citado na página 84.
- GONZALEZ-MONTORO, N.; FINOCHIETTO, J. M.; BIANCO, A. Resource-aware provisioning strategies in translucent elastic optical networks. *Computer Communications*, Elsevier, v. 180, p. 134–145, dec 2021. ISSN 0140-3664. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366421003376>>. Citado na página 73.

HADI, M.; PAKRAVAN, M. R. Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, The Optical Society, v. 10, n. 2, p. 90, feb 2018. ISSN 1943-0620. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8294000>>. Citado 3 vezes nas páginas 76, 77 e 78.

HAIPOUR, S.; HABIBI, M.; BEYRANVAND, H. Artificial neural network-aided multiclass service provisioning and prioritization in eons. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 19, p. 4566–4582, 12 2022. ISSN 1932-4537. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9796651/>>. Citado na página 83.

HALDER, J. et al. E-s-rsm-rsa: A novel energy and spectrum efficient regenerator aware multipath based survivable rsa in offline eon. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 5, p. 1451–1466, sep 2021. ISSN 24732400. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9416282>>. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 78.

HALL, M. N. et al. A survey of reconfigurable optical networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 41, p. 100621–100639, sep 2021. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427721000187>>. Citado na página 24.

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*, Kluwer Academic Publishers, v. 29, p. 244–256, 6 2015. ISSN 1387-974X. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11107-015-0488-0>>. Citado na página 20.

JINNO, M. Elastic optical networking: Roles and benefits in beyond 100 Gb/s era. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 35, n. 5, p. 1116–1124, mar 2017. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7792159>>. Citado na página 18.

JINNO, M. et al. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network. *IEEE Communications Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 48, n. 8, p. 138–145, aug 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5534599>>. Citado na página 62.

JINNO, M. et al. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 47, n. 11, p. 66–73, nov 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5307468/>>. Citado 6 vezes nas páginas 18, 19, 24, 53, 55 e 112.

JOHANNISSON, P.; AGRELL, E. Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, p. 4544–4552, 12 2014. ISSN 0733-8724. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6915838/>>. Citado 4 vezes nas páginas 36, 37, 39 e 77.

KAO, K.; HOCKHAM, G. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, v. 113, p. 1151–1158, 7 1966. ISSN 0020-3270. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1966.0189>>. Citado na página 17.

KEISER, G. *Optical Fiber Communications*. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011. ISBN 9780073380711. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 30.

KEISER, G. *Fiber Optic Communications*. [S.l.]: Springer Singapore, 2021. ISBN 9789813346659. Citado na página 37.

KHAN, A. N. Online routing, distance-adaptive modulation, and spectrum allocation for dynamic traffic in elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 53, p. 102–126, dec 2019. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520019304419>>. Citado na página 63.

KLINKOWSKI, M.; WALKOWIAK, K. On performance gains of flexible regeneration and modulation conversion in translucent elastic optical networks with superchannel transmission. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 34, n. 23, p. 5485–5495, dec 2016. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7707396>>. Citado na página 71.

LEZAMA, F. et al. Solving routing and spectrum allocation problems in flexgrid optical networks using pre-computing strategies. *Photonic Network Communications*, v. 41, n. 1, p. 17–35, nov 2021. ISSN 1387-974X. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11107-020-00918-4>>. Citado na página 59.

LÓPEZ, V.; VELASCO, L. (Ed.). *Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016. Citado 8 vezes nas páginas 18, 23, 24, 25, 26, 27, 29 e 57.

LOZADA, A. et al. Impact of amplification and regeneration schemes on the blocking performance and energy consumption of wide-area elastic optical networks. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 134355–134368, 2021. ISSN 2169-3536. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9550779>>. Citado 3 vezes nas páginas 37, 74 e 82.

MADANI, F. M. Scalable framework for translucent elastic optical network planning. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 34, n. 4, p. 1086–1097, feb 2016. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7384689>>. Citado na página 70.

MAHALA, N.; UJJWAL; THANGARAJ, J. Weight distributed spectrum allocation in flexible-grid optical networks. *Optik*, Elsevier, v. 228, p. 166–171, feb 2021. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003040262031977X>>. Citado na página 61.

MARLER, R. T.; ARORA, J. S. The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 41, n. 6, p. 853–862, 2010. Citado na página 50.

MIETTINEN, K. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.

MILADIĆ-TEŠIĆ, S.; MARKOVIĆ, G.; RADOJIČIĆ, V. Traffic grooming technique for elastic optical networks: A survey. *Optik*, Elsevier, v. 176, p. 464–475, jan 2019. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618313718>>. Citado na página 68.

MILADIĆ-TEŠIĆ, S. et al. Resource planning in optical ofdm networking with traffic grooming technique. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 62, p. 102–118, mar 2021. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520021000079>>. Citado na página 69.

MUKHERJEE, B. *Optical WDM Networks*. [S.l.]: Springer, 2006. ISBN 0387290559. Citado na página 17.

MUKHERJEE, B. et al. (Ed.). *Springer Handbook of Optical Networks*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2020. ISBN 978-3-030-16249-8. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

MUNASINGHE, K. K. et al. Joint minimization of spectrum and power in impairment-aware elastic optical networks. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 9, p. 43349–43363, 2021. ISSN 2169-3536. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9378533/>>. Citado 3 vezes nas páginas 77, 78 e 81.

POGGIOLINI, P. The gn model of non-linear propagation in uncompensated coherent optical systems. *Journal of Lightwave Technology*, v. 30, p. 3857–3879, dec 2012. ISSN 0733-8724. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6296670/>>. Citado 4 vezes nas páginas 54, 55, 91 e 112.

POGGIOLINI, P. et al. The GN-model of fiber non-linear propagation and its applications. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, n. 4, p. 694–721, feb 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6685826>>. Citado 11 vezes nas páginas 19, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 55, 77, 91 e 112.

POGGIOLINI, P. et al. Analytical modeling of nonlinear propagation in uncompensated optical transmission links. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 23, p. 742–744, jun 2011. ISSN 1041-1135. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5735190/>>. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

PROAKIS, J.; SALEHI, M. *Digital Communications*. 5. ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2007. ISBN 9780072957167. Citado na página 42.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical Networks: A Practical Perspective*. 3. ed. Amsterdam; Boston: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2010. ISBN 9780123740922. Citado 5 vezes nas páginas 17, 27, 28, 30 e 35.

REZAEI, A.; SHEIKHABAD, O. A.; BEYGI, L. Quality of transmission-aware control plane performance analysis for elastic optical networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 187, p. 107–125, mar 2021. ISSN 13891286. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128620313347>>. Citado na página 80.

RUIZ, L. et al. Routing, modulation and spectrum assignment algorithm using multi-path routing and best-fit. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 111633–111650, 2021. ISSN 2169-3536. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9503371>>. Citado na página 65.

SALEH, A.; SIMMONS, J. Technology and architecture to enable the explosive growth of the internet. *IEEE Communications Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 49, p. 126–132, 1 2011. ISSN 0163-6804. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5681026/>>. Citado na página 19.

SAMBO, N. et al. Routing code and spectrum assignment (rdsa) in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 33, n. 24, p. 5114–5121, dec 2015. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7270273>>. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 64.

SANTOS, L. R. R. dos; ABRÃO, T. Adaptive chaotic hurricane-aided efficient power assignment for elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 39, p. 100595–100610, nov 2020. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427720301259>>. Citado na página 80.

SANTOS, L. R. R. dos; ABRÃO, T. Heuristic chaotic hurricane-aided efficient power assignment for elastic optical network. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 83359–83374, 2020. ISSN 2169-3536. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9082590/>>. Citado na página 79.

SANTOS, L. R. R. dos; ABRÃO, T. Low-margin efficient power and spectrum assignment in elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 43, p. 100649–100665, feb 2022. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427721000461>>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 84.

SANTOS, M. L.; ALMEIDA-JUNIOR, R. C.; ARAÚJO, D. R. B. Heurísticas para atribuição de espectro em redes ópticas elásticas baseadas em perda de capacidade sob múltiplas rotas. In: *XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 14–14. Citado 4 vezes nas páginas 49, 104, 105 e 113.

SENA, M. R. *Um Estudo sobre Otimizações Evolucionárias na Mitigação de Efeitos Não-lineares em Canais Ópticos Elásticos*. Dissertação (mathesis) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33055>>. Citado na página 40.

SENA, M. R. et al. Novel evolutionary planning technique for flexible-grid transmission in optical networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 43, p. 100648–100658, feb 2022. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157342772100045X>>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 78 e 83.

SHEN, J.; CHEN, J.; SUN, Y. Fragmentation aware routing and spectrum assignment algorithm for elastic optical networks. In: *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*. [S.l.]: IEEE, 2015. Citado na página 67.

SILVA, S. A. da et al. Strategy for resource allocation in elastic optical networks considering physical layer impairments and spectrum fragmentation. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 23, 2024. ISSN 2179-1074. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/jmoea/a/pbCGCFypzyNBcW8Sh6FTBxQ/?format=pdf&lang=en>>. Citado 3 vezes nas páginas 107, 108 e 113.

SIMMONS, J. M. *Optical Network Design and Planning*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 34, 35, 36, 44, 45 e 57.

SKLAR, B.; RAY, P. K. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2001. ISBN 978-0130847881. Citado na página 42.

TALEBI, S. et al. Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 13, p. 34–48, jul 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427714000253>>. Citado 5 vezes nas páginas 46, 56, 65, 68 e 78.

TAN, Y.; GU, R.; JI, Y. Energy-efficient routing, modulation and spectrum allocation in elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 36, p. 297–305, jul 2017. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S106852001730038X>>. Citado 2 vezes nas páginas 76 e 78.

VALE, V. A. C.; ALMEIDA, R. C. Power, routing, modulation level and spectrum assignment in all-optical and elastic networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 32, p. 14–24, apr 2019. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427718300912>>. Citado 12 vezes nas páginas 19, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 79, 104 e 113.

VALE, V. A. C.; ALMEIDA, R. C.; ASSIS, K. D. R. Network-state-dependent routing and route-dependent spectrum assignment for prmlsa problem in all-optical elastic networks. *Optical Switching and Networking*, v. 43, p. 100646–100658, 2022. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427721000436>>. Citado 8 vezes nas páginas 38, 39, 40, 41, 42, 84, 104 e 113.

VALE, V. A. C. do. *Proposição de Estratégias de Atribuição de Potência de Lançamento Considerando Penalidades Físicas em Redes Ópticas Elásticas Transparentes*. Tese (phdthesis) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 38, 39, 40, 41 e 42.

VELASCO, L.; RUIZ, M. *Provisioning, Recovery, and In-Operation Planning in Elastic Optical Networks*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. ISBN 978-1-119-33856-7. Citado na página 57.

YAN, L. et al. Joint assignment of power, routing, and spectrum in static flexible-grid networks. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 35, n. 10, p. 1766–1774, may 2017. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7833080>>. Citado na página 20.

YAN, L. et al. Resource allocation for flexible-grid optical networks with nonlinear channel model [invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, The Optical Society, v. 7, n. 11, p. B101–B108, oct 2015. ISSN 19430620. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7331135>>. Citado na página 19.

YEN, J. Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, v. 17, p. 712–716, 7 1971. ISSN 0025-1909. Disponível em: <<http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.17.11.712>>. Citado 3 vezes nas páginas 58, 91 e 93.

YOUSEFI, F.; RAHBAR, A. G.; YAGHUBI-NAMAAD, M. Fragmentation-aware algorithms for multipath routing and spectrum assignment in elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 53, p. 102–119, dec 2019. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520019303876>>. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 68.

- YU, X. et al. Fragments-minimum spectrum allocation algorithm in flexible bandwidth multi-fiber optical networks. In: *Asia Communications and Photonics Conference*. OSA, 2012. Disponível em: <<https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ACPC-2012-AF3E.5>>. Citado na página 67.
- YUAN, J. et al. A constrained-lower-indexed-block spectrum assignment policy in elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 33, p. 25–33, jul 2019. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427717301868>>. Citado na página 58.
- YUAN, J. et al. A rmsa algorithm for elastic optical network with a tradeoff between consumed resources and distance to boundary. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 46, p. 238–247, dec 2018. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520018305145>>. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 68.
- YUAN, J. et al. A spectrum assignment algorithm in elastic optical network with minimum sum of weighted resource reductions in all associated paths. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 37, n. 21, p. 5583–5592, nov 2019. ISSN 1558-2213. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8809909>>. Citado na página 60.
- ZHANG, Q.; LI, H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 11, n. 6, p. 712–731, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.
- ZHU, R. et al. Dynamic time and spectrum fragmentation-aware service provisioning in elastic optical networks with multi-path routing. *Optical Fiber Technology*, Elsevier BV, v. 32, p. 13–22, dec 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1068520016300839>>. Citado na página 65.