



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Eficiência Energética em Redes Ópticas Elásticas

Lucas Rodrigues Costa

Tese apresentada como requisito parcial para
conclusão do Doutorado em Informática

Orientador
Prof. Dr. André Costa Drummond

Brasília
2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

RL933te Rodrigues Costa, Lucas
see Eficiência Energética em Redes Ópticas Elásticas / Lucas
Rodrigues Costa; orientador André Costa Drummond. --
Brasília, 2021.
175 p.

Tese (Doutorado - Doutorado em Informática) --
Universidade de Brasília, 2021.

1. Roteamento e Alocação de Espectro. 2. Eficiência
Energética. 3. Soluções Cientes do Gasto Energético. 4.
Redes ópticas elásticas. I. Costa Drummond, André, orient.
II. Título.



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Eficiência Energética em Redes Ópticas Elásticas

Lucas Rodrigues Costa

Tese apresentada como requisito parcial para
conclusão do Doutorado em Informática

Prof. Dr. André Costa Drummond (Orientador)
CIC/UnB

Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Divanilson Rodrigo de Sousa Campelo
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo Adilio Pelinson Alchieri
Universidade de Brasília

Prof. Dr. Marcelo Antonio Marotta
Universidade de Brasília

Prof.a Dr.a Genáina Nunes Rodrigues
Coordenadora do Programa de Pós-graduação em Informática

Brasília, 10 de maio de 2021

Dedicatória

Dedico a todos os professores que passaram na minha vida dos quais pude tirar os conhecimentos necessários que contribuíram para este e outros trabalhos em minha vida. Dedico a minha família e meus amigos que me ajudaram com apoio moral nessa jornada.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me ajudado nessa caminhada. Aos meus pais J. Lucas e Fátima por tudo que tenho. A minha família pelo apoio e ajuda.

Agradeço em especial a minha esposa Adriana, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis.

Agradeço ao meu orientador André Costa Drummond, pelo apoio e disponibilidade contínua, sempre procurando extrair o meu melhor.

Agradeço aos meus amigos do laboratório, Ítalo, Guilherme, Leia, Paulo e Ranyelson. Agradeço aos meus amigos do trabalho Milton, Rebeca e Diego, e aos demais colegas da COTEC. Agradeço aos meus amigos de vida Fabiano, Thiago e Marco. Agradeço aos meus professores da Universidade de Brasília, em especial aos professores Jacir e Eduardo pelo apoio no doutorado. E ao Google!

Resumo

Com o crescimento da Internet e o advento das aplicações emergentes, o consumo energético das redes de núcleo vem ganhando maior destaque na academia e na indústria. O surgimento das Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks* – EON) trouxe novas concepções nas operações das redes de núcleo, melhorando sua flexibilidade e eficiência no uso dos recursos. Suas características proporcionam uma maior versatilidade e escalabilidade na alocação do espectro. Tendo em vista que o consumo energético é um fator que está ganhando relevância especial no planejamento e na operação das redes de núcleo, esta Tese dedica-se ao estudo da eficiência energética nas EONs apresentando suas características, modelo de consumo energético e as principais linhas de pesquisa encontradas na literatura sobre eficiência energética em EON. Para isso, propõem-se três estudos que abordam diferentes aspectos relativos à eficiência energética em EON. O primeiro estudo, apresenta uma solução para o problema de roteamento e alocação de espectro com modulação adaptativa (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation* – RMLSA) em EONs translúcidas. Propõe-se um esquema de modulação adaptativa, acoplável a qualquer algoritmo de alocação de espectro EON, que promove eficiência energética através do uso de níveis de modulação mais eficientes. No segundo estudo, uma nova perspectiva para o problema RMLSA é investigada explorando técnicas de agregação de tráfego elétrica e óptica para EONs. Propõe-se um modelo de programação linear inteira que leva em consideração todas as características da arquitetura EON e técnicas de engenharia de tráfego para resolver o problema RMLSA dinâmico com eficiência energética. Por fim, o último estudo, apresenta um algoritmo heurístico para resolução do problema RMLSA translúcido dinâmico com técnicas de agregação de tráfego. A proposta baseia-se em um modelo de grafo auxiliar que melhora o consumo de energia da rede através de políticas de engenharia de tráfego inovadoras. Os resultados obtidos nos estudos apresentados, garantem uma redução significativa na taxa de bloqueio para diversas soluções RMLSA da literatura sem comprometer a eficiência energética da rede.

Palavras-chave: Roteamento e Alocação de Espectro, Eficiência Energética, Soluções Cientes do Gasto Energético, Redes ópticas elásticas

Abstract

With the growth of the Internet and the arising of emerging applications, the energy consumption of core networks has gained greater relevance in academia and industry. The emergence of *Elastic Optical Networks* (EON) brought new conceptions in the operations of core networks, improving network flexibility and efficiency in the use of resources. Its features provide greater versatility and scalability in spectrum allocation. Considering that energy consumption is a factor that is gaining special relevance for the planning and operation of core networks, this Thesis is dedicated to the study of the energy efficiency in the EON presenting its main characteristics, energy consumption models, and the main research lines found in the literature on energy efficiency in EON. For this, three studies are proposed that address different aspects related to energy efficiency in EON. The first study presents a solution to *Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation* (RMLSA) problem in translucent EONs. An adaptive modulation scheme is proposed, which can be connected to any EON spectrum allocation algorithm, which promotes energy efficiency through the use of more efficient modulation levels. In the second study, a new perspective for the RMLSA problem is investigated exploring electrical and optical grooming techniques for EONs. A linear programming model is proposed that takes into account all the characteristics of the EON architecture and traffic engineering techniques to solve the dynamic RMLSA problem with energy efficiency. Finally, the last study presents a heuristic algorithm for solving the dynamic translucent RMLSA problem with traffic grooming techniques. The proposal is based on an auxiliary graph model that improves the energy consumption of the network through innovative traffic engineering policies. The results obtained in the studies presented, guarantee a significant reduction in the blocking rate for several RMLSA solutions of the literature without compromising the energy efficiency of the network.

Keywords: Routing and Spectrum Assignment, Energy Efficiency, Energy-Aware Solutions, Elastic Optical Network

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	7
1.2	Contribuições	8
1.3	Publicações Relacionadas a Tese	8
1.4	Demais Publicações	11
1.5	Organização da Tese	12
2	Redes Ópticas Elásticas	13
2.1	Conceitos Básicos	13
2.2	Arquitetura EON	15
2.2.1	BVT/SBVT	15
2.2.2	BV-OXC	18
2.2.3	OLA	20
2.3	Modelo de Representação de Espectro em EON	21
2.4	Engenharia de Tráfego EON	24
2.4.1	Roteamento e Alocação de Espectro (RSA/RMLSA)	24
2.4.2	Agregação Elétrica	28
2.4.3	Agregação Óptica	29
2.4.4	Roteamento em Múltiplos Saltos	32
2.4.5	Roteamento em Múltiplos Caminhos	34
2.4.6	Aplicação de uma engenharia de tráfego	35
2.4.7	Tráfego Estático e Dinâmico	36
2.5	Fragmentação de Espectro	38
2.6	Técnicas de Sobrevivência	40
2.7	Modelo de Consumo Energético das redes EON	42
2.7.1	Consumo energético do BVT	43
2.7.2	Consumo energético do BV-OXC	43
2.7.3	Consumo energético dos Amplificadores Ópticos (OLA)	44
2.7.4	Consumo energético do Caminho Óptico	45

2.7.5	Quantidade de Dados Transmítidos por uma Solicitaçaõ de Tráfego	45
2.7.6	Consumo energético Total da Rede	45
2.7.7	Eficiência energética da Rede	46
2.7.8	Eficiência Energética Efetiva	46
3	Estado da Arte	47
3.1	Mapeamento da Literatura	47
3.1.1	Alocaçaõ de Espectro com Eficiência Energética	47
3.1.2	Eficiência energética com Agregaçãõ de Tráfego	50
3.1.3	Eficiência energética com Modulaçaõ Adaptativa	52
3.1.4	Sobrevivência e Eficiência Energética	54
3.2	Oportunidades de Pesquisa	56
4	Esquema de Modulaçaõ Adaptativa para Eficiência Energética EON	57
4.1	Trabalhos Relacionados	58
4.2	Esquema de modulaçaõ adaptativa <i>DMMAS</i>	61
4.2.1	Restriçaõ <i>multihop</i> (MHC)	63
4.2.2	Módulo de Eficiência Energética do esquema <i>DMMAS</i>	64
4.2.3	Esquema de Modulaçaõ Proposto	65
4.2.4	Complexidade do esquema <i>DMMAS</i>	66
4.3	Ambiente de Simulaçaõ	67
4.4	Resultados Numéricos	67
4.5	Resumo Conclusivo	76
5	Modelagem analítica para o problema RMLSA com eficiência energética	77
5.1	Trabalhos Relacionados	78
5.2	Modelos analíticos para o problema RMLSA	82
5.2.1	<i>Constantes dos Modelos</i>	83
5.2.2	Modelagem ILP do Problema RMLSA para EONs transparentes	83
5.2.3	Modelagem ILP do Problema RMLSA para EONs translúcidas	89
5.2.4	Modelagem ILP do Problema RMLSA translúcido sobre SBVT-EON	95
5.3	Ambiente de Simulaçaõ	106
5.4	Avaliações de Desempenho	107
5.4.1	Avaliaçaõ de Complexidade Assintótica dos modelos	108
5.4.2	Taxa de bloqueio de banda (BBR)	111
5.4.3	Média de Transmissores por Requisiçaõ	112
5.4.4	Média de saltos na topologia virtual por requisicaõ	112
5.4.5	Percentual de Caminhos Ópticos Agregados na Rede	113

5.4.6	Eficiência Energética da Rede	114
5.5	Resumo Conclusivo	115
6	Alcançando Eficiência Energética com Modelo de Grafo Auxiliar EON	117
6.1	Contextualização do problema	117
6.2	Trabalhos Relacionados	118
6.3	Algoritmo Proposto	120
6.3.1	Grafo Auxiliar (AG)	121
6.3.2	Políticas de Eficiência Energética	124
6.3.3	Algoritmo RMLSA Dinâmico	125
6.3.4	Complexidade de Tempo do Algoritmo Proposto	126
6.4	Ambiente de Simulação	127
6.5	Resultados Numéricos	128
6.5.1	Avaliação das Políticas de Eficiência Energética	129
6.5.2	Avaliação de Desempenho do AG	132
6.5.3	Avaliação entre os Algoritmos da Literatura	135
6.6	Resumo Conclusivo	139
7	Considerações Finais	141
7.1	Trabalhos Futuros	143
	Referências	145

Lista de Figuras

1.1	Percentual do Consumo de energia global das TICs entre 2010 a 2030.	2
1.2	Projeção do consumo de energia dos diferentes aspectos que compõem as redes de telecomunicações.	3
2.1	Comparação entre os caminhos ópticos de redes com grades fixa e flexível. .	14
2.2	Arquitetura das redes ópticas elásticas (EON).	16
2.3	Provisionamento de largura de banda no domínio do espectro.	17
2.4	Comportamento da direção do tráfego em um BVT e SBVT.	17
2.5	Representação do BV-WSS.	19
2.6	Arquitetura de um BV-WXC: a) arquitetura de difusão e seleção; b) arquitetura de não difusão e seleção.	19
2.7	Funcionamento de um EDFA.	20
2.8	Modelos de representação do espectro EON.	22
2.9	Exemplificação do problema RSA.	25
2.10	Exemplificação do problema RMLSA.	26
2.11	Relação dos problemas P e NP.	27
2.12	Agregação elétrica de tráfego em EON.	30
2.13	Ilustração da comutação óptica realizada pelos BV-OXCs.	31
2.14	Agregação óptica de tráfego em EON.	32
2.15	Representação de redes opacas, transparentes e translúcidas.	33
2.16	Representação do roteamento em múltiplos caminhos.	35
2.17	Possibilidades de uma engenharia de tráfego EON.	36
2.18	Exemplo de fragmentação do espectro para uma EON com 4 nós e 4 links. .	41
4.1	Esquema de modulação adaptativa para o problema RSA <i>mAdap</i>	59
4.2	Exemplos de topologias virtuais de modulação para uma topologia com 7 nós. As distâncias dos enlaces são apresentadas em quilômetros.	62
4.3	Exemplo de relação entre nós de articulação e o número de sub-caminhos de um conjunto P para uma requisição $R\{s, d, b\}$	63
4.4	Módulo <i>Energy-Aware</i> do esquema <i>DMMAS (EA-Scheme)</i>	65

4.5	Esquema de modulação adaptativa <i>DMMAS</i>	65
4.6	Topologia USANet.	68
4.7	Topologia GERMAN.	68
4.8	Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia USANet.	70
4.9	Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia GERMAN.	70
4.10	Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia USANet.	72
4.11	Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia GERMAN.	72
4.12	Taxa de Fragmentação Externa para topologia USANet.	74
4.13	Taxa de Fragmentação Externa para topologia GERMAN.	74
4.14	Eficiência Energética Efetiva para topologia USANet.	75
4.15	Eficiência Energética Efetiva para topologia GERMAN.	75
5.1	Representação gráfica da variável $\pi_{ij}^k = \{a_{ij}^k, b_{ij}^k\}$ para um enlace.	85
5.2	Representação gráfica dos parâmetros e variáveis utilizados no modelo para alguns enlaces.	98
5.3	Representação gráfica do problema de contiguidade e continuidade do túnel na agregação óptica.	105
5.4	Topologias avaliadas.	108
5.5	ILP Transparente \times Heurística MAdap-KSP.	109
5.6	ILP Translúcido \times Heurística DMMAS-KSP.	109
5.7	ILP Translúcido SBVT-EON \times AG-Heurística.	110
5.8	Complexidade Assintótica dos modelos ILP e algoritmos heurísticos em escala logarítmica.	110
5.9	Taxa de bloqueio de banda (120 Erlangs).	111
5.10	Média de Transmissores por Requisição (120 Erlangs).	112
5.11	Média de saltos na topologia virtual por requisição (120 Erlangs).	113
5.12	Percentual de Caminhos Ópticos Agregados na Rede (120 Erlangs).	114
5.13	Eficiência Energética da Rede (120 Erlangs).	115
6.1	Grafo Auxiliar (<i>Auxiliary Graph</i> – AG) para o problema RMLSA.	122
6.2	Topologia <i>Pacific Bell</i>	128
6.3	Avaliação das Políticas de Eficiência Energética para a Métrica BBR na Topologia USANet.	129
6.4	Avaliação das Políticas de Eficiência Energética para a Métrica VT na Topologia USANet.	130
6.5	Avaliação das Políticas de Eficiência Energética para a Métrica GR na Topologia USANet.	131

6.6	Avaliação das Políticas de Eficiência Energética para a Métrica EE na Topologia USANet.	132
6.7	Avaliação de desempenho do modelo ILP e algoritmo heurístico AG para a Métrica BBR na Topologia <i>6-nodes</i>	133
6.8	Avaliação de desempenho do modelo ILP e algoritmo heurístico AG para a Métrica TIME na Topologia <i>6-nodes</i>	134
6.9	Avaliação de desempenho do modelo ILP e algoritmo heurístico AG para a Métrica EE na Topologia <i>6-nodes</i>	135
6.10	Taxa de bloqueio de banda (BBR) para Topologia USANet.	136
6.11	Taxa de bloqueio de banda (BBR) para Topologia <i>Pacific Bell</i>	136
6.12	Média de saltos na topologia virtual por requisição para Topologia USANet.	137
6.13	Média de saltos na topologia virtual por requisição para Topologia <i>Pacific Bell</i>	138
6.14	Eficiência Energética Efetiva para Topologia USANet.	139
6.15	Eficiência Energética Efetiva para Topologia <i>Pacific Bell</i>	139

Lista de Tabelas

2.1	Relação do tamanho de espectro, largura de banda e distância máxima de transmissão de subportadoras ODFM.	23
2.2	Consumo Energético dos transmissores de banda variável BVT para diferentes formatos de modulação.	44
3.1	Classificação dos artigos da literatura com foco na eficiência energética EON	48
4.1	Taxa Média do Uso de Modulação (%).	69
5.1	Propostas da literatura EON que desenvolveram modelos analíticos.	82
5.2	Número de variáveis e restrições do ILP para redes transparentes (pior caso).	89
5.3	Número de variáveis e restrições do ILP para redes translúcidas (pior caso).	95
5.4	Número de variáveis e restrições do ILP para redes translúcidas sobre SBVT-EON (pior caso).	107
6.1	Atribuição dos pesos do AG para as políticas de eficiência energética	125

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMLA *Adaptive Modulation Level Allocation.*

ASE *Amplified Spontaneous Emission.*

BBR *Bandwidth Blocking Ratio.*

BER *Bit Error Rate.*

BPSK *Binary Phase Shift Keying.*

BV-OXC *Bandwidth Variable Optical Cross-Connects.*

BV-SSS *Bandwidth-Variable Spectrum-Selective Switch.*

BVT *Bandwidth-Variable Transponder.*

CAPEX *Capital Expenditure.*

CO-OFDM *Coherent Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.*

CoWDM *Coherent Wavelength-Division Multiplexing.*

DAC *Digital to Analog Converter.*

DLE *Dynamic Lightpath Establishment.*

DSP *Digital Signal Processor.*

DWDM *Dense Wavelength Division Multiplexing.*

EA *Energy-Aware.*

EDFA *Erbium-Doped Fiber Amplifier.*

EG *Electrical Grooming.*

EON *Elastic Optical Networks.*

EP *Energy-Proportional.*

F-SBVT *Fully SBVT.*

FDL *Fiber Delay Lines.*

FEC *Forward Error Correction.*

GN *Green Networks.*

GON *Green Optical Networks.*

ILP *Integer Linear Programming.*

ITU-T *International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector.*

MILP *Mixed Integer Linear Programming.*

MLR *Mixed-Line-Rate.*

MSP *Multiprocessor Scheduling Problem.*

MZM *Mach-Zehnder.*

NIP *Nonlinear Integer Programming.*

O-OFDM *Optical-OFDM.*

OEO *Optical-Electronic-Optical.*

OFDM *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.*

OG *Optical Grooming.*

OLA *Optical Line Amplifier.*

OPEX *Operational Expenditure.*

OSF *Optical Switching Fabric.*

OSNR *Optical Signal-to-Noise Ratio.*

OXC *Optical Cross-Connects.*

P-SBVT *Partially SBVT.*

PAPR *Peak to Average Power Ratio.*

PLI *Programação Linear Inteira.*

PSK *Phase Shift Keying.*

QAM *Quadrature Amplitude Modulation.*

QoS *Quality of Service.*

QoT *Quality of Transmission.*

QPSK *Quadrature Phase Shift Keying.*

RMLSA *Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation.*

RMSCA *Routing, Modulation, Spectrum, and Core Allocation.*

RSA *Routing and Spectrum Allocation.*

RWA *Routing and Wavelength Assignment.*

SBVT *Sliceable Bandwidth-Variable Transponder.*

SDM *Space-Division Multiplexing.*

SDON *Software Defined Optical Networking.*

SLE *Static Lightpath Establishment.*

SLICE *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network.*

SM *Sleep Mode.*

SNR *Signal-to-Noise Ratio.*

SNS *Simplified Null Switching.*

SRLP *Spectrum Reservation for each LightPath.*

SRNP *Spectrum Reservation for each Node-Pair.*

TDM *Time-Division Multiplexing.*

TIC *Tecnologia da Informação e Comunicação.*

USANet *United States of America Network.*

WDM *Wavelength Division Multiplexing.*

WSS *Wavelength-Selective Switch.*

Capítulo 1

Introdução

A preservação de energia vem ganhando cada vez mais interesse na sociedade nos últimos anos. Reduzir o consumo energético de todos os processos da humanidade tornou-se uma meta obrigatória, em grande parte, devido ao esgotamento rápido das reservas de combustível fósseis e o aumento do custo da geração de energia [1]. Segundo estudos recentes, a energia de hidrocarbonetos fornece a maior parte da demanda de energia global, cerca de 80% [2]. Além disso, a combustão de materiais hidrocarbonados, tais como, petróleo, carvão e gás natural, libera grandes quantidades de gases de efeito estufa, uma das principais causas do aquecimento global [3].

A academia e a indústria apontam algumas direções de pesquisa para lidar com este contexto. A energia renovável, também chamada de energia limpa, é uma destas alternativas. Este tipo de energia é obtida por meio de fontes renováveis, que não geram grandes impactos ambientais negativos [4]. Outra alternativa são as abordagens de conservação de energia. Dentre elas estão: (*i*) o desenvolvimento de equipamentos e componentes de baixo consumo; e (*ii*) o desenvolvimento de mecanismos que proporcione eficiência energética em sua operação. Em ambos os casos, a ciência e tecnologia vem desenvolvendo soluções que permitem a redução da quantidade de energia necessária para apoiar as atividades humanas [3].

O setor de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) é uma das áreas mais promissoras na busca da eficiência energética global, entretanto, está entre as que mais consomem energia no planeta [5, 6]. Esta contradição é devido a dois aspectos simultâneos, as redes de telecomunicação e sua onipresença. As redes mundiais de telecomunicação transformaram a sociedade fornecendo meios práticos para a redução do impacto humano na natureza, por exemplo, aplicações de redes como teletrabalho, videoconferência e comércio eletrônico reduziram a movimentação humana e conseqüentemente o impacto ambiental. Em contrapartida, a onipresença das TICs trouxe um aumento substancial do uso de equipamentos de rede, o que elevou o consumo de energia não só na produção

como na sua operação [7].

Com o aumento da globalização, a cobertura das TICs evoluiu rapidamente e consequentemente seu consumo energético. Com base nas estimativas de [8] e [9], o consumo de energia das TICs representou cerca de 4% a 7,4% do consumo global de energia em 2009 até 2012. Previsões mais recentes apresentam um consumo de até 21% em 2021 e até 51% em 2030 no pior do casos [7]. Estas previsões levam em consideração apenas o uso da eletricidade dos equipamentos pessoais, da infraestrutura das redes, *data centers* e custos relacionados a produção destes dispositivos. São excluídas as questões relacionadas ao tratamento de fim de vida, transporte de recursos e uso de produtos químicos que prejudiquem a sustentabilidade global. A Figura 1.1 apresenta o gasto e uma projeção do percentual de energia global utilizado pelas TICs entre 2010 a 2030 para três cenários considerados [7]. Pode-se observar que em 2010 o uso ficou entre 8% – 14%, em 2021 será de 6% – 14% e em 2030 de 8% – 51%, respectivamente. Todo este contexto é impulsionado principalmente pela expansão da infraestrutura das redes e dos *data centers* das grandes companhias [9].

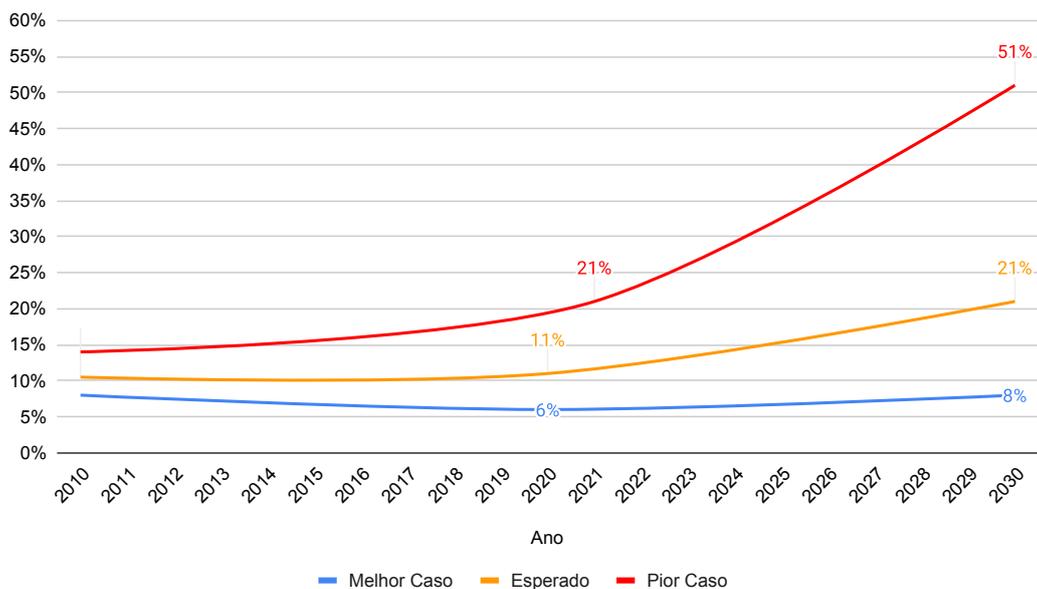


Figura 1.1: Percentual do Consumo de energia global das TICs entre 2010 a 2030.

As redes de telecomunicações, que representam uma parte significativa das TICs, estão entre as que mais consomem energia na área, cerca de 37% do consumo total do setor [5]. Com uma taxa de crescimento no consumo energético anual estimada em 10%, em 2012, a indústria de telecomunicações sozinha consumiu mais de 250 TWh de energia elétrica de acordo com [1]. Por exemplo, Weldon [10] estimou que o uso de eletricidade de todos

os dispositivos de rede conectados aumentaria de 200 TWh em 2011 para 1400 TWh em 2025.

De acordo com estimativas mais recentes [6], estes dados são ainda maiores. A Figura 1.2 apresenta uma projeção do consumo de energia global dos diferentes aspectos que compõem as redes de telecomunicações entre os anos de 2020 a 2030 [6]. As projeções indicam que em 2030 as redes de telecomunicação consumirão cerca de 3219 TWh de energia ao ano. Pode-se observar também que a previsão do gasto energético nos *data centers* é a principal causa no aumento do consumo energético. Uma das principais razões para o aumento é o crescimento do tráfego na Internet.

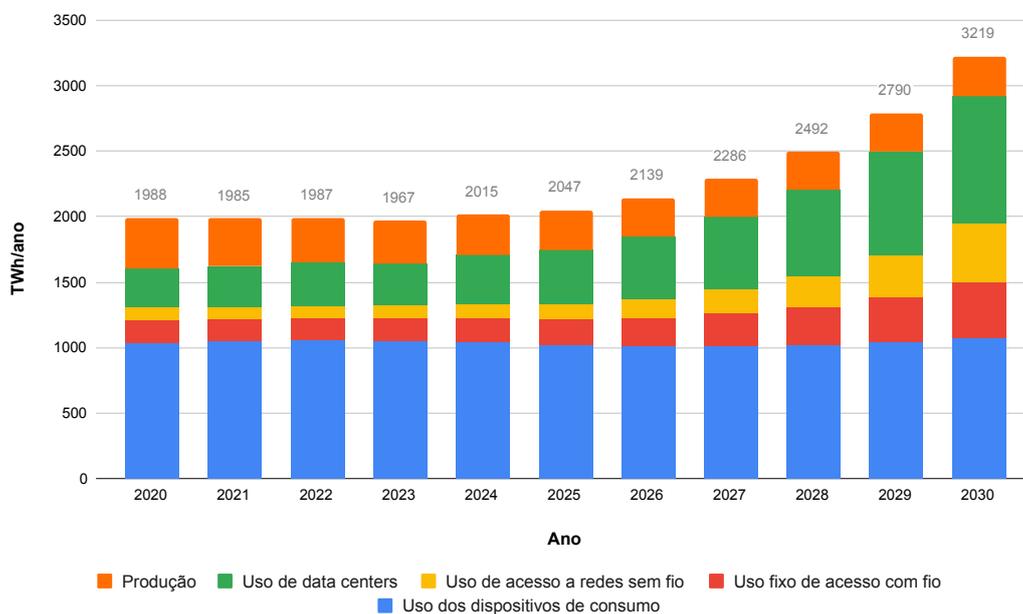


Figura 1.2: Projeção do consumo de energia dos diferentes aspectos que compõem as redes de telecomunicações.

Nos últimos anos, o tráfego da Internet vem crescendo exponencialmente devido ao advento das aplicações emergentes, tais como, aplicações multimídia, TV de alta definição, computação em nuvem e aplicações de rede em tempo real [11]. O tráfego nas redes de *data center* tem crescido 24% por ano em média desde 2016 [12]. Estimativas mais recentes indicam um crescimento ainda maior, impulsionado pela tecnologia 5G e a Internet das Coisas [13]. Este contínuo aumento no tráfego da Internet fez com que a academia e a indústria concentrassem seus esforços no aumento da capacidade da rede, negligenciando fatores como o consumo energético. O aumento na capacidade da rede normalmente é acompanhado por um aumento no consumo de energia do equipamento de rede ou na utilização de novos equipamentos [14]. Dessa forma, o crescimento do tráfego torna a

questão do consumo de energia um problema significativo. Este aumento no consumo de energia não tem apenas relações econômicas, mas também consequências ecológicas. Segundo [15] as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia crescerão 0,6% ao ano de 2018 a 2050. De acordo com [16], o setor de telecomunicações será responsável por 4 – 5% de emissões globais de dióxido de carbono entre 2020 a 2030.

Mesmo esperando o declínio da disponibilidade barata de combustíveis fósseis, o aumento do custo da energia também está crescendo, segundo estudos recentes [17]. Levando em consideração este aumento no custo e a crescente preocupação com a sustentabilidade, o consumo de energia das TICs está levantando sérias questões. É imperativo desenvolver soluções que proporcionem eficiência energética e que mantenham o mesmo nível de funcionalidade.

Dentre as várias tecnologias de rede mencionadas, esta **Tese** foca a eficiência energética das redes ópticas. A tecnologia óptica é amplamente utilizada nas redes de telecomunicação e constituem a infraestrutura física básica das redes na maior parte do mundo [18]. Isto se deve à sua alta velocidade de transmissão, alta capacidade e custo benefício.

As tecnologias de rede óptica vêm sendo estudadas há bastante tempo e diferentes abordagens têm sido propostas para melhorar seu desempenho. Novas estratégias de roteamento e protocolos vêm sendo constantemente exploradas para tornar a rede óptica mais eficiente [19]. Tecnologias de atribuição de comprimento de onda e agregação de tráfego são desenvolvidas frequentemente na literatura para aumentar a capacidade da rede [20]. Além disso, técnicas de sobrevivência a falhas nas redes ópticas também vêm sendo exaustivamente investigadas [21].

Embora estes cenários sejam bastante explorados, o conceito de eficiência energética nas redes ópticas é uma concepção nova que vem sendo investigada somente nos últimos anos [22]. Pesquisas estão sendo cada vez mais desenvolvidas, principalmente impulsionadas pela economia de energia consumida pelas TICs. Além disso, reduzir o consumo de energia global traz benefícios tanto na economia como na proteção do meio ambiente.

Seja para o projeto da rede como para sua operação [22], a pesquisa sobre consumo de energia em redes ópticas pode ser classificada em quatro níveis [3]:

Componentes: São pesquisas relacionadas a componentes (circuitos integrados) de processamento óptico que reduzirão significativamente o consumo de energia. Pode-se destacar *buffers* óticos, OSFs (*Optical Switching Fabric*) e conversores de comprimento de onda que estão sendo desenvolvidos.

Transmissão: São estudos relacionados a transmissão dos dados na fibra óptica, tais como, fibras de baixa atenuação e baixa dispersão, fibras multinucleadas e transmissores/receptores ópticos que melhorarão a eficiência energética da transmissão.

Rede: Concentra-se em mecanismos para o roteamento e alocação de recursos que proporcionem eficiência energética. Pode-se destacar as estratégias de roteamento e protocolos de comunicação adotados.

Aplicação: No nível da aplicação, concentram-se os mecanismos que atuam na camada de aplicação e proporcionam procedimentos de conectividade de rede com eficiência energética, tais como, mecanismos de *proxying* e abordagens SDON (*Software Defined Optical Networking*) [23].

Nesta **Tese**, o objetivo é pesquisar as abordagens que proporcione eficiência energética no nível da rede no contexto operacional.

Uma rede de telecomunicação pode ser subdividida em três domínios: (i) núcleo; (ii) área metropolitana; e (iii) acesso. O núcleo é a parte central de uma rede de telecomunicação e pode fornecer uma cobertura nacional, continental ou até mesmo global. Os enlaces de uma rede de núcleo, formado de fibras ópticas, podem ter algumas centenas a alguns milhares de quilômetros de comprimento. Em geral, este tipo de rede é formada por topologias em malha para prover maior flexibilidade e proteção aos dados [24].

As redes que abrangem uma área metropolitana cobrem distâncias de algumas dezenas a centenas de quilômetros [25] e é predominantemente baseada em um legado enraizado pelas redes de anel óptico SONET/SDH [3] e mais recentemente em OTN [26]. Por fim, as redes de acesso são redes privadas que conectam os usuários finais ao seu provedor de serviços. Em geral, elas abrangem uma distância de até alguns quilômetros. Para redes de acesso óptico sua estrutura é geralmente baseada em topologias em forma de árvore.

Em todos estes domínios, as tecnologias ópticas desempenham um papel relevante para a transmissão de dados. Aplicações relativas ao consumo energético podem e são exploradas em todos os três domínios [3]. Para esta **Tese**, as abordagens desenvolvidas para melhorar a eficiência energética das soluções ópticas são avaliadas no contexto das redes de núcleo. É neste domínio que predomina a comunicação entre os *data centers* que, por sua vez, representam o maior crescimento do consumo energético das redes de telecomunicações de acordo com a Figura 1.2 [6].

Para as redes de núcleo óptico, a energia é principalmente consumida em equipamentos de transmissão e comutação de rede, tais como: OXCs (*Optical Cross-Connects*), OLAs (*Optical Line Amplifier*) e transmissores (*Transponders*) [3, 22, 20, 27]. Para reduzir o consumo energético destas redes é necessário propor abordagens que orquestrem adequadamente como estes equipamentos serão utilizados na rede.

Neste cenário, a literatura vem buscando soluções baseadas em redes conscientes do consumo energético (*Energy-Aware (EA) Network*) ou também chamadas redes verdes (*Green Networks*) [14]. Uma rede com custo eficiente e com eficiência energética exige

uma tecnologia capaz de aproveitar melhor os recursos disponíveis na rede e reduzir o hiato entre a utilização da rede e a capacidade oferecida [28]. A academia e a indústria têm investido em pesquisas para aumentar a eficiência energética nos seus recursos, principalmente no que tange às redes de núcleo [22]. A literatura divide as abordagens EA em duas categorias, denominadas: (i) Proporcional à Energia (*Energy-Proportional* – EP); e (ii) Modo de Suspensão (*Sleep Mode* – SM) [22].

As propostas baseadas na primeira abordagem procuram relacionar o gasto energético do dispositivo com sua capacidade e carga trafegada. Neste contexto, a energia consumida do dispositivo é proporcional ao uso do equipamento, dispositivos que trafegam mais dados gastam mais energia. A segunda abordagem afeta a rede como um todo distribuindo cuidadosamente a carga de tráfego da rede em poucos equipamentos, de modo que, alguns dispositivos são totalmente utilizados e outros dispositivos ficam ociosos e são colocados em modo de suspensão [1].

De acordo com trabalhos recentes [22, 29, 30, 31], as abordagens do modo de suspensão (*Sleep Mode*) são motivadas pelo fato que o consumo de energia dos dispositivos atuais é praticamente independente da carga. Assim, o uso de menos dispositivos é mais eficiente em termos energéticos do que o uso de muitos dispositivos subutilizados (*Energy-Proportional*) [22, 32].

O novo paradigma de Redes Ópticas Elásticas (EON) trouxe novas perspectivas para o consumo eficiente dos recursos. Sua capacidade de ajustar a largura de banda de forma “elástica” permite uma atribuição espectral eficiente do tráfego de dados proporcionando novas concepções nas operações das redes ópticas, melhorando a flexibilidade da rede e sua eficiência [33].

Em comparação com as redes ópticas tradicionais de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM), as EONs exigem mecanismos de alocação de largura de banda mais sofisticados, baseados em abordagens de roteamento e de atribuição do espectro (*Routing and Spectrum Allocation* – RSA) e dispositivos de largura de banda variável, como transmissores de largura de banda variável (*Bandwidth-Variable Transponder* – BVT) e comutadores ópticos de banda variável (*Bandwidth Variable Optical Cross-Connects* – BV-OXC) [19].

A eficiência do espectro está relacionada à sua tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) implementada pelos BVTs e BV-OXCs das EONs. Estes componentes possibilitam que o espectro seja separado em subportadoras contíguas parcialmente sobrepostas. Isso permite a criação de caminhos ópticos com taxa de transmissão ajustável facilitando o atendimento das futuras requisições de tráfego da Internet [33].

Para melhorar ainda mais a eficiência e a utilização do espectro, a literatura EON incorporou a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* – QoT) para as soluções

RSA. Isto transformou o problema RSA no problema de roteamento e alocação de espectro com modulação adaptativa (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation – RMLSA*), que adiciona a atribuição do formato de modulação ao espectro, considerando sua distância de transmissão [34].

As estratégias para alocação de recursos às requisições determinam a eficiência da solução para o maior atendimento das demandas na rede. Neste contexto, diversas abordagens de engenharia de tráfego para a alocação de recursos em EONs têm sido propostas na literatura. Tais estudos demonstram a eficácia do novo paradigma e sua viabilidade [33].

Embora o paradigma EON possibilite o ajuste eficiente na alocação do espectro, seus componentes consomem mais energia que os componentes das redes ópticas tradicionais. Por outro lado, a flexibilidade fornecida por esses mesmos componentes permite uma eficiência espectral muito maior que o paradigma tradicional [35]. Dessa forma, abordagens de engenharia de tráfego eficientes podem proporcionar ganhos relativamente altos se relacionados ao consumo energético do paradigma de redes ópticas tradicional.

Dentre as abordagens de engenharia de tráfego proporcionadas pelo paradigma EON podem-se destacar a agregação de tráfego elétrica (*Electrical Grooming – EG*) e óptica (*Optical Grooming – OG*). Para esta última, são necessários transmissores mais sofisticados que os tradicionais BVTs. A agregação óptica necessita de transmissores SBVTs (*Sliceable Bandwidth-Variable Transponders*) [36]. Uma EON composta por SBVTs é chamada de SBVT-EON. Além da agregação de tráfego, o paradigma EON proporciona alocação de espectro com modulação adaptativa (*Adaptive Modulation Level Allocation – AMLA*) que adiciona um grau ainda maior nas abordagens de engenharia de tráfego.

Para o contexto de eficiência energética, a agregação de tráfego reduz a utilização de BVTs/SBVTs na rede, pois múltiplas requisições podem ser atendidas por um mesmo par de BVTs/SBVTs. Por outro lado, a AMLA proporciona uma menor utilização do espectro através do uso de níveis de modulação mais eficientes. Ambas abordagens trazem melhorias na eficiência energética da rede por meio do melhor aproveitamento no uso dos componentes (BVT e BV-OXC) e uma menor utilização de espectro na rede.

1.1 Objetivo

O objetivo geral desta **Tese** é apresentar e propor novas abordagens que proporcionem eficiência energética no contexto operacional das redes ópticas elásticas (EON).

Tendo em vista este compromisso e todo o contexto relacionado à eficiência energética EON, esta **Tese** tem como objetivos específicos apresentar e propor os principais elementos que proporcionam a eficiência energética em EONs apresentando suas principais características, modelo de consumo energético, as principais linhas de pesquisa encontra-

das na literatura de redes ópticas verdes (*Green Optical Networks* – (GON)) e as questões envolvidas na otimização do consumo energético consciente das EONs.

1.2 Contribuições

A lista apresentada a seguir descreve as contribuições desta **Tese**:

- Apresentação do modelo de consumo energético EON e a elaboração de uma métrica que relaciona o *trade-off* entre a eficiência energética e a taxa de bloqueio de banda da rede;
- Uma análise completa do cenário de consumo de energia EON apresentando o estado da arte da literatura de redes ópticas verdes (GON);
- Proposta e avaliação de um esquema de modulação adaptativa inovador para resolução do problema RMLSA translúcido com técnicas AMLA;
- Três modelos analíticos baseado em Programação Linear Inteira (PLI) para os problemas RMLSA transparente, translúcido e com agregação elétrica e óptica no cenário de tráfego dinâmico;
- Proposta e avaliação de uma heurística RMLSA translúcida para SBVT-EON dinâmica.
- Desenvolvimento de três políticas de engenharia de tráfego que visam reduzir o consumo energético da rede.

1.3 Publicações Relacionadas a Tese

Publicações em Revistas

- **COSTA, LUCAS R.**; BRASILEIRO, ITALO B. ; DRUMMOND, ANDRE C. . Energy Efficiency in Sliceable-Transponder Enabled Elastic Optical Networks. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, v. 5, p. 1-1, 2021.
- BRASILEIRO, ÍTALO ; **COSTA, LUCAS** ; DRUMMOND, ANDRÉ. A survey on challenges of Spatial Division Multiplexing enabled elastic optical networks. Optical Switching and Networking, v. 38, p. 100584, 2020.
- **COSTA, LUCAS RODRIGUES**; DRUMMOND, ANDRE COSTA. New Distance-Adaptive Modulation Scheme for Elastic Optical Networks. IEEE Communications Letters (Print), v. 21, p. 1-1, 2017.

- **COSTA, LUCAS R.**; RAMOS, GUILHERME N.; DRUMMOND, ANDRÉ C. . Leveraging adaptive modulation with multi-hop routing in elastic optical networks. *Computer Networks* (1999), v. 105, p. 124-137, 2016.

Publicações em Conferências

- **COSTA, LUCAS R.**; DRUMMOND, A. C. . Dynamic Multi-Modulation Allocation Scheme for Elastic Optical Networks. In: *COMMunication Systems & NETWORKS*, 2021, Bengaluru, India. 13th International Conference on *COMMunication Systems & NETWORKS*, 2021.
- **COSTA, LUCAS R.**; Barbosa Brasileiro, Ítalo ; DRUMMOND, A. C. . Low Margin QoT-Aware RMLSA with Circuit Invigoration in Elastic Optical Networks. In: *IEEE Global Communications Conference*, 2020, Taiwan. 2020 *IEEE Global Communications Conference*, 2020.
- **COSTA, L. R.**; BRASILEIRO, I. B. ; DRUMMOND, A. C. . Novo RMLSA com Tonificação de Circuito e ciente da Qualidade de Transmissão com Baixa Margem em Redes Ópticas Elásticas. In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2020, Rio de Janeiro. XXXVIII *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2020.
- SILVA, G. E. V. ; **COSTA, L. R.** ; DRUMMOND, A. C. . Classificador baseado em Aprendizado Profundo para identificação de estratégias de alocação de espectro em Redes Ópticas Elásticas. In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2020, Rio de Janeiro. XXXVIII *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2020.
- BRASILEIRO, ITALO BARBOSA ; **COSTA, LUCAS R.** ; DRUMMOND, ANDRE C. . Circuit Allocation with Strengthened Medium Core in Spatially-Multiplexed Elastic Optical Networks. In: *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2020, Bari. 2020 22nd International Conference on *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2020. p. 1.
- BRASILEIRO, ITALO BARBOSA ; **COSTA, LUCAS R.** ; SILVA, GUILHERME E. V. ; DRUMMOND, ANDRE C. . Empowering Hitless Spectral Defragmentation in Elastic Optical Networks with Spatial Multiplexing. In: *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2020, Bari. 2020 22nd International Conference on *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2020. p. 1.

- **COSTA, L. R.**; DRUMMOND, A. C. . Achieving energy efficiency and performance with auxiliary graph model in elastic optical networks. In: 2019 IEEE Global Communications Conference: Optical Networks and Systems (Globecom2019 ONS), Waikoloa, USA, December 2019.
- MIRANDA, M. H. R. ; SOUSA, L. S. ; **COSTA, L. R.** ; DRUMMOND, A. C. . Transferências de Dados em Massa Sensíveis ao Consumo Energético em Redes Ópticas Elásticas. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2019, Gramado. XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2019.
- **COSTA, L. R.**; DRUMMOND, A. C. . Eficiência Energética com Modelo de Grafo Auxiliar para Redes Ópticas Elásticas. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2018, Campos do Jordão. XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2018.
- SILVA, K. A. ; BRASILEIRO, I. B. ; **COSTA, L. R.** ; DRUMMOND, A. C. . Estudo Sobre o Uso de Métricas de Fragmentação de Espectro no Projeto de Algoritmos RSA. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2018, Campos do Jordão. XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2018.
- **COSTA, L. R.**; DRUMMOND, A. C. . Novo Esquema para Provisão de Modulação Adaptativa em Redes Ópticas Elásticas. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2017, Belém. XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2017.
- **COSTA, L. R.**; DRUMMOND, A. C. . Novo Algoritmo RMLSA com Roteamento Multihop em Redes Ópticas Elásticas. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2016, Salvador. XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2016.
- SOUSA, L. S. ; **COSTA, L. R.** ; RODOPOULOS, F. ; DRUMMOND, A. C. ; ALCHIERI, E. . Roteamento e Alocação de Espectro Ciente da Aplicação em Redes Ópticas Elásticas. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2016, Salvador. XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2016.
- **COSTA, L. R.**; SOUSA, L. S. ; RODOPOULOS, F. ; SILVA, K. A. ; SOUZA JUNIOR, P. J. ; DRUMMOND, A. C. . ONS: Simulador de Eventos Discretos para

Redes Ópticas WDM/EON. In: Salão de Ferramentas, 2016, Salvador. XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2016.

1.4 Demais Publicações

Publicações em Revistas

- Dalmazo, Bruno; Marques, Jonatas; **Costa, Lucas**; Bonfim, Michel; Carvalho, Ranyelson; Da Silva, Anderson; Fernandes, Stênio; Bordim, Jacir; Alchieri, Eduardo; Schaeffer-Filho, Alberto Egon; Paschoal Gaspar, Luciano; Cordeiro, Weverton. A Systematic Review on Distributed Denial of Service Attack Defense Mechanisms in Programmable Networks. *International Journal of Network Management*, 2021, (*artigo aceito para publicação*)
- CARVALHO, RANYELSON NERES ; **COSTA, LUCAS R.** ; BORDIM, JACIR LUIZ ; ALCHIERI, EDUARDO ADILO PELINSON . Enhancing an SDN Architecture with DoS Attack Detection Mechanisms. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, v. 5, p. 215-224, 2020.

Publicações em Conferências

- Carvalho, Ranyelson N. ; **COSTA, LUCAS R.** ; Bordim, Jacir L. ; Alchieri, Eduardo A. P. . DoSSec: A reputation-based DoS mitigation mechanism on SDN. *Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 2021, (*artigo aceito para publicação*).
- Carvalho, Ranyelson N. ; **COSTA, LUCAS R.** ; Bordim, Jacir L. ; Alchieri, Eduardo A. P. . New Programmable Data Plane Architecture Based on P4 OpenFlow Agent. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 1ed.: Springer International Publishing, 2020, v. , p. 1355-1367.
- da Silva, Jefferson Pereira ; Alchieri, Eduardo ; Bordim, Jacir ; **COSTA, LUCAS** . A Secure and Distributed Control Plane for Software Defined Networks. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 1ed.: Springer International Publishing, 2020, v. , p. 994-1006.
- **COSTA, LUCAS RODRIGUES**; NUNES, LUCAS SAAD N. ; BORDIM, JACIR LUIZ ; NAKANO, KOJI . Asterisk PBX Capacity Evaluation. In: 2015 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshop (IPDPSW), 2015, Hyderabad. 2015 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshop. p. 519-524.

1.5 Organização da Tese

Todos os estudos apresentados nessa Tese têm como característica principal a busca por soluções que promovam a eficiência energética nas redes ópticas elásticas (EON) no contexto operacional para redes de núcleo.

O Capítulo 2 introduz as redes ópticas elásticas, apresenta sua arquitetura, os problemas de engenharia de tráfego RSA e RMLSA, e as abordagens de agregação de tráfego e alocação de espectro com modulação adaptativa. Também é apresentado o modelo de gasto energético dos componentes EON e como ele pode ser aplicado.

O Capítulo 3 apresenta o estado da arte no contexto da eficiência energética EON. São classificados os principais estudos sobre o tema de acordo com suas características e técnicas propostas. Por fim, é apresentada uma revisão bibliográfica com as principais oportunidades de pesquisa existentes na literatura.

No Capítulo 4 uma abordagem RMLSA que utiliza técnicas de alocação de espectro com modulação adaptativa (AMLA) é proposta. A solução proporciona uma menor utilização do espectro, através do uso de níveis de modulação mais eficientes, ao mesmo tempo em que promove eficiência energética na rede. Os resultados indicam um ganho expressivo na taxa de bloqueio, desempenhando um papel importante na economia de espectro e energia em comparação com os demais esquemas da literatura.

O Capítulo 5 apresenta o desenvolvimento de três modelos de programação linear inteira para o problema RMLSA dinâmico. Inicialmente apresenta-se o problema RMLSA para redes transparentes sem agregação de tráfego. Em seguida, estende-se o problema RMLSA para redes translúcidas. Ao final, aumenta-se ainda mais a abrangência do problema ao adicionar as técnicas de agregação de tráfego em RMLSA translúcido dinâmico. Por fim, são apresentadas validações numéricas dos modelos propostos e suas complexidades de espaço e tempo.

O Capítulo 6 apresenta um algoritmo heurístico RMLSA que utiliza técnicas de agregação de tráfego elétrico e óptico (EG e OG) baseado em um modelo de grafo auxiliar para SBVT-EON translúcida dinâmica. Ainda são propostas três políticas de engenharia de tráfego, para ser utilizadas no grafo auxiliar, que visam reduzir o consumo energético da rede através de abordagens *Sleep Mode*.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as considerações finais mostrando um resumo dos resultados obtidos, os possíveis desdobramentos dos temas estudados e outras indicações para trabalhos a serem desenvolvidos no futuro.

Capítulo 2

Redes Ópticas Elásticas

Este capítulo apresenta os elementos básicos que compõem as redes ópticas elásticas. Ao final, é apresentado o modelo de consumo energético adotado pelas abordagens desenvolvidas nesta Tese seguido de uma nova métrica para a eficiência energética desenvolvida pelo autor.

2.1 Conceitos Básicos

As EONs têm como característica básica dividir os recursos espectrais em *slots* de frequência na forma de subportadoras OFDM, possibilitando diferentes formatos de modulação, taxas de dados e espectro de tamanhos variados. Nesse contexto, o objetivo da EON é atender uma demanda de tráfego em um canal de transmissão com tamanho apropriado. Dessa forma, pode-se expandir ou contrair este canal, quando necessário, de acordo com flutuações do tráfego ou novas requisições [37].

Nas redes ópticas tradicionais WDM, os canais de transmissão utilizam grades de frequência de tamanho fixo. As especificações do padrão ITU-T (*International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector*) estabelecem granularidades de 50 GHz por comprimento de onda para a acomodação dos canais de transmissão ópticos WDM [33]. A rigidez das redes WDM reduz a eficiência na transmissão do tráfego, impondo taxas de transferência fixa em cada comprimento de onda. Isso reduz a eficiência na utilização do espectro, uma vez que é necessário alocar uma grade inteira para acomodar uma demanda de tráfego, mesmo que ela seja inferior a capacidade de um comprimento de onda.

Tendo em vista a heterogeneidade das demandas de tráfego devido ao advento de aplicações emergentes, tratar adequadamente estas demandas é um desafio. São necessárias redes flexíveis e adaptáveis equipadas com elementos que possam se adaptar às demandas heterogêneas do tráfego.

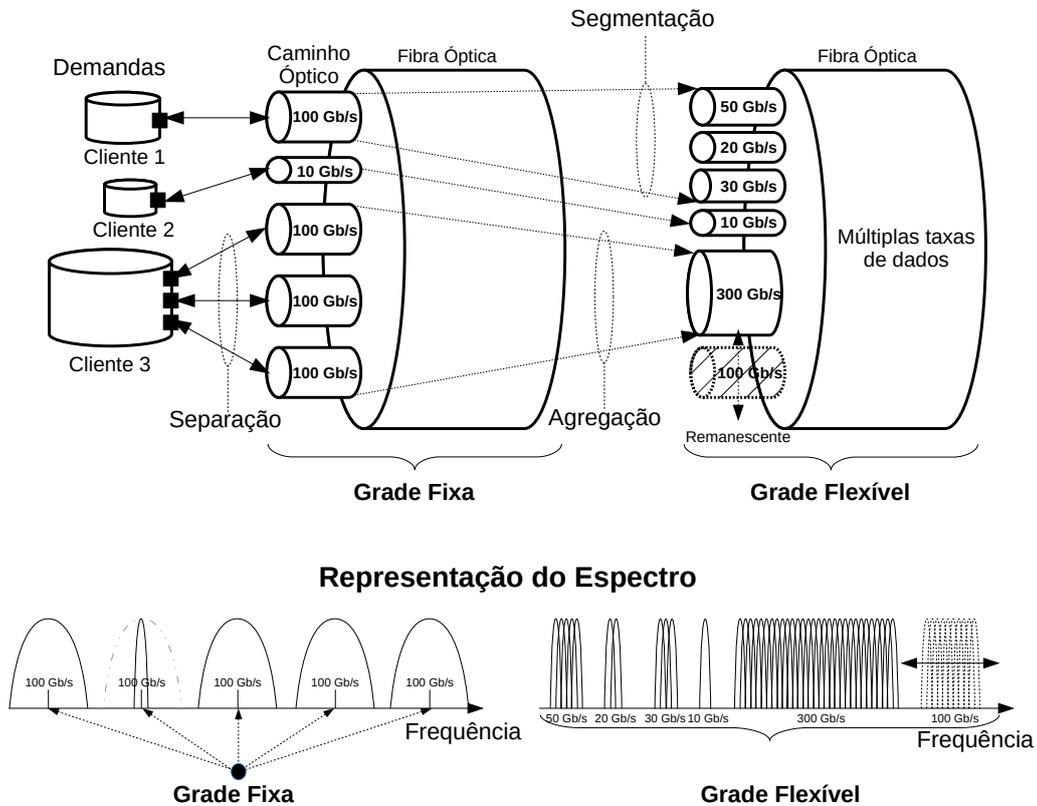


Figura 2.1: Comparação entre os caminhos ópticos de redes com grades fixa e flexível.

A Figura 2.1 apresenta as principais diferenças entre as técnicas de alocação de caminhos ópticos com grade fixa (à esquerda) e flexível (à direita), tanto com uma representação esquemática (acima) quanto da utilização do espectro (abaixo). Na grade fixa, a faixa de frequência do espectro utilizado é única independentemente da taxa de transmissão requisitada pelo cliente. Na grade flexível essa faixa de frequência é adaptável de acordo com a demanda requisitada. Desta forma, na grade fixa, cada demanda de tráfego é alocada em uma grade inteira, mesmo que ela seja inferior a capacidade de um comprimento de onda. Isso provoca o uso ineficiente dos recursos espectrais, pois mesmo que a demanda seja menor que à capacidade de acomodação de um comprimento de onda, ele será utilizado por completo, como, por exemplo, a demanda do “Cliente 2” (vide alocação no espectro). Caso a demanda seja maior que a capacidade de um comprimento de onda, na grade fixa, ela é separada e transmitida por comprimentos de ondas distintos, sendo visto pela rede óptica como conexões diferentes, como ocorre com a demanda do “Cliente 3”.

De outra forma, na grade flexível, a demanda do “Cliente 1”, por exemplo, poderia

ser segmentada através de três caminhos ópticos distintos. Por outro lado, a demanda do “Cliente 3” poderia ser agregada em um único caminho óptico. Este novo arranjo de circuitos no espectro garantiria uma faixa de frequência remanescente capaz de atender um novo caminho óptico de, por exemplo até 100 Gb/s, considerando a banda passante disponível e a mesma modulação dos demais circuitos, como mostra o trecho hachurado na Figura 2.1.

A partir dessas limitações, surgiu o interesse em uma arquitetura de rede óptica com canais de transmissão sem grades de frequência de tamanho fixo, ou seja, grades de frequência que ofereçam tamanhos flexíveis ou ajustáveis de acordo com as demandas acomodadas [38].

2.2 Arquitetura EON

Para atender às necessidades futuras de tráfego da Internet são necessárias redes flexíveis equipadas com elementos que possam se adaptar às demandas heterogêneas do tráfego. Uma nova arquitetura de rede óptica tem sido amplamente difundida na literatura [38]. As EONs devem possuir taxa de dados flexíveis com alta eficiência no uso dos recursos.

O objetivo de uma EON é prover o transporte eficiente de dados através do uso de um algoritmo de roteamento e alocação de espectro [37]. Nesta rede, os recursos espectrais necessários para uma dada rota são subdivididos do total disponível e alocados adaptativamente ao caminho óptico. Para a implementação desta arquitetura, diferentes dispositivos são necessários.

A arquitetura EON é composta por transmissores de largura de banda variável, denominados BVTs (*Bandwidth-Variable Transponder*), por comutadores ópticos de banda variável, denominados BV-OXC (*Bandwidth Variable Optical Cross-Connects*) e por amplificadores ópticos, denominados OLA (*Optical Line Amplifier*). Estes são os dispositivos que permitem o estabelecimento de caminhos ópticos com grade flexível [37]. Sua arquitetura pode ser observada na Figura 2.2.

Pode-se observar na Figura 2.2 que os BVTs/SBVTs são responsáveis por estabelecer os caminhos ópticos e localizam-se na borda da rede. Por outro lado, os BV-OXCs e OLAs são responsáveis por estabelecer o caminho óptico fim-a-fim e localizam-se no núcleo da rede [37].

2.2.1 BVT/SBVT

Os BVTs são responsáveis por alocar espectro suficiente para acomodar cada demanda. Várias subportadoras OFDM podem ser fundidas para formar um canal para transporte de dados. Este canal, também denominado de caminho óptico, pode transmitir múltiplas

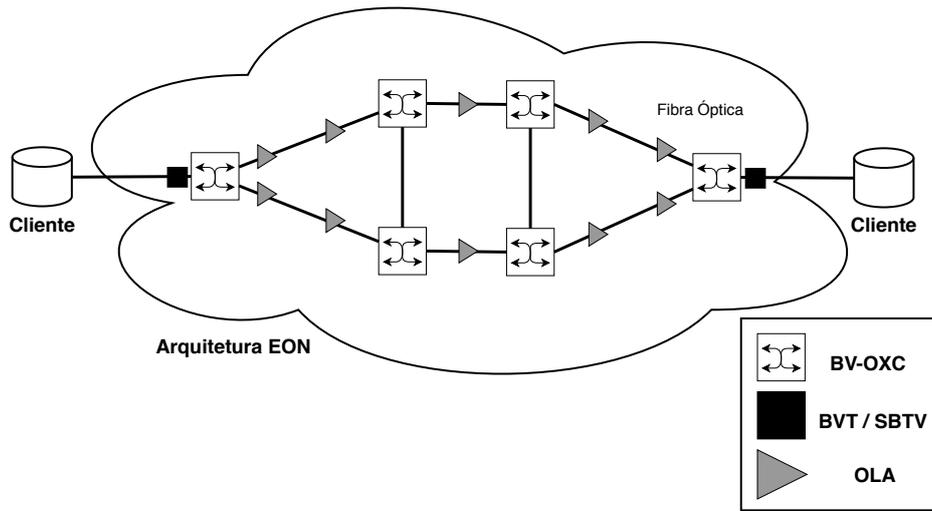


Figura 2.2: Arquitetura das redes ópticas elásticas (EON).

taxas de dados, pois seu tamanho é alocado mediante o ajuste do número de subportadoras utilizadas. Através do arranjo da luz com diferentes frequências de oscilação é possível controlar o número de subportadoras utilizadas em cada caminho óptico. Dessa forma, os BVTs criam caminhos ópticos com largura de banda flexível permitindo o ajuste dos recursos ópticos de acordo com a demanda necessária [39].

A Figura 2.3 apresenta um exemplo de provisionamento de largura de banda elástica no domínio do espectro. O OFDM permite que subportadoras adjacentes possam se sobrepor no espectro devido à sua ortogonalidade, dessa forma, elasticidade da banda é controlada através do número de subportadoras utilizadas no canal. A taxa de transmissão aumenta à medida que mais subportadoras são utilizadas [37, 40, 34].

É importante destacar que os BVTs possuem uma limitação na quantidade máxima de subportadoras utilizadas. Quando esta capacidade não é totalmente utilizada seus recursos são desperdiçados [19]. Isso acontece quando uma demanda de baixa capacidade é atribuída a um BVT. Tendo em vista este problema, a literatura apresentou os SBVTs (*Sliceable Bandwidth-Variable Transponder*) como uma tecnologia promissora para os novos transmissores EON [41, 42].

Uma EON com SBVT habilitados é chamada de SBVT-EON [43, 44]. Em uma SBVT-EON, os SBVTs são capazes de alocar uma ou várias demandas de tráfego para um ou múltiplos destinos. Dessa forma, é possível que um SBVT seja utilizado para gerar um caminho óptico de baixa largura de banda (poucas subportadoras) e sua capacidade não utilizada pode ser explorada para a transmissão de outros caminhos ópticos independentes [45]. A Figura 2.4 mostra a distinção das funcionalidades dos BVTs e dos SBVTs.

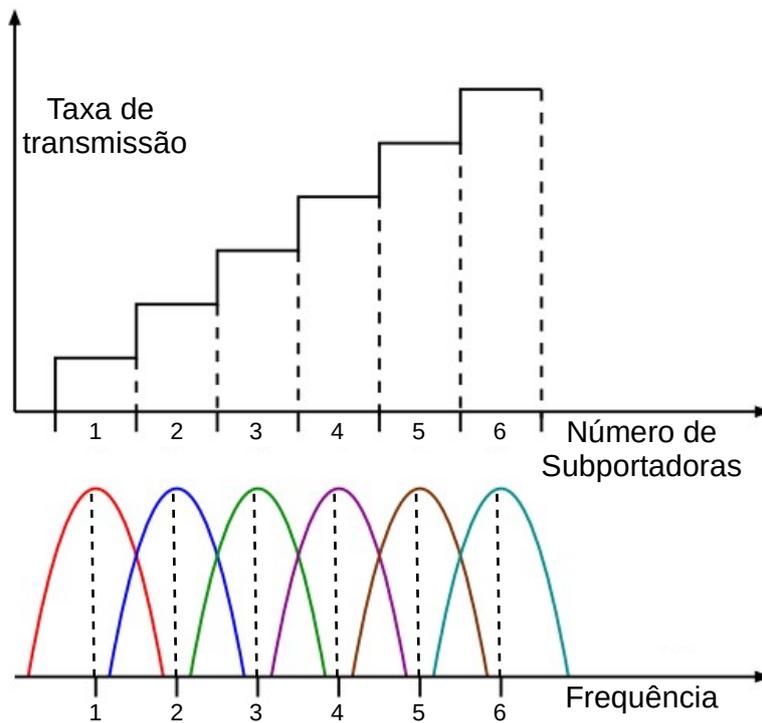


Figura 2.3: Provisionamento de largura de banda no domínio do espectro.

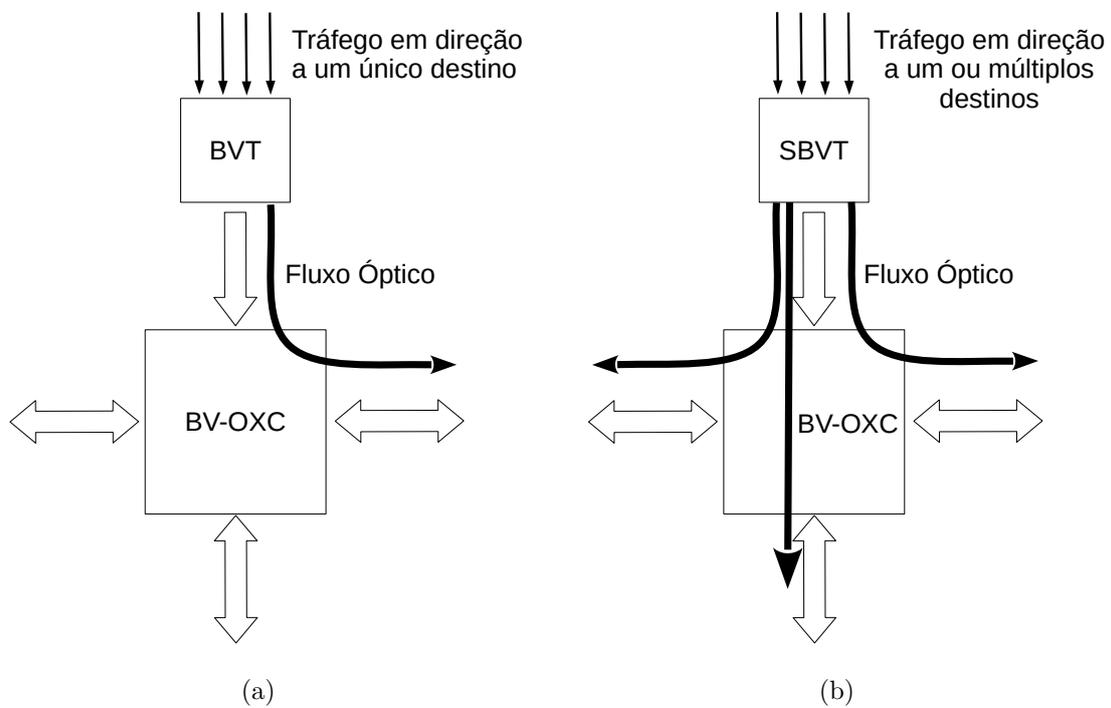


Figura 2.4: Comportamento da direção do tráfego em um BVT e SBVT.

Do ponto de vista das camadas superiores, um SBVT pode ser visto como um BVT de alta capacidade ou como uma coleção de vários BVTs de baixa capacidade logicamente/virtualmente independentes, dependendo do modo de operação [46].

A quantidade de caminhos ópticos independentes que cada SBVT é capaz de estabelecer dependerá do tipo utilizado e de sua capacidade máxima de subportadoras empregadas. A literatura divide os SBVTs em dois tipos: *Fully SBVT* (F-SBVT) e *Partially SBVT* (P-SBVT) [47]. Para o primeiro, a quantidade máxima de caminhos ópticos alocados é igual a sua capacidade máxima de subportadoras. Por exemplo, um F-SBVT com capacidade de 20 subportadoras poderia no máximo estabelecer 20 caminhos ópticos independentes, cada um com apenas uma subportadora de largura de banda. Para os P-SBVTs, o conceito de sub-transmissor é associado. Dessa forma, a quantidade máxima de caminhos ópticos independentes que um P-SBVT é capaz de alocar está limitado ao número de sub-transmissores que este P-SBVT possui [47].

Em geral, a literatura atribui o conceito amplo de SBVT aos F-SBVTs e ignora a quantidade de sub-transmissor por SBVT. As demais abordagens apresentadas nesta **Tese** consideram SBVTs como F-SBVTs. Portanto, um SBVT pode gerar múltiplos fluxos ópticos que podem ser flexivelmente associados a fluxos oriundos de camadas superiores, de acordo com a exigências do tráfego da rede [36].

2.2.2 BV-OXC

Os BV-OXCs, são os elementos responsáveis por estabelecer um caminho óptico fim-a-fim com a largura de banda necessária para acomodar os recursos espectrais estabelecidos pelos BVTs/SBVTs. Quando os transmissores aumentam a taxa do tráfego, cada BV-OXC na rota deve expandir sua janela de comutação, permitindo assim uma taxa de dados variável em cada caminho óptico [39].

O tradicional filtro seletivo de comprimento de onda WSS (*Wavelength-Selective Switch*) utilizados nos OXCs (*Optical Cross-Connects*) das redes WDM tradicionais não é capaz de atender as exigências das EONs, pois o WSS foi projetado para um espaçamento de canal fixo [48]. O *Bandwidth-Variable Spectrum-Selective Switch* (BV-SSS) é o filtro capaz de atender as exigências deste novo paradigma. Sua tecnologia permite agrupar granularidades de comutação próximas, acomodando a largura do canal de maneira flexível, como pode ser visto na Figura 2.5 [37].

Através dos BV-SSSs um BV-OXC pode ser construído por meio de dois tipos de arquitetura: (i) difusão e seleção (*broadcast-and-select*) [37] ou (ii) não difusão e seleção (*non-broadcast-and-select*) [49]. A estrutura do BV-OXC precisa dar suporte a algumas características, dentre elas destacam-se a retirada e inclusão para todos os comprimentos de onda (*colorless*); a retirada e inclusão para qualquer comprimento de onda em qualquer

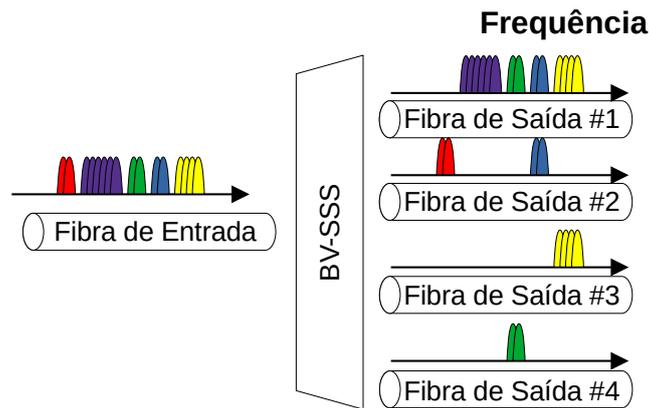
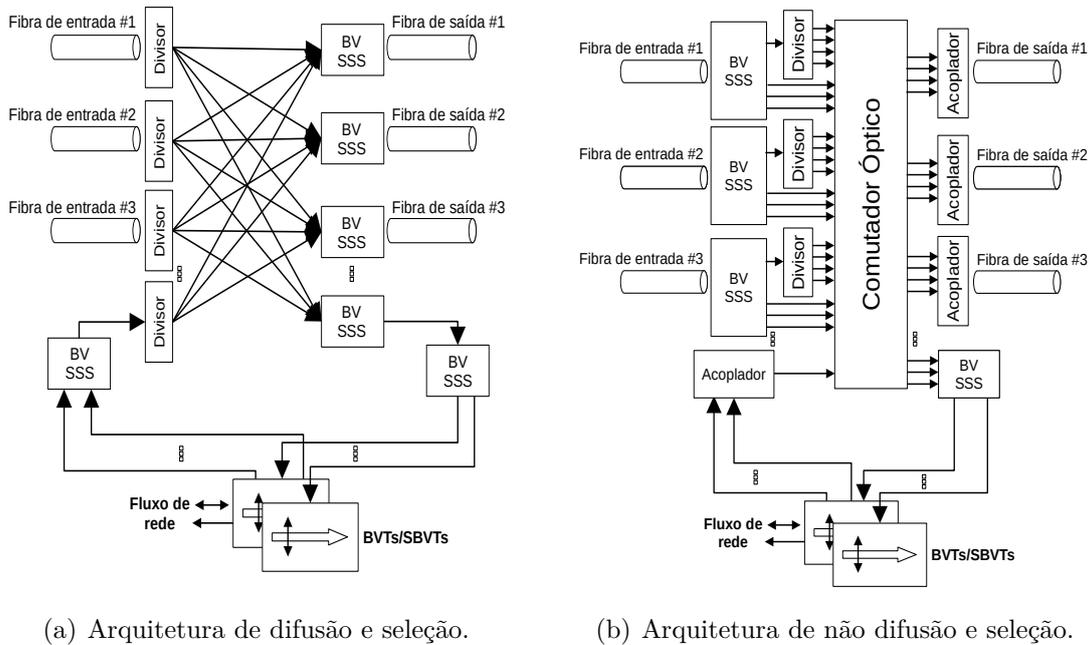


Figura 2.5: Representação do BV-WSS.

direção (*directionless*); e a retirada e inclusão de um mesmo comprimento de onda para diferentes direções (*contentionless*) [50]

A Figura 2.6 mostra essas duas abordagens. Na arquitetura de difusão e seleção (Figura 2.6(a)) os sinais de entrada são transmitidos para todas as portas de saída e os canais adequados são selecionados em cada porta de saída através do filtro BV-SSS. Na arquitetura de não difusão e seleção (Figura 2.6(b)) os sinais de entrada são demultiplexados pelo BV-SSS e então comutados para as diferentes portas de saída utilizando conexões cruzadas ópticas, combinadas por um acoplador na porta de saída.



(a) Arquitetura de difusão e seleção.

(b) Arquitetura de não difusão e seleção.

Figura 2.6: Arquitetura de um BV-WXC: a) arquitetura de difusão e seleção; b) arquitetura de não difusão e seleção.

2.2.3 OLA

Os amplificadores ópticos OLAs são colocados ao longo da fibra óptica, em geral, a um espaçamento igual (em cada direção da fibra). A literatura costuma dizer que este espaçamento é cerca de 80 km [34, 51]. Seu objetivo é amplificar o sinal óptico, sem a necessidade de conversão para o domínio elétrico. Portanto, os OLAs são considerados equipamentos puramente ópticos [22].

Os amplificadores ópticos são utilizados para compensar as perdas de potência do sinal óptico inserido pelos BV-OXC nas fibras. A amplificação óptica é geralmente realizada por amplificadores de fibra dopada com Érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifier* – EDFA) [52]. No momento da amplificação, esses EDFAs introduzem ruído devido à Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* – ASE).

Em geral, os EDFAs trabalham com o princípio de estimulação da emissão de fótons. Em um EDFA, uma fibra óptica é dopada com érbio no núcleo bombeada com luz de diodos de laser (LD). A Figura 2.7 mostra a configuração de um EDFA. O sinal de entrada é combinado com a luz da bomba por um acoplador OFDM e lançado para o EDF (*Erbium-Doped Fiber*). A luz da bomba lançada para o EDF cria inversão da população e o sinal de entrada é amplificado pela emissão estimulada. Os isoladores são colocados na entrada e na saída, com o objetivo de estabilizar a amplificação do sinal, eliminando a reflexão traseira indesejada da porta de saída e evitando que o amplificador opere como um laser.

O nivelamento do ganho do amplificador é realizado por um filtro de equalização de ganho (*Gain Equalization Filter* – GEF) nos isoladores. Nesta configuração, o comprimento de onda da bomba LD é travado próximo ao comprimento de onda da absorção de pico do érbio (por uma rede de Bragg de fibra externa), a faixa de comprimento de onda é normalmente de 980 nm [53, 54].

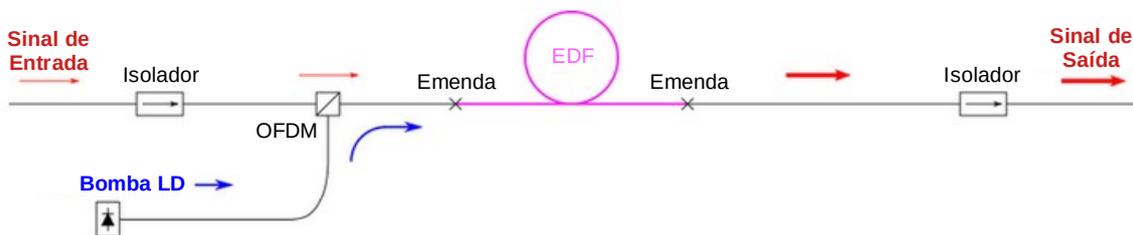


Figura 2.7: Funcionamento de um EDFA.

2.3 Modelo de Representação de Espectro em EON

O CO-OFDM (*Coherent Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) [55] é a tecnologia que viabiliza a formação de subportadoras ópticas de baixa velocidade e permite a flexibilidade das EONs. Estas subportadoras são combinadas ortogonalmente podendo gerar canais de transmissão de tamanho flexível [38]. A literatura adotou a tecnologia CO-OFDM devido ao seu grande sucesso nas comunicações de rede sem fio [39]. Neste sentido o O-OFDM (*Optical-OFDM*) [34] tornou-se a tecnologia capaz de alcançar a eficiência e a flexibilidade desejada pelas aplicações de rede emergentes.

Nas EONs que utilizam a tecnologia O-OFDM, o espectro disponível na fibra óptica é subdividido em subcanais, ou *slots*, que representam cada subportadora OFDM. Basicamente existem duas formas de tornar o espectro flexível: O modelo de representação sem grade (Figura 2.8(a)) e o modelo de representação com grade (Figura 2.8(b)), também chamado de SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*) [39].

No primeiro, a largura de banda do espectro óptico é formada “exatamente” no tamanho da demanda requisitada [37]. As frequências centrais dos caminhos ópticos podem ser atribuídas de forma totalmente flexível desde que uma banda de guarda (por exemplo, 25 GHz) seja mantida entre dois caminhos ópticos adjacentes. Devido às limitações físicas dos componentes ópticos, a segunda abordagem (SLICE) foi proposta. Nesta, o espectro é subdividido em grades fixas com granularidades iguais (por exemplo, 12,5 GHz) [37]. Em relação à primeira abordagem, perde-se um pouco de flexibilidade do espectro, contudo, os autores em [56] mostraram que com granularidades suficientemente pequenas, o desempenho do SLICE é semelhante ao modelo de representação sem grades.

Com o propósito de manter a compatibilidade do padrão G.694.1 da ITU-T [57] a literatura adotou o padrão de 12,5 GHz como granularidade padrão utilizada na grande maioria dos trabalhos [20, 37]. Com o modelo de representação SLICE, caminhos ópticos elásticos são transmitidos por uma combinação arbitrária de *slots* contíguos (subportadoras adjacentes ortogonais) que transmitem uma taxa de dados de acordo com o número de *slots* utilizados.

Uma característica particular das subportadoras OFDM é a escolha do número de *bits* por símbolo modulados para cada subportadora. Isto também proporciona um ajuste flexível da largura de banda na subportadora alocada, o que aumenta ainda mais a flexibilidade e a eficiência de uma EON [39, 34]. O conceito de alocação de espectro com modulação adaptativa em EON (AMLA) advém do formato de modulação utilizado em cada subportadora OFDM. Em particular, cada subportadora OFDM pode ser modulada individualmente (com um transmissor diferente) para a transmissão de dados [58]. Isto significa que cada caminho óptico deve ser modulado por um BVT/SBVT diferente.

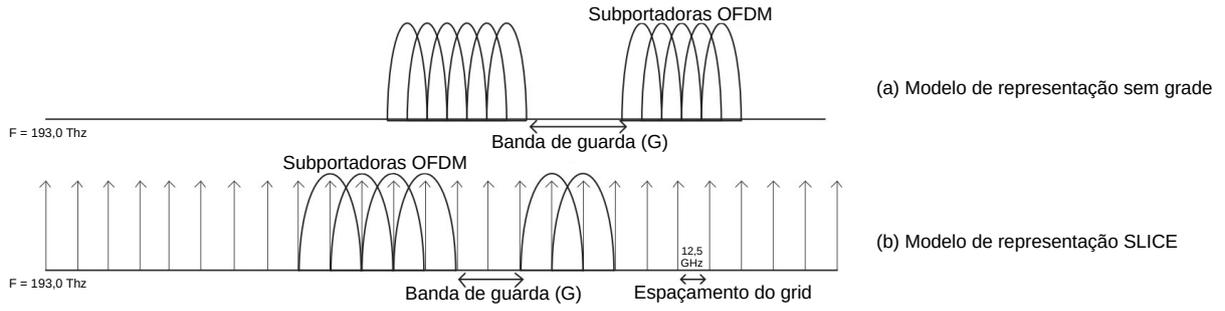


Figura 2.8: Modelos de representação do espectro EON.

Com o advento da arquitetura SBVT-EON, cada caminho óptico é modulado por um sub-transmissor diferente, contudo, para garantir a ortogonalidade, os caminhos ópticos alocados em um SBVT devem utilizar o mesmo formato de modulação [29, 58, 59].

A banda passante de um circuito óptico está, portanto, relacionada ao tamanho do espectro de cada subportadora OFDM e sua modulação adotada. A Equação 2.1 apresenta essa relação.

$$B = \frac{C}{\log_2 M} \quad (2.1)$$

em que, B é a largura de banda do espectro da subportadora OFDM em GHz, C é a taxa de dados em Gb/s e M é o nível de modulação M-QAM ou M-PSK adotada. Portanto, M é o número de fases/níveis usados para codificar um determinado número de *bits* por símbolo. Quanto maior o número de fases da modulação, maior será a banda passante da subportadora OFDM. Por exemplo, a modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) representa o valor de $M = 2$, logo tem-se 1 bit por símbolo. Se o valor de B for igual a 12,5 GHz, então $C = 12,5 \text{ Gb/s}$. Isso significa que cada subportadora OFDM será capaz de trafegar 12,5 Gbps na modulação BPSK.

Um caminho óptico formado por múltiplas subportadoras multiplicará esta banda pela quantidade de subportadoras alocadas. Por exemplo, um caminho óptico com 4 *slots* em BPSK transmite 50 Gb/s ($4 \times 12,5 \text{ Gb/s}$) enquanto um caminho óptico com 2 *slots* em QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), $M = 4$, tem a mesma taxa de transmissão.

A escolha do nível de modulação deve levar em consideração a qualidade necessária de transmissão (*Quality of Transmission (QoT)*), e, conseqüentemente, a tolerância de relação sinal-ruído óptico (*Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR)*) [39, 34]. Uma abordagem comum utilizada pela literatura é que a distância de transmissão do caminho óptico é o fator mais relevante na definição da QoT [51, 60, 61], embora a qualidade do canal de transmissão também influencie [62, 63]. Esta definição leva em consideração a quantidade de amplificadores ópticos (OLAs) percorridos pelo *laser* na fibra óptica, uma vez que estes

têm o principal impacto na relação sinal ruído (*Optical Signal-to-Noise Ratio* – OSNR) do nível de modulação adotado [64].

Neste contexto, o número de subportadoras e o formato de modulação utilizado é ajustável de acordo com a quantidade de tráfego e o alcance óptico requisitado pelo fluxo [39]. Quanto maior for o nível da modulação (M), maior será a taxa de transmissão da subportadora OFDM, em contrapartida, menor será sua robustez. Quanto menor a robustez, menor será o alcance máximo de acordo com a tolerância OSNR e o fator QoT. Portanto, dado o tamanho de um caminho óptico, pode-se encontrar o nível de modulação mais adequado e obter a melhor eficiência de espectro sem afetar a qualidade de transmissão.

Transmissões através de caminhos ópticos mais curtos são capazes de utilizar níveis de modulação mais altos (menos robustos) e conseqüentemente carregam mais *bits* por símbolo por subportadora OFDM. A Tabela 2.1 mostra a relação do tamanho da subportadora, capacidade e distância máxima de transmissão para diferentes formatos de modulação, de acordo com a literatura [34, 51, 65].

É importante destacar que o alcance tolerável de cada formato de modulação diverge bastante na literatura e eventuais regeneradores de sinal ampliam ainda mais o alcance máximo tolerável. Além disso, o alcance da modulação segue a lei da meia distância [60] que indica que a distância máxima de transmissão diminui pela metade à medida que o nível de modulação aumenta [34, 66]. Outros parâmetros relacionados às características dos BVTs (transceptor/receptor), interferências não lineares e demais deficiências da camada física, também afetam a QoT e, portanto, a escolha do nível de modulação [64, 67]. No entanto, esse cenário está fora do escopo desta **Tese** e são mais bem explorados em outros artigos do autor [64, 68].

Tabela 2.1: Relação do tamanho de espectro, largura de banda e distância máxima de transmissão de subportadoras OFDM.

Formato de Modulação	Capacidade da subportadora (Gb/s)	Distancia de Transmissão (km)
BPSK	12,5	8000
QPSK	25,0	4000
8QAM	37,5	2000
16QAM	50,0	1000
32QAM	62,5	500
64QAM	75	250

As estratégias para alocação dos recursos EON e os tipos de requisições de tráfego determinam o desempenho no atendimento das demandas da rede. Todas essas caracte-

rísticas abrem margem para diferentes configurações no cenário de engenharia de tráfego EON.

2.4 Engenharia de Tráfego EON

A criação de caminhos ópticos é realizada através da engenharia de tráfego, que administra a rede por meio de um plano de controle que controla os fluxos de tráfego e procura maximizar o desempenho da rede. Um plano de controle desempenha as funções de administração, configuração, estabelecimento e encerramento das conexões. Um dos principais procedimentos executados pelo plano de controle das redes de núcleo óptico é a execução de um algoritmo de roteamento e alocação de caminhos ópticos. O plano de controle precisa conhecer o estado da rede e as restrições ao usar certos recursos da rede.

A seguir são apresentadas as estratégias de alocação para satisfazer as solicitações de tráfego e as restrições de continuidade, contiguidade e distância de transmissão de problemas RSA e RMLSA e a sua análise de complexidade assintótica. Em seguida, apresenta-se os conceitos de agregação de tráfego, roteamento em múltiplos saltos, em múltiplos caminhos e cenários de tráfego estático e dinâmico.

2.4.1 Roteamento e Alocação de Espectro (RSA/RMLSA)

Nas redes WDM tradicionais, o problema de alocação de espectro era solucionado através de algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de ondas (*Routing and Wavelength Assignment* – RWA). Para as EONs, estes algoritmos não são mais diretamente aplicáveis, são necessários novos mecanismos para o roteamento e alocação de espectro. Devido às novas restrições impostas pela tecnologia OFDM, surgiram os algoritmos RSA [37, 69].

No problema RSA, as subportadoras, pertencentes ao mesmo caminho óptico, devem ser roteadas de forma contígua e contínua utilizando a mesma faixa de espectro para todos os enlaces da rota. Os caminhos ópticos adjacentes devem ser separados por uma banda de guarda para evitar efeitos de interferência e atender às restrições da tecnologia OFDM.

O conceito das restrições de continuidade e contiguidade do problema RSA é exemplificado na Figura 2.9. Considere uma EON com 4 nós e a chegada de uma solicitação de tráfego que requer uma taxa de bits equivalente a 3 subportadoras OFDM, aqui representadas como *slots*. Supondo que esta solicitação tenha origem no “nó *a*” e destino no “nó *d*” a conexão não pode ser estabelecida pelo caminho mais curto $a \rightarrow c \rightarrow d$ porque o *link 1* e o *link 2* não possuem três *slots* contíguos que são contínuos e, portanto, não atende as restrições do problema RSA. Por outro lado, as restrições de continuidade e

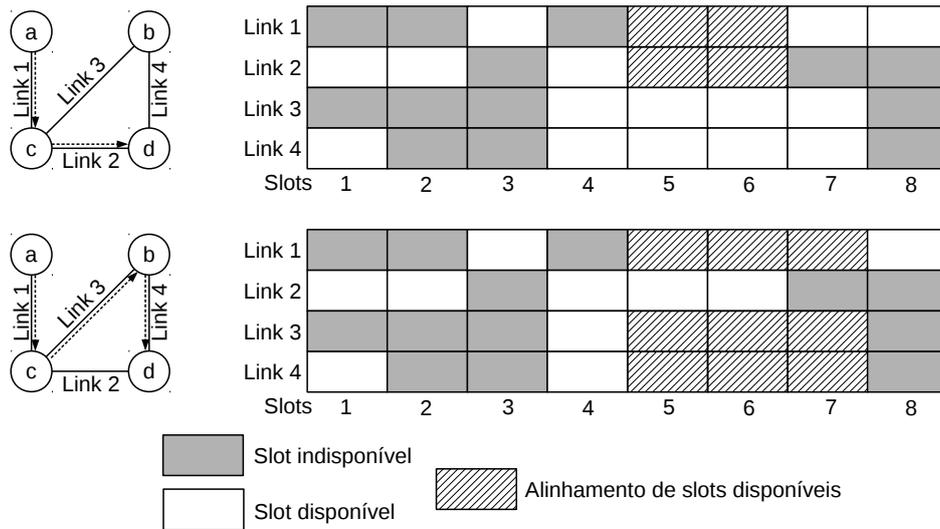


Figura 2.9: Exemplificação do problema RSA.

contiguidade são satisfeitas se o caminho óptico que atender esta solicitação utilizar a rota $a \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow d$ e os slots 5, 6 e 7.

Se a arquitetura EON, por meio de seus transmissores (BVT/SBVT), fornecer a flexibilidade adicional na seleção do formato de modulação das subportadoras, então abordagens AMLA podem ser utilizadas. O problema RSA transforma-se no problema RMLSA, que introduz um grau extra na flexibilidade das operações de engenharia de tráfego EON e, ao mesmo tempo, uma maior complexidade no problema de alocação de espectro [34]. No problema RMLSA, cada demanda é mapeada para um nível de modulação com base na taxa de dados solicitada e na distância do caminho pelo qual ela é roteada. A principal diferença entre o RSA e o RMLSA é que o nível de modulação adotado no circuito óptico é usado para determinar o número de subportadoras necessárias para atender a demanda de tráfego. Para isso, leva-se em consideração a taxa de dados do nível de modulação e a distância percorrida pela luz entre a origem e o destino do caminho óptico.

O conceito AMLA e o problema RMLSA é exemplificado na Figura 2.10. Considere uma EON com 4 nós e a chegada de uma solicitação de tráfego que requer uma taxa de bits equivalente a 75 Gb/s. Supondo que esta solicitação tenha origem no “nó a ” e destino no “nó c ”, haveria duas possibilidades para atender a demanda, a rota $a \rightarrow b \rightarrow c$ representada pelo caminho óptico “LP-1”, e a rota $a \rightarrow d \rightarrow c$ representada pelo caminho óptico “LP-2”. É importante notar que os tamanhos dos enlaces são diferentes e conseqüentemente a distância percorrida pela luz nos caminhos ópticos. Assim, o LP-1 pode utilizar o formato de modulação QPSK, uma vez que só irá percorrer 3000 km. Por outro lado, caso seja escolhido o LP-2, será necessário utilizar o formato de modulação

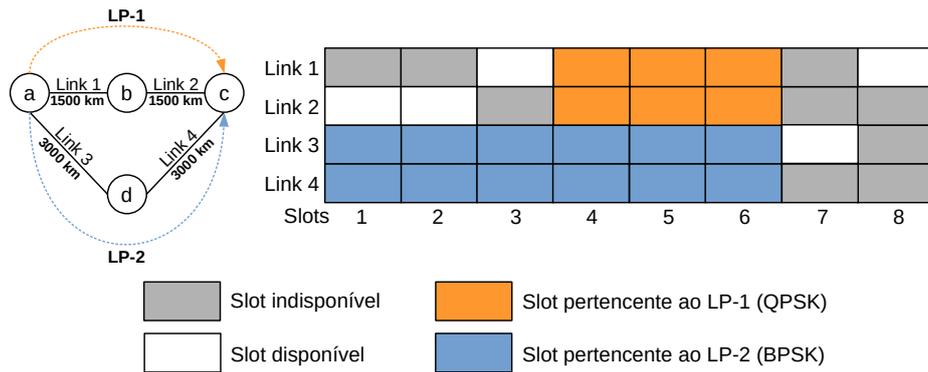


Figura 2.10: Exemplificação do problema RMLSA.

BPSK, já que este caminho irá percorrer 6000 km. Ambos os caminhos ópticos irão ter uma taxa de transmissão de 75 Gb/s, contudo o caminho óptico LP-2 ocupará o dobro de largura de banda.

Obviamente, os algoritmos de engenharia de tráfego irão buscar sempre a eficiência. Se o objetivo for a economia e espectro, a escolha óbvia seria utilizar o LP-1. Contudo, se o objetivo for fragmentar menos a rede, economizar energia, utilizar modulações mais robustas para uma melhor QoT ou etc., a escolha não parece óbvia, principalmente se considerado um cenário de tráfego dinâmico.

NP-Completo do problema RSA/RMLSA

Tendo em vista que as escolhas do problema de roteamento e alocação de espectro (RSA/RMLSA) não são uma tarefa fácil, a análise teórica da literatura mostrou que independente do problema ser RSA ou RMLSA, ambos pertencem à classe de problemas NP-Completo [70].

Na teoria da complexidade computacional, a classe de problemas NP (*Non-Deterministic Polynomial time*) denota o conjunto de problemas que são decidíveis em tempo polinomial por uma máquina de Turing não-determinística. Pode-se dizer também que é o conjunto de problemas de decisão que podem ter seu certificado verificado em tempo polinomial por uma máquina de Turing determinística [71]. Problemas do tipo NP-Completo é o subconjunto dos problemas NP de tal modo que todo problema em NP pode ser reduzido a um problema NP-Completo. Portanto, se fosse possível encontrar uma maneira de resolver qualquer problema NP-completo em tempo polinomial, com uma máquina de Turing determinística, então poderia-se resolver todos os problemas NP rapidamente. Na prática, saber que um problema é NP-Completo evita o desperdício de tempo procurando

uma solução que resolva o problema em tempo polinomial, uma vez que este algoritmo “pode” não existir (caso $P \neq NP$) [70, 71].

Segundo a literatura EON, os problemas RSA e RMLSA são do tipo NP-Completo. Inicialmente, os autores em [72], provaram que o problema RSA era um problema do tipo NP-Difícil, que por sua vez, trata-se de uma classe de problemas ainda mais complexa que os problemas NP-Completo. Especificamente, qualquer problema NP pode ser reduzido a classe de problemas NP-Difícil em tempo polinomial, mas esse problema não é necessariamente um problema NP. Ou seja, mesmo que um dia exista um algoritmo polinomial para os problemas NP-Completo, o problema NP-Difícil ainda não pode ser resolvido por este algoritmo, uma vez que ele não é necessariamente um problema NP.

Provar que um problema é NP-Difícil é parte da prova de mostrar que ele é NP-Completo, portanto em [34], os autores mostram que o problema RMLSA é NP-Completo. Como o problema RSA é facilmente reduzível ao problema RMLSA, então ele também é NP-Completo [70]. A Figura 2.11 mostra a relação desses conjuntos por meio de um diagrama de Venn. Note que problemas em P, são os problemas que são resolvidos em tempo polinomial por um máquina de Turing determinística [71].

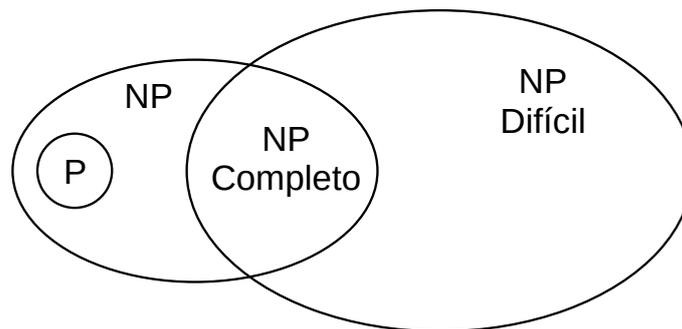


Figura 2.11: Relação dos problemas P e NP.

A seguir é apresentado porque o problema de roteamento e alocação de espectro EON faz parte da classe de problema NP-Completo. Foi tomado como base da prova os artigos [34, 72] e [70]:

Prova de NP-Completo do problema RMLSA

Pode-se reduzir o problema de roteamento e alocação de espectro para o problema MSP (*Multiprocessor Scheduling Problem*). O problema MSP é um problema NP-Completo conhecido. Uma instância do problema MSP inclui um conjunto de tarefas $t_i \in T, i = 1, 2, \dots, n$ independentes e indivisíveis, um conjunto de processos $m_j \in M, j = 1, 2, \dots, k$, e uma função de tempo $w(t_i, m_j) \in \mathbb{Z}^+$ para cada tarefa t_i quando executado o processo m_j .

O problema em questão é encontrar o tempo mínimo que estes processos precisam para completar todas as tarefas. A solução do problema MSP é um agendamento das tarefas $t_i \in T$, isto é, uma função $f : T \rightarrow M$ que mapeia todas as tarefas t_i nos processos m_j . O objetivo é minimizar o tempo entre o início e o fim da execução de todas as tarefas $\in T$.

Para resolver o MSP como um problema RMLSA pode-se construir o problema MSP da seguinte maneira:

- (i) Dado o conjunto de conexões $t_i \in T, i = 1, 2, \dots, n$, em que cada t_i tem seu nó de origem s_i e seu destino d . Um conjunto de subportadoras $m_j \in M, j = 1, 2, \dots, k$, em que m_j representaria uma ou mais subportadoras contínuas e contíguas OFDM. A capacidade requerida Λ_{t_i} de cada conexão seja em função de $w(t_i, m_j)$ subportadoras através do caminho $p_{ij}(s_i \rightarrow m_j \rightarrow d)$. Assumindo que o formato de modulação da conexão t_i sobre o caminho p_{ij} é representado pela capacidade $\Lambda_{t_i}/w(t_i, m_j)$ de cada subportadora.
- (ii) A solução para este problema é dada por uma função $f : T \rightarrow M$ que mapeia conexões t_i em subportadoras m_j , tal que m_j representaria os índices das subportadoras da demanda t_i , que mapeia uma conexão em subportadoras contínuas e contíguas da rede. O objetivo é minimizar o número de subportadoras m_j utilizadas atendendo as restrições de continuidade e contiguidade de espectro.

Pode-se observar que o problema RMLSA é uma solução para o correspondente MSP. Dessa forma, como o problema MSP é um problema NP-Completo e foi reduzido para o problema RMLSA, conclui-se que o problema RMLSA é NP-Completo e consequentemente o problema RSA também.

2.4.2 Agregação Elétrica

Em uma EON que utiliza o modelo de representação do espectro SLICE, demandas de tráfego com baixas taxas de bits ainda podem desperdiçar recursos se esta precisar de menos largura de banda do que o disponível em uma subportadora OFDM [73, 74].

Embora os transmissores (BVT/SBVT) possam ajustar dinamicamente a largura de banda oferecida em um caminho óptico, no SLICE, seu ajuste é sempre um valor múltiplo da largura de banda de uma subportadora OFDM. Levando em consideração que a taxa de transmissão ainda depende do formato de modulação aplicado na subportadora, as chances de as demandas de tráfego não coincidirem com a taxa de transmissão dos caminhos ópticos é enorme. Além disso, várias dessas demandas podem produzir uma quantidade significativa de bandas de guarda, levando ao desperdício do espectro [74].

Para resolver esses problemas, abordagens de agregação de tráfego elétrico (*Electrical Grooming* – EG) foram propostas para as EONs [75]. Na agregação elétrica, solicitações de tráfego de baixa velocidade são agregadas em caminhos ópticos através da multiplexação de camada elétrica. Esta abordagem é amplamente utilizada nas redes ópticas WDM tradicionais. O uso da agregação elétrica é uma funcionalidade comum e amplamente utilizada para transportar múltiplas requisições de tráfego com a mesma origem e destino na rede.

Para que a agregação de tráfego seja realizada no meio eletrônico, técnicas de multiplexação por divisão de tempo (*Time-Division Multiplexing* – TDM) são utilizadas. No TDM, cada sinal é transmitido simultaneamente, dentro do mesmo espaço físico, no qual cada sinal possui um tempo próprio e definido de uso da banda para transmissão. Esta tecnologia possibilita um uso mais eficiente do canal de transmissão proporcionando um melhor aproveitamento dos recursos da rede e conseqüentemente diminuindo sua probabilidade de exaustão.

Utilizando o mesmo princípio, para as EONs também é possível agregar fluxos a um caminho óptico já estabelecido. Desde que tenham a mesma origem e destino, fluxos de tráfego são agregados ao caminho óptico no meio eletrônico e tornam-se transparentes no meio óptico. Isso leva a uma maior eficiência espectral, pois permite a eliminação das bandas de guarda entre supercanais [75].

Abordagens de engenharia de tráfego podem ir além e aproveitar o uso da agregação elétrica de outras maneiras. Por exemplo, os autores em [43] e em [74] estabelecem caminhos ópticos com alta capacidade, de forma a manter reservas de banda nos canais para futuras requisições. Quando uma requisição chega na rede, a abordagem aloca um caminho óptico muito maior que o necessário para que as próximas demandas com mesma origem e destino possam utilizar o mesmo canal, através da agregação elétrica, sem que seja necessário alocar um novo caminho óptico.

Para exemplificar o funcionamento da agregação elétrica, pode-se observar a Figura 2.12. As requisições 2 e 3 (vermelho e preto) são originadas no nó “A”. Um caminho óptico é alocado entre os nós “A” e “B”, representado pela linha “vermelho escuro”. As requisições são agregadas no comutador elétrico e repassadas ao comutador óptico de forma transparente. Chegando ao nó “B”, a requisição 3 é enviada ao seu destino e a requisição 2 é novamente agregada a um novo caminho óptico, representado pela linha “laranja escuro”, junto com a requisição 5, até o seu destino final no nó “C”.

2.4.3 Agregação Óptica

Como mencionado, a agregação de tráfego elétrica exige que os fluxos de dados tenham em comum a mesma origem e destino. Conforme mencionado na Seção 2.3, caminhos

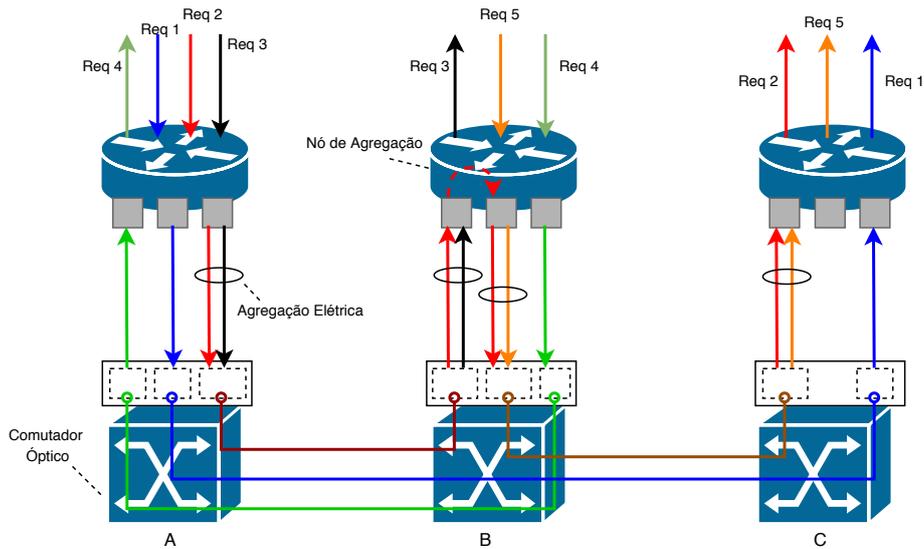


Figura 2.12: Agregação elétrica de tráfego em EON.

ópticos adjacentes devem ser separados por uma banda de guarda para garantir requisitos de QoT. Embora a agregação elétrica permita aproveitar melhor os recursos de espectro, a flexibilidade proporcionada pelo BV-OXC e o uso de SBVTs permite ir além disso [37].

Um dos novos recursos, possibilitados pelos SBVTs, é a agregação de tráfego óptico (*Optical Grooming* – OG). Nesta abordagem, múltiplos fluxos ópticos de mesma origem para diferentes destinos podem ser agregados em um único transmissor SBVT [43]. A ideia básica da agregação óptica é combinar múltiplos caminhos ópticos, originados no mesmo transmissor (SBVT), e distribuí-los diretamente na camada óptica realizando comutações ópticas. Esse agrupamento é realizado para dar suporte à agregação de modo transparente, sem conversão do sinal do domínio óptico para elétrico em nós intermediários. Esse grupo de caminhos ópticos é chamado de túnel óptico [76].

Essa abordagem é possível graças a flexibilidade fornecida pelo BV-OXCs que permitem a comutação de subportadoras OFDM diretamente na camada óptica [45]. Em teoria, as bandas de guarda não são um requisito obrigatório. Ocorre que quando um sinal OFDM é comutado por vários BV-OXCs, as subportadoras na borda do espectro sofrem uma grande penalidade por causa da forma imperfeita dos filtros seletivos de comprimento de onda WSS (*Wavelength-Selective Switch*) dentro dos BV-OXCs [77]. Devido à inclinação finita das bordas dos filtros WSS, ao realizar as funções de adicionar e remover sinais ópticos, os BV-OXCs acidentalmente adicionam algum sinal residual, de caminhos ópticos adjacentes, que permanecem no caminho óptico adicionado ou descartado [78, 79]. Por este motivo, bandas de guarda são utilizadas como forma de contornar este problema. A Figura 2.13 mostra a ilustração desse fenômeno. Na Figura 2.13(a) as bandas de guarda

protegem os caminhos ópticos contra sinais residuais. Na Figura 2.13(b), com a agregação óptica, parte do sinal do caminho óptico agregado é enviado após a comutação [79].

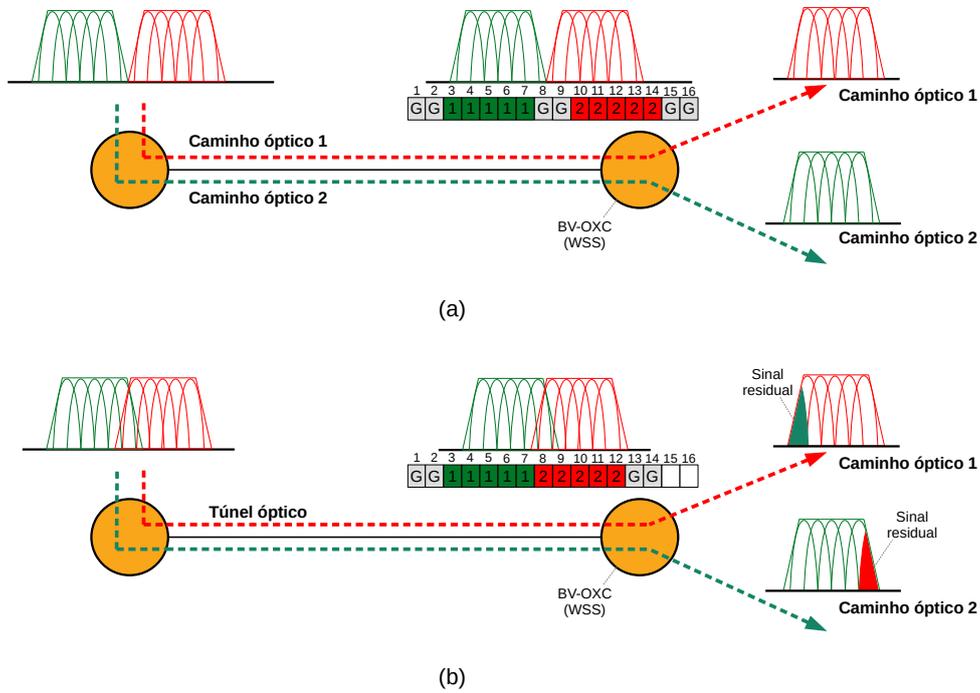


Figura 2.13: Ilustração da comutação óptica realizada pelos BV-OXCs.

Com o advento dos SBVTs e as abordagens de agregação óptica, foi observado que desde que o sinal seja iniciado na mesma origem, pode-se alocá-lo sem a necessidade de bandas de guarda [45]. Obviamente, para caminhos ópticos com mesma origem e destino, a comutação do túnel óptico não sofre nenhum problema de filtragem.

Para caminhos ópticos com mesma origem e destinos diferentes, tendo em conta a natureza da comutação dos BV-OXCs, um subconjunto de subportadoras OFDM pode ser removido ou comutados opticamente em qualquer nó intermediário ao longo da rota, independente do sinal residual provocado já que o receptor é capaz de separar corretamente as subportadoras oriundas do mesmo transceptor. Neste sentido, bandas de guarda devem ser adicionadas somente em túneis ópticos adjacentes (transmissores diferentes), de modo que, possam ser comutadas pelos BV-OXCs sem prejuízos de sinal residual.

Para o tráfego proveniente de origem diferente, a ortogonalidade não pode ser garantida, logo receptores distintos devem ser utilizados. Assim, observa-se que a agregação óptica proporciona uma eficiência significativa no uso do espectro, devido à eliminação das bandas de guarda entre caminhos ópticos com mesma origem e ao mesmo tempo melhora os custos operacionais da rede possibilitando a economia no uso de transmissores [45].

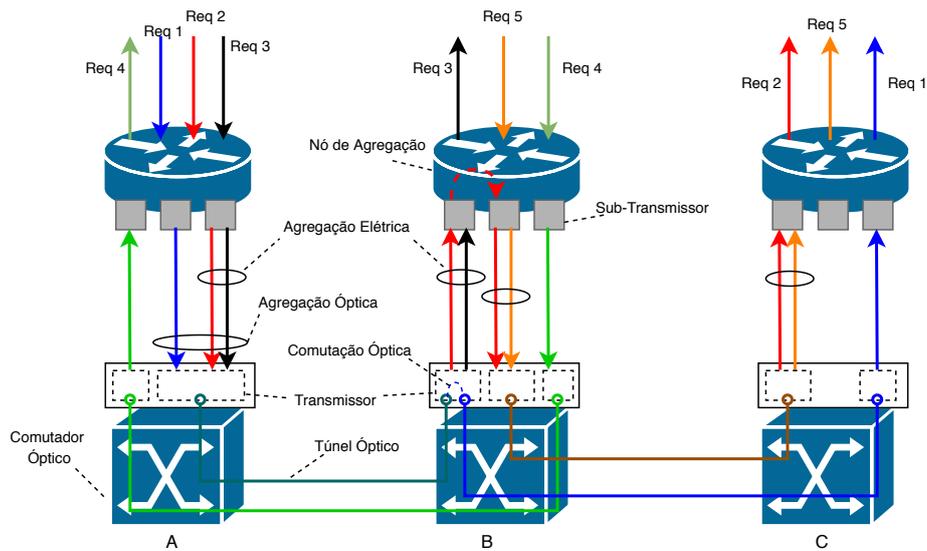


Figura 2.14: Agregação óptica de tráfego em EON.

A Figura 2.14, exemplifica o funcionamento da agregação óptica. Tomando-se como base a Figura 2.12, as requisições 2 e 3 (vermelho e preto) continuam sendo agregadas eletricamente no nó “A”. Contudo, observa-se que a requisição 1 (azul), também originada no nó “A”, pode ser agregada junto ao túnel óptico formado pelas requisições 1, 2 e 3. Assim, o túnel óptico (verde escuro) agrega dois caminhos ópticos. Observa-se que no nó “B” o túnel óptico é bifurcado (separado) e a requisição 1 segue sozinha, em um caminho óptico dedicado, ao seu destino final nó “C”. Aqui, a comutação realizada no nó “B” é feita no domínio óptico sem chegar ao domínio elétrico, diferentemente da Figura 2.12.

2.4.4 Roteamento em Múltiplos Saltos

Estratégias de engenharia de tráfego dependem de como é classificada a arquitetura da rede óptica. Dentre as classificações possíveis pode-se destacar a rede opaca, transparente ou translúcida.

Na rede opaca, o sinal óptico gerado na origem será convertido para o domínio elétrico em cada nó intermediário ao longo da rota retornando ao domínio óptico até chegar ao seu destino. Para isso, todos os nós requerem um conversor OEO (*Optical-Electronic-Optical*) para converter todo sinal. Um caminho óptico será alocado para cada enlace na rota da requisição. Apesar de conversores OEO regenerarem o sinal, eles inserem atrasos desnecessários na rede óptica, além de aumentarem o custo dos nós.

Nas redes transparentes, não há conversão OEO nos nós intermediários ao longo da rota. O sinal óptico gerado na origem somente será convertido para o domínio elétrico

no nó de destino da requisição. Para isso, os nós intermediários realizam a comutação do sinal sem sair do domínio óptico. Esta comutação é realizada através de matrizes de comutação construídas, por exemplo, com micro-espelhos programáveis [80]. Dessa forma, as redes ópticas transparentes eliminam o atraso de comutação inerente à conversão do sinal óptico para o nível eletrônico em cada nó intermediário da rota.

Por fim, em redes translúcidas a conversão OEO é realizada em um ou mais saltos intermediários ao longo da rota. As redes translúcidas são o híbrido entre as redes opacas e transparentes. Uma requisição pode ser encaminhada por um ou mais caminhos ópticos até seu destino. O caminho óptico é encerrado no ponto de regeneração OEO e um novo caminho óptico é estabelecido criando uma conexão translúcida de ponta a ponta. Assim, uma conexão em uma rede translúcida pode ser estabelecida através de um único caminho óptico (roteamento *single-hop*) ou por uma sequência de caminhos ópticos (roteamento *multi-hop*).

É necessário destacar que cada caminho óptico pode utilizar vários enlaces físicos de fibra óptica. O número de enlaces físicos atravessados por uma requisição de tráfego é classificado como número de saltos na topologia física. O número de caminhos ópticos utilizados pela requisição é classificado como número de saltos na topologia virtual. A Figura 2.15 apresenta a representação dos três tipos de rede mencionados.

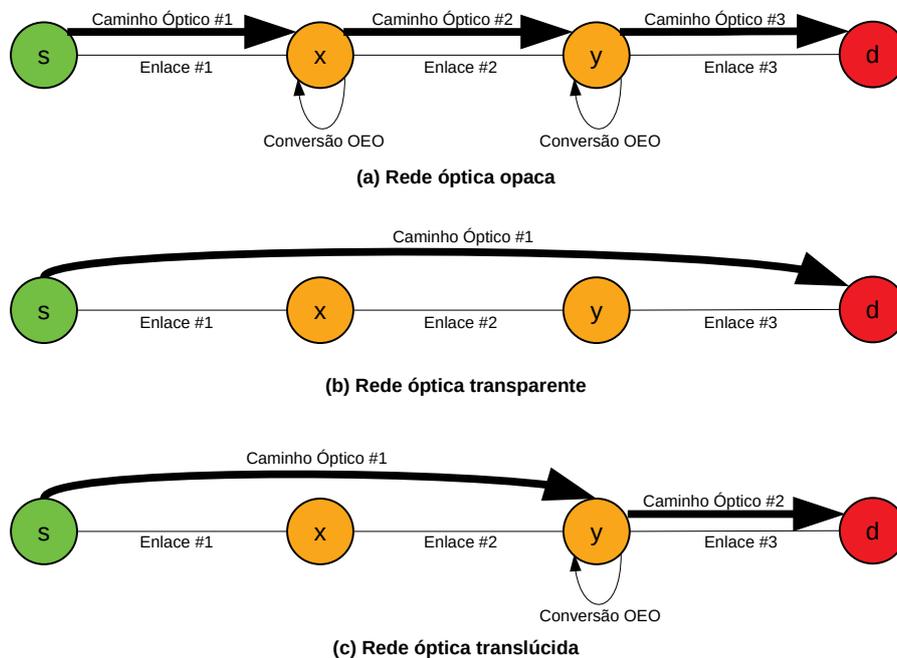


Figura 2.15: Representação de redes opacas, transparentes e translúcidas.

Obviamente quanto mais saltos na topologia virtual, maior será o atraso provocado

pelos conversores OEO e pior será a QoS. Por outro lado, um caminho óptico muito grande, sofre degradações ao se propagar através dos enlaces de fibra óptica, matrizes de comutação, amplificadores ópticos e demais elementos. O acúmulo dessas degradações eleva a taxa de erro de bit (*Bit Error Rate* – BER) no receptor e pode atingir níveis intoleráveis [64, 67]. Nesse sentido, redes translúcidas são capazes de viabilizar o melhor das duas abordagens.

Em redes translúcidas, as estratégias de engenharia de tráfego podem utilizar o roteamento *multi-hop* para suavizar as restrições de continuidade de espectro, uma vez que, o novo caminho óptico não precisa ter o mesmo segmento de espectro do anterior. Além disso, esta técnica minimiza as restrições de distância de transmissão, já que a transmissão é dividida em vários caminhos ópticos e o sinal é regenerado.

Deve-se destacar que cada caminho óptico deve ser estabelecido por um transmissor diferente. Dessa forma, as estratégias de engenharia de tráfego devem levar em consideração a utilização de caminhos ópticos já existentes da rede. Por meio da agregação de tráfego, pode-se utilizar esses caminhos como parte integrante da solução e dessa forma utilizar menos transmissores na rede [81].

2.4.5 Roteamento em Múltiplos Caminhos

Dentre as possibilidades de engenharia de tráfego no atendimento de requisições, pode-se classificar o roteamento de caminho único (*singlepath*) ou múltiplos caminhos (*multipath*). O roteamento *singlepath* ocorre quando uma conexão é atendida por um ou mais caminhos ópticos que unidos formam apenas um caminho da origem ao destino. Em contrapartida, o roteamento *multipath* acontece quando a conexão é atendida por caminhos ópticos que formam no mínimo dois caminhos da origem ao destino. A soma da capacidade de todos os caminhos deve ser maior ou igual à demanda de tráfego da conexão. Em geral, os caminhos, que podem ser formados por um ou mais caminhos ópticos, são disjuntos, isto é, não compartilham enlaces na rota. Entretanto, isso não é um fator determinante para classificar se o roteamento é ou não *multipath*.

A Figura 2.16 mostra a representação do roteamento *multipath* para uma requisição com origem no nó “s” e destino “d”. As nuvens, representam um ou mais caminhos ópticos nos quais resolvem o problema de roteamento e alocação de espectro de forma independente. Deve-se destacar que um requisição de tráfego requisita uma quantidade de banda passante, logo a soma da banda passante dos caminhos deve ser igual ou superior o da requisição.

A técnica de roteamento em múltiplos caminhos amplia as possibilidades de configuração das conexões de rede ao mesmo tempo em que permite novos arranjos na utilização de recursos da rede. O roteamento em múltiplos caminhos associado às técnicas de agregação

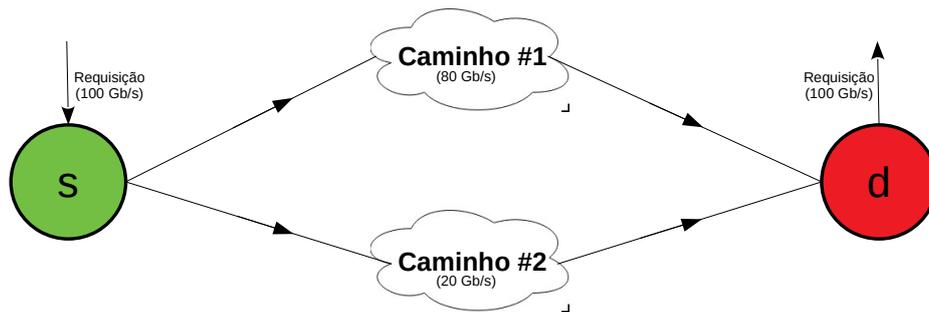


Figura 2.16: Representação do roteamento em múltiplos caminhos.

de tráfego (EG e OG) permite um uso mais eficiente dos recursos, pois qualquer quantidade de banda passante que esteja disponível em um caminho óptico pode ser aproveitada na alocação de uma nova chamada [79].

O principal problema do roteamento *multipath* é que cada caminho possui um atraso específico na comunicação, uma vez que cada caminho percorre uma rota diferente. Isso provoca um atraso diferencial (*Differential Delay*) entre os caminhos. Dessa maneira, o destinatário irá receber uma versão desordenada da sequência do tráfego e deverá ser capaz de organizar e ajustar o tráfego através de *buffers* de memória ou linhas de atraso de fibra (*Fiber Delay Lines – FDL*) [82].

2.4.6 Aplicação de uma engenharia de tráfego

O desempenho de uma EON não depende apenas dos seus componentes ópticos, tais como, transmissores, tipos de fibra, largura espectral utilizável, comutadores ópticos, etc., mas também de como a rede é controlada. O objetivo de uma solução de engenharia de tráfego é obter o melhor desempenho dentro dos limites definidos pelas restrições físicas da rede. Este objetivo é alcançado através de algoritmos de engenharia de tráfego que são executados pelo plano de controle da rede e podem atender as requisições de tráfego de diversas formas.

As possibilidades de engenharia de tráfego EON são ilustradas na Figura 2.17. O primeiro caminho óptico, denotado por (1), usa cinco *slots* e é roteado pelos nós 1; 2; 3. A mesma banda espectral é usada em toda a rota (*slots* 3 a 7, nos links 1→2 e 2→3). O mesmo acontece com caminho óptico (2), mas apenas utilizando quatro *slots*. Portanto, ele está transmitindo menos largura de banda do que o caminho óptico (1). Observa-se que os caminhos ópticos adjacentes são separados por uma banda de guarda de no mínimo dois *slots*, denotada por G.

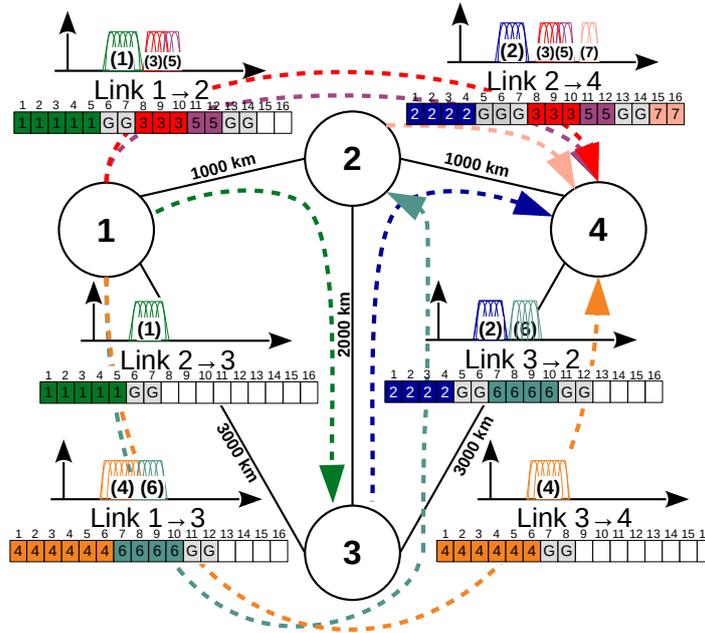


Figura 2.17: Possibilidades de uma engenharia de tráfego EON.

O caminho óptico (3) usa três *slots* e é roteado pelos nós 1;2;4, trafegando apenas 2000 km. De acordo com a Tabela 2.1, o nível de modulação QPSK pode ser usado para transmitir uma taxa de dados de 75 Gb/s. Por outro lado, o caminho óptico (4), roteado pelos nós 1;3;4, trafegando 6000 km, requer seis *slots* para transmitir a mesma taxa que o caminho óptico (3), porque usa a modulação BPSK para cumprir a restrição de distância.

Neste cenário, caso seja necessário atender uma nova solicitação de tráfego entre os nós 1 a 4, solicitando 50 Gb/s, é possível criar um novo caminho óptico transparente ou realizar uma agregação elétrica em dois caminhos ópticos já estabelecidos (roteamento translúcido). Também é possível realizar uma agregação óptica transparente (ex. caminho óptico (5)) ou com uma bifurcação (ex. caminho óptico (6)) do nó 3 ao nó 2, realizando uma conversão OEO e alcançando o nó 4 (ex. caminho óptico (7)). Coordenar todas essas alternativas e arranjos possíveis definindo qual é a melhor solução é um problema bastante complexo de ser solucionado.

2.4.7 Tráfego Estático e Dinâmico

Um algoritmo de engenharia de tráfego busca atingir um objetivo específico. Dentre os objetivos procurados, tem-se a economia no uso do espectro, utilizar menos transmissores, oferecer melhor QoT nas conexões, propor eficiência energética, entre outros. Estes algoritmos são classificados com base no âmbito de aplicação de seu tráfego. Dentre

estas abordagens, pode-se classificar o tráfego estático (*off-line*) e o tráfego dinâmico (*on-line*) [34, 83].

A abordagem de tráfego estático lida com o roteamento e alocação de recursos durante a fase de planejamento da rede. Os algoritmos de engenharia de tráfego devem lidar com uma matriz de tráfego que, normalmente, representa o tráfego da rede durante um período. Com esta matriz de tráfego conhecida antecipadamente, o problema resume-se a atender todas as requisições (ou o máximo possível) ao mesmo tempo minimizando os recursos da rede conforme o objetivo do algoritmo proposto. Na literatura das redes tradicionais WDM, este problema é conhecido como estabelecimento estático de caminho óptico (*Static Lightpath Establishment (SLE)*), segundo o qual as requisições de tráfego são conhecidas a priori e as rotas e respectivas alocações de comprimento de onda (espectro) são estabelecidas antes da sinalização entre os nós que compõem a rota [84].

Por outro lado, a abordagem de tráfego dinâmico lida com o roteamento e alocação das demandas de tráfego de forma interativa. Isto significa que, a medida que as solicitações de tráfego chegam na rede, as operações de roteamento e atribuição de espectro são realizadas de forma *on-line* [63]. Nas redes WDM este problema é conhecido como estabelecimento dinâmico de caminho óptico (*Dynamic Lightpath Establishment (DLE)*), em que as requisições são estabelecidas no momento em que são solicitadas, de acordo com o estado atual da rede.

Métodos de otimização com o uso de programação linear inteira (do inglês, *Integer Linear Programming – ILP*) são geralmente aplicados para encontrar soluções aos problemas de roteamento e alocação de espectro estático. A vantagem desses métodos é que eles oferecem uma maneira de otimização das soluções propostas de acordo com o objetivo escolhido. Contudo, o uso de ILPs pode levar a uma maior complexidade computacional.

Para problemas de roteamento e alocação de espectro dinâmico, geralmente, aplicam-se algoritmos heurísticos como uma alternativa para reduzir a complexidade computacional das soluções [33]. Em geral, heurísticas são mais utilizadas no planejamento dinâmico devido a sua menor complexidade computacional.

É necessário destacar que para o problema de roteamento e alocação de espectro dinâmico, a solução ótima não é possível ser encontrada, uma vez que, não se conhece quais são as futuras demandas da rede. Em contrapartida, para o problema estático a solução ótima pode ser encontrada já que o conjunto de requisições é conhecido.

Soluções ILP também são utilizadas no problema de tráfego dinâmico. Neste caso, a solução irá encontrar o resultado ótimo de acordo com seu objetivo para o estado atual da rede.

2.5 Fragmentação de Espectro

Quando as taxas de transmissão demandadas pelas requisições de rede não são uniformes, as operações de alocação e liberação de caminhos ópticos, em um cenário de tráfego dinâmico, inevitavelmente criam pequenos fragmentos de espectro não-contíguos resultando no problema de fragmentação do espectro. Os algoritmos de engenharia de tráfego EON devem ser capazes de mitigar este problema uma vez que isto leva à utilização ineficiente de recursos e a degradação do desempenho da rede [39].

O problema de fragmentação do espectro EON é muito semelhante ao problema de fragmentação de memória na arquitetura de computadores [33]. Com a alocação e liberação, ao longo do tempo, a memória torna-se fragmentada em pequenas áreas contíguas fazendo com que alguns blocos de dados não possam ser utilizados.

Análogo à fragmentação da memória em computadores, a fragmentação do espectro também leva à utilização ineficiente dos recursos, pois grande parte das futuras requisições acabam não sendo atendidas por falta de espectro contíguo disponível. No caso específico da fragmentação do espectro, isso aumenta a probabilidade de bloqueio na rede, pois os *slots* de frequência OFDM não utilizados são espalhados ao longo do espectro bloqueando o espaço para que novas conexões sejam estabelecidas.

Para resolver esse problema, a literatura apresenta duas linhas de pesquisa: (*i*) mecanismos que evitam a fragmentação do espectro; e (*ii*) a aplicação de técnicas de desfragmentação do espectro. A primeira linha de pesquisa é mais complexa e envolve o uso de métricas de fragmentação na tomada de decisões dos algoritmos RMLSA. Já a segunda linha implica a reorganização do espectro já alocado na rede. Em geral, técnicas de desfragmentação do espectro envolvem interrupções de tráfego, e por isso, trata-se de um requisito operacional mais custoso [33].

Diversas técnicas de desfragmentação de espectro foram propostas pela literatura e podem ser classificadas como reativas ou proativas. Técnicas reativas são utilizadas em resposta a alguma ação, como por exemplo, o aumento da taxa de bloqueio. Por outro lado, técnicas proativas realizam a realocação do espectro periodicamente tendo como objetivo a preservação de faixas de espectro para usos futuros [85].

Mesmo sendo considerada mais complexa, a linha de pesquisa que desenvolve mecanismos que evitam a fragmentação são mais utilizadas pela literatura, pois não requerem a interrupção dos serviços da rede. Neste sentido, algoritmos de engenharia de tráfego EON devem estar preparados para evitar a fragmentação do espectro levando em consideração todos os requisitos do problema RMLSA [33, 85].

A fragmentação do espectro não está diretamente relacionada com a utilização do espectro. A fragmentação é definida quando os recursos espectrais (espectro livre) estão

divididos em várias partes pequenas, enquanto a utilização do espectro é definida como uma proporção do uso sobre os recursos espectrais totais [86].

Existem diferentes alternativas para mensurar o nível de fragmentação da rede. Uma delas é o cálculo da fragmentação externa, comumente utilizado em arquitetura de computadores, e denotada pela Equação 2.2 [86, 87]:

$$F_{ext} = 1 - \frac{maiorBlocoLivre}{totalLivre} \quad (2.2)$$

onde, o *maiorBlocoLivre* representa o número de *slots* do maior espaço contíguo livre, e o *totalLivre* é o número total de *slots* disponíveis. Se F_{ext} for próximo a um, significa que o espaço disponível no canal está totalmente fragmentado e dividido em pedaços pequenos. Esta equação é válida dentro da hipótese que existam blocos livres (*slot*) disponíveis no canal.

Uma outra forma de medir o nível de fragmentação leva em consideração a quantidade de *slots* requeridos pela requisição de tráfego. Nesse sentido, a taxa de fragmentação é uma função que leva em consideração o número de *slots* requeridos no atendimento da demanda. Esta função é expressada pela Equação 2.3 [86, 87]:

$$F_{rel}(c) = 1 - \frac{c \cdot Livre(c)}{totalLivre} \quad (2.3)$$

onde, c é número de *slots* requisitados, $Livre(c)$ é a função que retorna o número de requisições simultâneas com tamanho “ c ” que podem ser satisfeitas. Dessa forma, a taxa de fragmentação é relativa à demanda de tráfego requisitada. Assim como a Equação 2.2, a Equação 2.3 também é válida dentro da hipótese que sempre existirá um *slot* disponível no canal.

Os autores em [88] propõem outra métrica para medir a fragmentação do espectro usando a entropia de Shannon [89]. Nesta métrica, expressada pela Equação 2.4, avaliam-se os blocos livres contíguos na rede em razão da capacidade total do enlace.

$$F_{ent} = - \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{D} \ln \frac{D_i}{D} \quad (2.4)$$

onde, N representa a quantidade de sub-blocos de subportadoras livres no espectro, D_i representa o tamanho do sub-bloco i e D representa o total de subportadoras do espectro (livres ou ocupadas). Esta métrica apresenta um índice de fragmentação e, portanto, não mostra um valor do percentual de fragmentação. Para isso, deve-se aplicar uma normalização, através do valor máximo da Equação 2.4, e calcular valores entre 0 e 1, em que 0 representa um enlace não fragmentado e 1 representa um enlace totalmente fragmentado.

Todas as formulações das Equações 2.2, 2.3 e 2.4 apesar de simples, calculam de maneira satisfatória a taxa de fragmentação de espectro para um enlace. Para medir a fragmentação de uma rota, por exemplo, realiza-se a média dos valores de cada enlace da rota. Para medir o grau de fragmentação da rede, a média deve ser feita para todos os enlaces da rede. Por exemplo, o grau de fragmentação da rede é calculado através da média de fragmentação de todos os enlaces ($l \in E$) da rede como mostra a Equação 2.5.

$$Frag = \frac{1}{|E|} \sum_{l \in E} F_{\alpha}^l \quad (2.5)$$

onde, E é o conjunto de enlaces da rede e F_{α}^l representa a fragmentação do enlace l de acordo com a Equação α , tal que $\alpha = ext \parallel rel \parallel ent$, Equações 2.2, 2.3 ou 2.4, respectivamente. É importante destacar que esta avaliação prioriza os blocos livres, independente da distribuição dos mesmos nos links. Portanto, quanto maior o valor, maior é a fragmentação da rede. Caso seja calculado a fragmentação da rota, basta considerar apenas os enlaces l pertencentes à rota. Nesta **Tese**, são utilizadas a Equação 2.2 na Equação 2.5 para mostrar as avaliações de desempenho dos algoritmos. Também são utilizadas a Equação 2.4 na Equação 2.5 como uma métrica de apoio para uma das propostas.

Como pode ser visto, a fragmentação do espectro da rede pode ser avaliada de diversas maneiras. Para tomar como exemplo os diferentes valores que podem ser mensurados, a Figura 2.18 apresenta uma EON com 4 nós e 4 links. Toma-se como exemplo as rotas #1 e #2 formadas pelos enlaces, “*Link 1* → *Link 2*” e “*Link 1* → *Link 3* → *Link 4*”, respectivamente. Pode-se observar que os valores entre as métricas são bem diferentes de acordo com cada métrica utilizada.

2.6 Técnicas de Sobrevivência

À medida que a demanda por serviços de dados cresce, as redes ópticas de núcleo se expandiram. Com isso, o risco da perda de grande volume de dados aumentou. Neste contexto, estratégias de sobrevivência a falhas na rede tornaram-se um aspecto primordial nos projetos das redes ópticas de núcleo. Normalmente as redes ópticas são utilizadas para o transporte de dados em grandes distâncias com altas taxas de largura de banda. Por exemplo, as EONs tem a capacidade de dar suporte a taxas de até 1 Tb/s. Portanto, falhas em componentes de rede, como por exemplo, fibras ópticas ou comutadores ópticos podem interromper a comunicação para milhões de usuários, causando grandes prejuízos [19]. Devido a esse risco, é necessário implementar mecanismos de sobrevivência a falhas ou de recuperação.

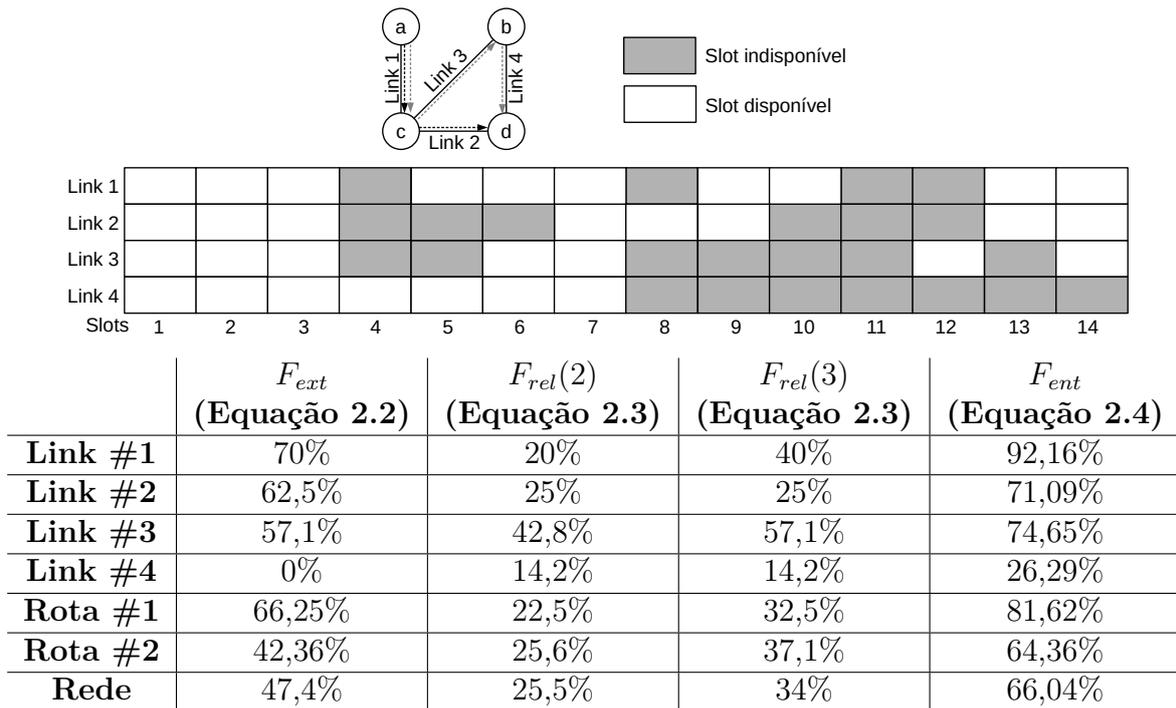


Figura 2.18: Exemplo de fragmentação do espectro para uma EON com 4 nós e 4 links.

Recuperação a falha no contexto de redes é definido como o processo de restabelecer a continuidade do tráfego por re-roteamento dos sinais em diversas instalações após a falha [90]. Quando ocorre uma falha na rede, os caminhos ópticos são afetados e devem ser recuperados o mais rápido possível para que as aplicações de rede não vejam a falha e não iniciem seus próprios mecanismos de recuperação. Isso significa garantir a disponibilidade do serviço, que é definida como a fração de tempo que o sistema fornece o serviço sem interrupção para seus usuários [91]. Neste sentido, o gerenciamento das falhas seguem uma sequência de procedimentos para a substituição ou restabelecimento do componente falho.

Com o advento das EONs, os caminhos ópticos com largura de banda elástica trouxeram novas possibilidades para os esquemas de recuperação. Por exemplo, em casos de falha na rede, um caminho óptico elástico pode ser comprimido até o limite definido pelo SLA (*Service Level Agreement*), depois de corrigida a falha na rede, o caminho óptico pode ser expandido [92]. A literatura demonstra que estes mecanismos de compressão e expansão de largura de banda das EONs oferecem mais oportunidades para garantir a conectividade em casos de falha em comparação às redes WDM tradicionais [39, 93].

As principais técnicas de sobrevivência para as EONs permanecem as mesmas que das redes WDM, a proteção e a restauração [93]. As técnicas de proteção utilizam caminhos de *backup* para transportar sinais ópticos após a ocorrência da falha. Os caminhos de *backup*

são computados antes da ocorrência da falha e reconfigurados posteriormente [19, 94]. Por outro lado, nas técnicas de restauração, os caminhos de *backup* são computados dinamicamente com base no estado do enlace óptico e em informações após a ocorrência da falha. Portanto, essa estratégia pode oferecer mais eficiência em termos de utilização de recursos em comparação com estratégias de proteção, todavia não garante a recuperação da falha [19, 95].

Ambas as técnicas de proteção e restauração são divididas em duas categorias: (i) baseadas em enlace; ou (ii) baseadas em caminho. As técnicas baseadas em enlace recuperam uma falha de rede em torno de um enlace com falha, enquanto as técnicas baseadas em caminho recuperam a falha nos pares de nós (origem e destino) de um caminho [93].

Estudos demonstram que a restauração de falhas em EONs proporciona maiores oportunidades à conectividade que os esquemas utilizados em redes ópticas tradicionais de grade fixa [92]. Contudo, a proteção é a técnica de sobrevivência mais utilizada para prover disponibilidade do serviço [96]. Nas redes óticas WDM tradicionais, a capacidade de sobrevivência da rede foi extensivamente estudada, no entanto nas EONs, a pesquisa ainda está em um estágio inicial [93]. Estratégias de sobrevivência possuem impacto significativo nas redes de núcleo óticas e diversas questões ainda precisam ser exploradas na tecnologia EON.

2.7 Modelo de Consumo Energético das redes EON

O consumo e a eficiência de energia estão se tornando as principais preocupações para o planejamento e as operações das redes. É importante construir infraestruturas de rede que permitam economia de energia que leve em consideração as relações econômicas, bem como as consequências ecológicas [39]. As soluções de engenharia de tráfego também devem levar em consideração o gasto de energia em suas tomadas de decisão, visando proporcionar eficiência energética na rede.

Diferentes soluções para reduzir o desperdício energético das EONs estão sendo estudadas na literatura. Devido à indisponibilidade comercial dos componentes de largura de banda variável OFDM (BVT/BV-OXC), algumas hipóteses têm sido feitas para mensurar o gasto energético dos componentes EON [14]. Embora haja divergência entre alguns modelos energéticos encontrados na literatura, todos os modelos baseiam-se no consumo energético dos principais componentes da arquitetura EON. Dentre eles, podem-se destacar os transmissores (transceptores e receptores), os comutadores e os amplificadores ópticos.

Na avaliação do consumo de energia destes equipamentos, também é necessário considerar a contribuição indireta do consumo de energia das funções auxiliares (controle de

gerenciamento, controladores de temperatura, etc.) de cada um dos elementos da rede. Por isso, uma aproximação desta contribuição indireta também foi dada para os elementos de rede analisados.

2.7.1 Consumo energético do BVT

Como já mencionado, devido à indisponibilidade comercial dos BVTs diferentes suposições foram realizadas para obter os valores do seu consumo de energia. Para isso, foram comparadas as arquiteturas de um transmissor CO-OFDM (*Coherent Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), representando um BVT, com um transmissor CoWDM (*Coherent Wavelength-Division Multiplexing*), já comercializado.

Quando compara-se a arquitetura na parte do receptor, percebe-se que podem ser assumidas como iguais, uma vez que ambos são receptores coerentes e seus elementos em grande parte possuem os mesmos componentes [97]. Por outro lado, a arquitetura na parte do transmissor CO-OFDM contém um módulo de processamento de sinal digital (*Digital Signal Processor – DSP*) e dois conversores digitais para analógico (*Digital to Analog Converter – DAC*) que não são necessários na arquitetura CoWDM. Essa diferença é considerada como a principal distinção entre os dois tipos de transmissor e, portanto, a comparação de complexidade é normalmente baseada nesta diferença [97, 98].

Baseado nestas comparações, e assumindo que o DSP escala linearmente a taxa de bits, o consumo de energia de um único BVT/SBVT, que inclui transmissor/sub-transmissor e receptor, pode ser definido como uma função (f_{pow}) de sua taxa de transmissão (TR) conforme mostra a Equação 2.6 [98, 99].

$$PC_{BVT} (W) = O \cdot f_{pow}(TR) (W) + I (W) \quad (2.6)$$

O consumo de energia dos BVTs/SBVTs para uma única subportadora para diferentes níveis de modulação é mostrado na Tabela 2.2. Além disso, um adicional de 68,3% ($O = 1,683$) é considerado para possíveis sobrecargas mais 91,333 W (I) de contribuições indiretas em cada BVT/SBVT. Em relação ao gasto de energia de um regenerador em um roteamento multi-hop, considera-se o mesmo gasto de um único BVT/SBVT [100].

2.7.2 Consumo energético do BV-OXC

O consumo de energia dos BV-OXCs vem dos procedimentos de configuração (*setup*) e operação (*op*). Considera-se o uso de BV-OXCs translúcidos onde a comutação óptica e eletrônica é realizada. O procedimento de configuração é semelhante à tecnologia de rede tradicional WDM, o consumo energético da configuração dos comutadores ópticos de banda variável (BV-OXC) é dado em função do grau de conexão de cada nó N (número de

Tabela 2.2: Consumo Energético dos transmissores de banda variável BVT para diferentes formatos de modulação.

Formato de Modulação	Capacidade da Subportadora (Gb/s)	Consumo Energético (W)
BPSK	12,5	112,374
QPSK	25,0	133,416
8QAM	37,5	154,457
16QAM	50,0	175,498
32QAM	62,5	196,539
64QAM	75,0	217,581

fibras conectadas no BV-OXC) multiplicado pelo consumo de cada porta ($E_{port} = 85 J$) e o número de canais que o BV-OXC pode adicionar ou remover na rede (ε) multiplicado pelo consumo de cada canal ($E_{channel} = 100 J$), como mostra a Equação 2.7 [99].

$$EC_{OXC}^{setup}(J) = N \cdot E_{port}(J) + \varepsilon \cdot E_{channel}(J) \quad (2.7)$$

O consumo de energia do procedimento operacional é de $150 W$ para contribuição indireta nominal e contribuição do domínio elétrico [14, 99], a Equação 2.8 mostra esta relação:

$$PC_{OXC}^{op} = 150 W \quad (2.8)$$

2.7.3 Consumo energético dos Amplificadores Ópticos (OLA)

Em relação aos amplificadores ópticos (*Optical Line Amplifier* – OLA) são considerados os EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*). Eles são colocados dentro de um enlace ao longo da fibra óptica. Deve ser colocado um OLA para cada enlace físico (m, n) indicado por A_{mn} , onde m e n são dois nós da rede. A quantidade de OLAs pode ser calculada de acordo com a Equação 2.9 [99].

$$A_{mn} = \lceil L_{mn}/S - 1 \rceil + 2 \quad (2.9)$$

onde, S é a distância entre dois OLAs vizinhos, normalmente $S = 80$ km, e L_{mn} é a distância do enlace (m, n) em km. São somados mais “2” amplificadores para as duas extremidades do enlace [99].

São considerados $30 W$ por cada OLA. Além disso, são considerados mais $140 W$ adicionais por OLA como possível sobrecarga conforme a Equação 2.10 [14].

$$PC_{OLA}(W) = A_{mn} \times 30 + 140 \quad (2.10)$$

2.7.4 Consumo energético do Caminho Óptico

Com os gastos dos equipamentos ópticos mensurados, pode-se obter o consumo total de energia para transmitir um circuito óptico na rede em função do seu tempo ligado (*holding time*) H_{LP} , como mostra a Equação 2.11:

$$EC_{LP}(J) = \sum_{k=1}^C EC_{OXCk}^{setup} + \left(PC_{BVT} + \sum_{i=1}^C PC_{OXCi}^{op} + \sum_{j=1}^A PC_{OLAj} \right) \cdot H_{LP} \quad (2.11)$$

onde, C é o conjunto de BV-OXCs usados no caminho óptico e A é o conjunto de OLAs utilizados pelo mesmo.

2.7.5 Quantidade de Dados Transmitidos por uma Solicitação de Tráfego

No cenário de tráfego dinâmico, os pedidos de conexão chegam um de cada vez e mantêm-se na rede por um tempo determinado. Uma solicitação de tráfego é representada por $r(s, d, b, H)$, onde s e d são a origem e o destino da conexão, b a largura de banda solicitada e H^1 representa o tempo que esta conexão fica na rede.

Assim, quando uma solicitação de tráfego chega, o plano de controle determina como irá provisioná-lo. O plano de controle determina como rotear r através de uma combinação de caminhos ópticos novos e/ou existentes (através da agregação de tráfego). Dessa forma, a quantidade de dados transmitidos por uma solicitação é o produto da sua taxa de transmissão ($TRFlow$) pelo tempo que esta conexão fica na rede (H_{Flow}), conforme mostra a Equação 2.12:

$$DT_{Flow}(bits) = TRFlow(bit/s) \cdot H_{Flow}(s) \quad (2.12)$$

2.7.6 Consumo energético Total da Rede

O consumo de energia total da rede é dado pela soma de todos os caminhos ópticos estabelecidos na rede. Dessa forma, o consumo de energia total (EC_{total}) na rede é dado pela Equação 2.13:

$$EC_{total}(J) = \sum_{i=1}^L EC_{LPi} \quad (2.13)$$

onde, L é o conjunto de todos os caminhos estabelecidos na rede.

¹Os algoritmos de engenharia de tráfego implementados nesta Tese não têm ciência do tempo que a conexão ficará na rede.

2.7.7 Eficiência energética da Rede

A eficiência energética pode ser calculada como sendo a razão entre o total de dados transmitidos pela rede (bits) pelo consumo total de energia dos equipamentos da rede, Equação 2.14.

$$EnEff(bits/Joule) = \frac{DT_{total}(bits)}{EC_{total}(J)} \quad (2.14)$$

onde $DT_{total}(bits) = \sum_{i=1}^F DT_{Flow_i}$, sendo F o conjunto de todos os fluxos alocados na rede.

2.7.8 Eficiência Energética Efetiva

Para avaliar melhor as abordagens de engenharia de tráfego, o autor desta **Tese** desenvolveu uma nova métrica baseada no produto entre a eficiência energética (Equação 2.14) e a taxa de bloqueio de banda (BBR). Esta métrica já foi utilizada nos artigos [29, 101] deste mesmo autor.

Uma solução de engenharia de tráfego pode ser bastante eficiente na questão energética, entretanto pode apresentar um desempenho ruim na alocação de recursos. Esta métrica foi proposta para capturar o compromisso existente entre a capacidade de uma solução de engenharia de tráfego em acomodar mais demandas na rede e o gasto energético decorrente da forma como os recursos foram alocados. Em termos práticos, para que uma solução possa ser considerada energeticamente eficiente, ela deve também ser capaz de alocar os recursos na rede de forma equilibrada. A métrica Eficiência Energética Efetiva (EEE) é definida na Equação 2.15:

$$EEE = EnEff(bits/Joule) \cdot (1 - BBR^1) \quad (2.15)$$

A métrica EEE foi desenvolvida para à avaliação dos algoritmos de engenharia de tráfego. Utilizam-se os valores das métricas da Equação 2.14 e a normalização do percentual da taxa de bloqueio de banda². Valores mais altos significam abordagens mais eficientes.

²Normalização baseada em unidade da taxa de bloqueio de largura de banda tal que $BBR = \{x \in \mathbb{R} : 0 \leq x \leq 1\}$

Capítulo 3

Estado da Arte

Este capítulo faz um mapeamento geral da literatura EON no contexto da sua eficiência energética e classifica os principais estudos sobre o tema de acordo com várias características. Em seguida são exibidas as lacunas ainda não exploradas pela literatura referente a eficiência energética das EONs.

3.1 Mapeamento da Literatura

As próximas Seções classificam os artigos da literatura em quatro grandes grupos de acordo com as soluções apresentadas no contexto da eficiência energética das EONs. A Seção 3.1.1 apresenta os artigos relacionados com a alocação de espectro RSA e elementos da camada física. A Seção 3.1.2 apresenta artigos que utilizam técnicas de agregação de tráfego em suas soluções. A Seção 3.1.3 aponta os artigos relacionados com a alocação de espectro com modulação adaptativa (RMLSA). Por fim, a Seção 3.1.4 mostra artigos relacionados à sobrevivência das redes.

Todavia, muitos dos artigos podem ser classificados de outras maneiras. A Tabela 3.1 apresenta possíveis classificações dos artigos da literatura com foco na eficiência energética EON. Dentre as possíveis classificações são destacadas o tipo de roteamento da solução (*singlehop* ou *multihop*), o cenário de tráfego simulado (estático ou dinâmico), se a proposta é um algoritmo RSA ou RMLSA, se utiliza agregação elétrica ou óptica (EG ou OG), se investiga os impactos da camada física, se utiliza técnicas de sobrevivência e se utiliza índices de fragmentação como parte da sua solução.

3.1.1 Alocação de Espectro com Eficiência Energética

Diversos trabalhos na literatura investigam novas soluções para o problema de roteamento e alocação de espectro EON com foco na eficiência energética. Dentre os trabalhos des-

Tabela 3.1: Classificação dos artigos da literatura com foco na eficiência energética EON

Roteamento singlehop	Cenário de Tráfego Estático	RSA	EG	Y. Wu [35]
			OG	Y. Wu [35], M. Zhu [44]
			Papanikolaou [102]	
		RMLSA	EG	J. L. Vizcaino [103], J. L. Vizcaino [27], J. Lopez [104]
			OG	Yanxia [105], Halder [106]
			Camada Física	Bo W. [107], Bo W. [108]
			Sobrevivência	J. Lopez [104], J. Lopez [98], Rongrong [99], M. Ju [109], J. Halder [106]
			Fragmentação	Rongrong [99]
			Papanikolaou [102], X. Dong [110], Taisir [111], Naas [112]	
	Cenário de Tráfego Dinâmico	RSA	EG	Y. Wu [35]
			OG	M. Zhu [113], M. Zhu [44], Y. Wu [35]
			L. Zhang [114]	
		RMLSA	EG	Pengxing [115], J. L. Vizcaino [14], J. L. Vizcaino [27], M. Hadi [116]
OG			Pengxing [115]	
Camada Física			Bandiri [117]	
P. M. Moura [118], Y. Liu [119]				
Roteamento multihop	Cenário de Tráfego Estático	RSA	EG	J. Zhang [120], J. Zhang [47]
			OG	J. Zhang [120], J. Zhang [47], J. Wu [21]
			A. Nag [28]	
		RMLSA	EG	Huanlin [121]
			OG	Huanlin [121]
			Camada Física	Durand [122]
	Cenário de Tráfego Dinâmico	RSA	EG	S. Zhang [123], Biswas [124]
			OG	J. Wu [21]
			Sobrevivência	J. Wu [21]
		RMLSA	Camada Física	Fallahpour [125]

tacados, alguns baseiam-se nos impactos da camada física, apresentando soluções mais próximas de um cenário real.

Os autores em [28] comparam a eficiência energética de EONs e redes MLR (*Mixed-Line-Rate*) para o cenário de tráfego estático. São propostos modelos de Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming* (MILP)) para ambas as redes com o objetivo de modelar a eficiência energética em dois cenários: (i) com tráfego médio fixo por par origem-destino; e (ii) com tráfego aleatório por par origem-destino. Os resultados mostraram que a EON é superior em termos de eficiência energética, especialmente quando o tráfego na rede é mal distribuído entre os enlaces.

Em [125], os autores apresentam um algoritmo de roteamento e atribuição de espectro dinâmico que posiciona regeneradores na topologia da rede óptica EON, chamado RP. O algoritmo calcula o consumo de energia dos elementos da rede de acordo com funções de custo predeterminadas, em seguida os pedidos de conexão são atendidos através do caminho mais eficiente, em termos de energia. Posteriormente, calcula-se sua qualidade de transmissão (QoT) e se estiver dentro dos limites, o caminho designado é atribuído e a solicitação é atendida, caso contrário, o algoritmo RP é utilizado para colocar um regenerador na posição mais econômica em termos energéticos. Os resultados mostraram que os algoritmos propostos têm melhor desempenho do que outros esquemas existentes em termos de consumo total de energia da rede com uma taxa de bloqueio aceitável.

Em [107], os autores apresentam um novo método para sistemas de transmissão OFDM chamado troca nula simplificada (*Simplified Null Switching* (SNS)) que manipula dinamicamente as subportadoras através do modulador MZM (*Mach-Zehnder*) explorando mais dimensões de otimização e obtendo melhores estratégias de transmissão para EON. O estudo considera os efeitos não-lineares do modulador MZM e o ruído de emissão espontâneo amplificado (ASE) de amplificadores ópticos, bem como o comprometimento do desempenho devido à alta relação pico-média-potência (*Peak to Average Power Ratio* (PAPR)), também chamado de fator de crista da onda, no domínio eletrônico. Um modelo analítico é proposto e os estudos de caso mostram que métodos SNS obtêm uma melhor compreensão sobre as soluções do problema de alocação de espectro proporcionando uma otimização na operação da rede em termos de consumo de energia e espectro para uma demanda de tráfego.

Posteriormente em [108], os mesmos autores desenvolveram uma heurística que otimiza a busca de soluções do problema RSA com o uso do método SNS. A heurística utiliza uma técnica de recozimento simulado através dos k -caminhos mais curtos. A heurística proposta mantém o desempenho da economia energética do esquema SNS, mantendo uma complexidade computacional muito inferior à desenvolvida em [107]

Os autores em [102], fazem um estudo comparativo sobre a eficiência energética das

redes ópticas tradicionais (WDM) e das EONs. O estudo tem como objetivo identificar as principais causas do consumo de energia das redes ópticas e comparar as técnicas propostas que melhoram a eficiência energética da rede. São desenvolvidos modelos analíticos para o consumo de energia de ambas as tecnologias de rede e aplicados em topologias e cenários de tráfego reais com o propósito de avaliar a eficiência energética das redes de núcleo em um futuro próximo. Os autores ainda levam em consideração os diferentes preços da energia em diferentes localizações contabilizando os custos da eletricidade consumida, mostrando que, em uma rede continental, podem ser obtidas economias monetárias importantes, ajustando as decisões de roteamento com base nessas informações.

Em [122], os autores propõem uma análise detalhada da eficiência energética em EONs, levando em consideração o compromisso entre os diversos tipos de codificação FEC (*Forward Error Correction*) e a relação da largura de banda do espectro e sua distância percorrida. Sobre essas questões, investiga-se a capacidade de transmissão da informação e seu consumo energético. O trabalho ainda elabora um modelo de consumo de energia EON que considera os elementos envolvidos no estabelecimento dos caminhos ópticos tais como: transmissor, receptor, comutador, amplificadores e plano de controle da rede. Os resultados numéricos demonstram aumento da eficiência energética quando a codificação FEC adaptativa proposta é utilizada. Os resultados demonstram que cenários sem codificação FEC pioram a eficiência energética da rede e, a partir dessas análises, com o modelo de codificação FEC adaptativo proposto é possível determinar o consumo máximo de energia utilizado para os diferentes tipos de codificação FEC sem ter degradação da eficiência energética da rede.

Em [114], os autores investigam o problema de migração de máquinas virtuais entre *data centers* através de uma EON. O algoritmo proposto minimiza o custo total de consumo de energia dos *data centers* por meio de um algoritmo RSA *multicast*. Algoritmos heurísticos são comparados com a modelagem ILP proposta para o problema e seus resultados apresentam desempenhos semelhantes, provando a viabilidade e redução do consumo energético da rede.

3.1.2 Eficiência energética com Agregação de Tráfego

A tecnologia de agregação de tráfego elétrica (EG) das redes ópticas tradicionais também é aplicável nas EONs permitindo a agregação de múltiplas requisições de tráfego em um mesmo caminho óptico. A tecnologia OFDM das EONs também permite outro tipo de agregação de tráfego, a agregação óptica (OG), que permite agregar múltiplos caminhos ópticos em um único transmissor e comutá-los opticamente em conjunto. Ambos os tipos de agregação de tráfego proporcionam eficiência energética através da economia de recursos.

Os autores em [123] investigam um cenário de tráfego dinâmico com eficiência energética para EONs utilizando agregação elétrica de tráfego (EG). O algoritmo baseia-se em um tipo de grafo auxiliar que permite a utilização de reservas de espectro no provisionamento dos recursos. Para isso, o algoritmo considera as informações de tempo de duração das chamadas para ajustar corretamente os pesos nas arestas do grafo e obter um roteamento mais eficiente em termos de energia. Os resultados numéricos mostram que o esquema proposto pode economizar uma quantidade significativa de energia, fazendo uso mais eficiente dos recursos de espectro EON.

Em [35] os autores propõem o primeiro estudo sobre eficiência energética utilizando técnicas de agregação de tráfego EG e OG para EONs. Os autores formulam um ILP baseado em técnicas de agregação com o objetivo de minimizar o gasto energético. Os autores também desenvolvem uma heurística e duas políticas de alocação de espectro: (i) com foco no gasto espectral, denominada GGA-MS (*Green Grooming Algorithm with Minimal Spectrum Consumption*); (ii) com foco no gasto energético, denominada GGA-MP (*Green Grooming Algorithm with Minimal Power Consumption*). Os resultados de simulação mostram a eficiência da heurística proposta em termos da proximidade com os resultados do ILP.

Posteriormente em [115] os mesmos autores elaboram uma nova heurística agora com uso das técnicas de modulação adaptativa (AMLA). O nível de modulação é determinado de forma adaptativa de acordo com a distância de uma determinada rota, este processo foi denominado DASRA (*Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation*). A proposta é comparada com as heurísticas de [35] e seus resultados demonstram que o uso das técnicas de modulação adaptativa desempenham um papel mais importante na economia do espectro do que na eficiência energética, em comparação com as soluções que abordam técnicas de agregação EG e OG.

Em [120] os autores avaliam a eficiência energética de três tipos de arquitetura de transmissores EON. Para cada tipo, foram desenvolvidos modelos de programação linear inteira para o problema RSA. Os autores concluem que uma economia significativa de energia pode ser obtida através do uso de transmissores baseados na tecnologia de SBVT (*Sliceable Bandwidth-Variable Transponder*). Conclui-se também que há um compromisso entre o uso das técnicas de agregação elétrica (EG) e óptica (OG) para reduzir o consumo de energia na rede. Posteriormente em [47], os mesmos autores, ampliam o estudo e propõem uma heurística para avaliar os modelos desenvolvidos em cenários maiores e em taxas de tráfego variadas.

Os autores em [124] propõem um esquema baseado em grafo auxiliar com agregação de tráfego elétrica para minimizar o consumo de energia das EONs. O grafo auxiliar proposto apresenta soluções RSA dinâmicas considerando múltiplas opções de transmissão e

empregando o roteamento *multihop*. Além disso, os autores também apresentam diferentes métodos de agendamento de tarefas para o atendimento de conexões e mostram seu impacto na eficiência energética. Os resultados da simulação mostraram que o método proposto melhora consideravelmente a probabilidade de bloqueio de largura de banda e a eficiência energética da rede. Sobre os métodos de agendamento, se as conexões que possuem maiores taxas forem atendidas primeiro, o desempenho na taxa de bloqueio é aumentado.

Em [121], os autores investigam o problema de otimização de recursos de espectro e o consumo de energia nas EONs através de solicitações *multicast*. Os autores propõem um esquema de agregação de tráfego EG e OG *multicast* eficiente em termos de energia. A agregação de tráfego, em conjunto com a estratégia proposta, otimiza o consumo de energia total, reduzindo o uso de BVTs e BV-OXCs durante o roteamento. Os resultados demonstram que a estratégia proposta pode melhorar significativamente a utilização do espectro e melhorar a eficiência energética da rede em aplicações *multicast*.

Os autores em [116] abordam o problema RMLSA através do impacto da capacidade dos transmissores na agregação elétrica para a eficiência energética. Os autores dividem o problema RMLSA em etapas e formulam modelos MILP para otimizar os parâmetros do transmissor e minimizar o consumo total de energia da rede. Os resultados de simulação mostraram que a solução proposta reduz o consumo de energia da rede em mais de 9% em comparação com o cenário sem agregação de tráfego.

Os autores em [113] propõem um esquema para a criação de redes ópticas virtuais (*Virtual Optical Network Embedding – VONE*) com eficiência energética para SBVT-EONs. Neste esquema, dois métodos de economia de energia são propostos com foco nos transmissores e nós. Os resultados de simulação demonstraram que os esquemas baseados em transmissores atingem uma maior eficiência energética para cargas de tráfego alta enquanto os esquemas baseados em nós apresentam melhores resultados em cargas baixas. Posteriormente, os mesmos autores em [44] expandem seu trabalho anterior e investigam melhor o desempenho do problema para os cenários de tráfego estático e dinâmico EON. Eles ainda elaboram uma modelagem ILP que tem como objetivo reduzir o gasto energético da rede e compara seus resultados com as heurísticas propostas.

3.1.3 Eficiência energética com Modulação Adaptativa

O uso de alocação de espectro com modulação adaptativa (*Adaptive Modulation Level Allocation – AMLA*) em EONs também permite o ajuste flexível da largura de banda, pois dependendo da modulação adotada, as subportadoras são capazes de trafegar mais bits por símbolo. Isso faz com que cada nível de modulação possua um gasto de energia distinto, de tal forma que níveis de modulação que carregam mais bits por símbolo consomem mais

energia. Em contrapartida, estes níveis de modulação são menos robustos em termos de QoT e mais suscetíveis ao OSNR. Por este motivo, define-se a distância de transmissão do caminho óptico como o fator relevante no momento de sua criação. Todos esses fatores e compromissos são profundamente investigados na literatura EON.

Em [103] os autores avaliam a eficiência energética das redes ópticas tradicionais WDM e das EONs no cenário de tráfego estático. Os autores apresentam vários métodos e medidas para mensuração dos gastos energéticos dos diferentes componentes das arquiteturas WDM e EON. Algoritmos heurísticos RMLSA (para EON) e RWA (para rede WDM) com foco na economia energética são desenvolvidos. Conclui-se que as EONs possuem soluções mais eficientes em termos energéticos, uma vez que são capazes de lidar com uma maior quantidade de tráfego utilizando menos recursos.

Posteriormente em [14] os autores ampliam a análise feita em [103] para um cenário de tráfego dinâmico. Os autores propõem heurísticas para alocação de espectro dinâmico em ambas as arquiteturas de rede WDM e EON com foco na economia energética. Com base nos resultados apresentados, conclui-se que as EONs podem ser consideradas como uma solução eficiente em termos energéticos para o funcionamento das redes de transporte óptico dinâmicas do futuro.

Em [27], os autores apresentam com mais detalhes as análises realizadas em [103] e em [14], apresentando mais informações sobre os algoritmos e parâmetros heurísticos propostos, fornecendo uma visão ampla das situações em que uma EON pode ser benéfica em termos de eficiência energética para futuras redes ópticas.

Os autores em [110] e posteriormente em [111] investigam a eficiência energética das EONs em relação com as redes WDM. Um modelo de programação linear inteira misto é desenvolvido para minimizar o consumo total de energia de ambas as redes. Os resultados mostram uma economia de até 31% do consumo total de energia da rede em comparação com as redes WDM. A economia é ainda maior quando compara-se apenas a camada óptica de ambas as redes, cerca de 55%. Os autores também avaliam o consumo das redes em um cenário de tráfego assimétrico, em que o tráfego é maior em determinados nós da topologia. Nestes casos, o consumo energético das EONs aproxima-se bastante das rede WDM tradicionais.

Em [118], os autores propõem um algoritmo RMLSA que leva em consideração parâmetros de consumo energético para escolher caminhos com o menor consumo de energia. O algoritmo representa o espectro da rede através de multi-grafos utilizando diferentes níveis de modulação e escolhendo àquela que leva ao menor consumo de energia. Os resultados mostraram que a solução proposta pode proporcionar uma economia de até 31% de energia e uma probabilidade de bloqueio até duas vezes menor que algoritmos clássicos.

Em [112], os autores avaliam o consumo de energia de três arquiteturas de transporte

óptico, são elas: (i) A DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) convencional de grade fixa; (ii) A DWDM de grade mista; e (iii) a EON. O consumo de energia é avaliado sob diferentes cargas e padrões de tráfego, bem como diferentes topologias físicas de rede. Os autores desenvolvem novos algoritmos heurísticos para avaliação da eficiência energética das arquiteturas. Os resultados mostraram que a escolha da arquitetura que traz mais eficiência em termos energéticos depende da topologia física da rede. A arquitetura EON demonstrou-se mais eficiente quando a distância média dos nós da topologia é baixa. Além disso, as EONs podem fornecer uma economia energética maior se o padrão de tráfego não for uniforme.

Os autores em [117] propõem um algoritmo de alocação de espectro que visa reduzir o consumo energético da EON adaptando dinamicamente o tipo FEC de acordo com o OSNR do circuito. O algoritmo escolhe sua rota com base em k -caminhos mais eficientes energeticamente e a modulação do circuito óptico (AMLA) é escolhida de acordo com o seu limiar de OSNR. Os resultados mostram que o consumo de energia diminui quando o algoritmo proposto é utilizado em comparação com os algoritmos da literatura. Além disso, o consumo de energia diminui à medida que o nível de modulação aumenta.

Em [105] os autores propõem um modelo de programação linear inteira mista para diminuir o consumo de energia no roteamento e alocação de espectro com modulação adaptativa e agregação de tráfego óptico na EON. Os autores ainda elaboram um algoritmo heurístico que obtém resultados próximos do modelo matemático proposto em uma rede de 8 nós. Os resultados de simulação mostram que o esquema proposto é capaz de reduzir o consumo de energia da rede enquanto mantém o desempenho na taxa de bloqueio quando comparado com o algoritmo *First-Fit-KSP* [63] clássico da literatura.

Os autores em [119] propõem um esquema de modulação adaptativa à distância, focado na eficiência energética. Seu objetivo é encontrar o nível mais baixo de modulação, sem aumentar o custo dos recursos do espectro. Os resultados demonstram que o esquema proposto economiza o consumo de energia em comparação a outros esquemas de literatura mesmo sem aumentar o consumo do espectro.

3.1.4 Sobrevivência e Eficiência Energética

Estratégias de sobrevivência no contexto de EONs é um assunto bem estudado na literatura. Por outro lado, no contexto da eficiência energética EON, a sobrevivência ainda foi pouco explorada, mas é um tema bastante promissor.

Em [104] os autores destacam os benefícios oferecidos pelas EONs em termos da eficiência energética em comparação com as redes WDM tradicionais. Os autores ainda comprovam que a elasticidade oferecida pela EON reduz o consumo de energia elétrica através do desligamento de subportadoras ociosas. Os autores concluem que o esquema

de proteção compartilhado oferece resultados significativamente melhores que os com proteção dedicada.

Em [98] os autores avaliam o impacto da variação horária do tráfego da rede para reduzir a energia consumida pelos recursos de *backup*, adaptando sua taxa à largura de banda atual exigida. Este modelo é aplicado na arquitetura WDM com grade fixa e mista e na arquitetura EON. Os resultados obtidos mostram que, para cargas elevadas de tráfego, podem ser obtidas economias de energia substanciais de até 27% para a arquitetura EON quando exploradas as informações da variação horária do tráfego para os recursos de *backup*.

Os autores em [99], desenvolvem um algoritmo RMLSA para a proteção de caminhos ópticos dedicados e compartilhados no cenário de tráfego estático. No algoritmo proposto, a eficiência energética é alcançada através da adaptação dinâmica do uso de BVTs e do nível de modulação escolhido. Além disso, o algoritmo proposto estabelece um compromisso entre o consumo de energia e a fragmentação da rede. Os resultados de simulação mostraram que, em termos de economia de energia e utilização do espectro, os algoritmos propostos refletiram bons desempenhos em economia de energia de espectro.

Os autores em [109] investigam o problema de proteção de falha única com eficiência energética para tráfego assimétrico em EON. Os autores abordam este problema com o uso de *p-Cycles* direcionados pré-configurados na rede. Foi elaborado um modelo MILP para minimizar o consumo de energia enquanto leva em consideração a geração dos *p-Cycles* direcionados, alocação de espectro e adaptação do formato de modulação. Os resultados mostraram que os *p-Cycles* direcionados alcançam uma economia significativa de energia para proteção de tráfego assimétrica em comparação com *p-Cycles* não direcionados.

Em [21], são estudados o problema de alocação de espectro para a sobrevivência em redes definidas por software (*Software Defined Network* - SDN). Os autores propõem uma modelagem ILP para minimizar o uso de BVTs e de espectro no cenário de tráfego estático. Os autores também desenvolvem um algoritmo heurístico para proteção que cria caminhos de *backup* compartilhados através da agregação de tráfego. O estudo avalia o consumo de energia dos elementos ópticos no plano de dados da rede. Os resultados numéricos do esquema proposto mostram que obtêm-se desempenhos melhores na proteção em relação aos esquemas da literatura além de se obter uma economia de energia significativa.

Os autores em [106], propõem uma abordagem integrada para o problema RMLSA com minimização do consumo energético para EONs em subdomínios de sobrevivência. São elaborados dois modelos ILPs baseados em caminhos compartilhados e disjuntos para otimização do consumo de energia em conjunto com a utilização do espectro. O desempenho de ambas as abordagens apresentam melhores resultados na economia do consumo de energia, bem como na utilização do espectro, em comparação com a implantação de

abordagens fragmentadas.

3.2 Oportunidades de Pesquisa

O grande número de pesquisas relacionadas ao paradigma EON reforça seu papel no futuro das redes ópticas. Contudo, as pesquisas sobre eficiência energética EON ainda estão sendo exploradas e uma série de questões ainda precisam ser estudadas. A indisponibilidade comercial dos equipamentos de largura de banda variável OFDM impossibilita que pesquisas mais complexas possam ser elaboradas.

Além disso, pesquisas que exploram todas as características da arquitetura EON ainda precisam ser ampliadas, benefícios como o modo de suspensão (*Sleep Mode*), abordagens *Energy-Proportional* e esquemas de proteção voltados à eficiência energética tornam-se tópicos interessantes para pesquisas futuras.

Conforme mencionado na Seção 3.1, estudos que avaliam o tráfego assimétrico ainda são escassos na literatura. Outra questão é a mensuração monetária do gasto energético de uma EON. A Tabela 3.1 apresenta o levantamento dos artigos da literatura EON com foco na eficiência energética. Percebe-se que na classificação apresentada, a literatura explora pouco o cenário de tráfego dinâmico *multihop* com modulação adaptativa. O único artigo encontrado não leva em consideração nenhum tipo de agregação de tráfego. Portanto, não foi encontrado nenhum artigo que inclui todas as possíveis características proporcionadas pela engenharia de tráfego EON no contexto da eficiência energética.

A alocação de espectro com foco na camada física é outro componente pouco explorado pela literatura [64, 68]. A união dessas e de outras características apresenta-se como aspectos relevantes para futuras pesquisas. De acordo com o levantamento realizado, somente um artigo observa os impactos da fragmentação do espectro em relação a eficiência energética da rede. Em relação ao roteamento *multipath*, não foi encontrado nenhum estudo sobre eficiência energética EON.

Esta **Tese** procura elucidar melhor essas questões e como a união de todas essas características pode ser utilizada para propor soluções eficientes e que apresentem uma boa eficiência energética EON. Como forma de preencher algumas das lacunas apresentadas pela literatura EON, o Capítulo 4 desta **Tese** apresenta uma solução de roteamento *multi-hop* para o cenário de tráfego dinâmico que resolve o problema RMLSA com técnicas AMLA sofisticadas. Em seguida, o Capítulo 5 elabora modelos ILP para o problema RMLSA transparente, translúcido e com agregação elétrica e óptica no cenário de tráfego dinâmico. Por fim, o Capítulo 6 desenvolve um algoritmo heurístico inovador para resolução do problema RMLSA translúcido dinâmico que utiliza técnicas de EG e OG.

Capítulo 4

Esquema de Modulação Adaptativa para Eficiência Energética EON

No Capítulo 3 foram apresentados diversos trabalhos que abordam a questão da eficiência energética em EONs. A preocupação com consumo energético das redes de transporte óptico é incontestável e o impacto das TICs no consumo de energia mundial vêm crescendo consideravelmente nos últimos anos [22].

Como forma de preencher algumas das lacunas apresentadas pela literatura, este capítulo apresenta uma abordagem RMLSA com roteamento *multi-hop* no cenário de tráfego dinâmico. A solução proposta tem como objetivo melhorar a eficiência energética da rede sem prejuízos no desempenho de bloqueio. O esquema é capaz de utilizar qualquer abordagem RSA para resolver o problema RMLSA. No problema RMLSA, pode-se atribuir diferentes formatos de modulação às subportadoras, oferecendo assim, soluções de engenharia de tráfego mais complexas e eficientes para alocação de recursos na rede [34].

Com base nas observações de trabalhos anteriores [126, 127], foi apontado que a utilização de níveis de modulação mais eficientes espectralmente é uma boa estratégia para resolver o problema RMLSA no cenário de tráfego dinâmico.

Dessa forma, o autor desta **Tese** publicou em [59] um esquema de modulação adaptativa que permite a utilização de qualquer abordagem RSA clássica para resolver o problema RMLSA. O esquema proposto visa estabelecer o roteamento do tráfego através de múltiplos saltos na topologia virtual, tendo como objetivo atender as requisições de tráfego com níveis de modulação adequados à distância percorrida pelas rotas.

Em [128], são apresentadas novas perspectivas observando as características da eficiência energética no esquema proposto em [59]. Os autores demonstraram que além da redução na taxa de bloqueio de banda, o esquema ainda proporciona uma eficiência energética de até 34% na rede quando comparada com abordagens da literatura.

Com base nestas análises, este capítulo apresenta uma extensão do esquema de modulação adaptativa proposto pelo autor em [59] com foco na eficiência energética. O estudo propõe uma abordagem RMLSA que utiliza técnicas de alocação de espectro com modulação adaptativa, proporcionando uma menor utilização do espectro através do uso de níveis de modulação mais eficientes.

Para isso, o novo esquema avalia a fragmentação da rede para atribuir de forma dinâmica os atributos fixos do esquema anterior. Além disso, é proposta uma abordagem dentro do esquema que utiliza níveis de modulação mais eficientes espectralmente com o intuito de utilizar menos espectro e economizar energia. Os resultados numéricos mostram que o esquema proposto alcança uma redução no bloqueio da largura de banda de até duas ordens de grandeza em um cenário de rede sub carregado e 86% com cargas mais altas em relação as abordagens da literatura proporcionando um ganho na eficiência energética de até 40% em topologias menores.

O restante deste capítulo apresenta os trabalhos relacionados que envolvem o esquema proposto, descreve o funcionamento do novo esquema de modulação adaptativa, apresenta o ambiente de simulação considerado e mostra os resultados preliminares obtidos. No final do Capítulo, resume-se o estudo apresentado.

O estudo apresentado neste Capítulo, gerou duas publicações em conferências [128, 101] e uma em revista [59].

4.1 Trabalhos Relacionados

Recentemente, há um número crescente de trabalhos de pesquisa que investigam soluções para o problema de roteamento e atribuição de espectro em redes EON. Os problemas de alocação de espectro são investigados sob diversos cenários de rede com roteamento *singlehop* ou *multihop*, incluindo considerações sobre a tecnologia de modulação e distância adaptativa do canal.

Em [63], os autores propuseram três heurísticas para solucionar o problema RSA em um cenário de tráfego dinâmico. A primeira heurística (KSP) é um algoritmo dividido em dois passos, em que é utilizado o algoritmo de Yen KSP [129] para encontrar as k -menores rotas da origem ao destino da demanda e em seguida o algoritmo tenta alocar a demanda em uma dessas k -rotas. A segunda heurística apresentada foi o algoritmo MSP (*Modified Dijkstra Shortest Path*), que procura a menor rota possível para alocar a demanda de tráfego baseado no algoritmo de *Dijkstra*. A terceira heurística foi o algoritmo SPV (*Spectrum-Constraint Path Vector Searching*), que consiste em um algoritmo de busca e construção de uma árvore para encontrar o menor caminho com espectro disponível para

atender à demanda. Os resultados apresentados demonstram uma redução significativa na taxa de bloqueio em relação a algoritmos RWA tradicionais em redes WDM.

O problema RMLSA foi inicialmente apresentado em [34], onde os autores adicionam o formato de modulação ao problema RSA. Posteriormente, o problema RMLSA foi investigado em [66], onde os autores avaliam os efeitos da modulação adaptativa nos mesmos algoritmos de [63]. Os autores propõem um esquema de modulação adaptativa para o problema RSA denominado *mAdap*.

O *mAdap* faz com que os algoritmos procurem uma rota com a maior modulação possível e caso não encontrem, ou esta rota seja longa demais para o formato de modulação escolhido, sua modulação é diminuída e o algoritmo é executado novamente. Para isso, o esquema é baseado em três etapas: (i) seleciona o formato de modulação; (ii) resolve o problema RSA; (iii) e verifica a distância de transmissão da modulação escolhida. O esquema pode ser visto na Figura 4.1.

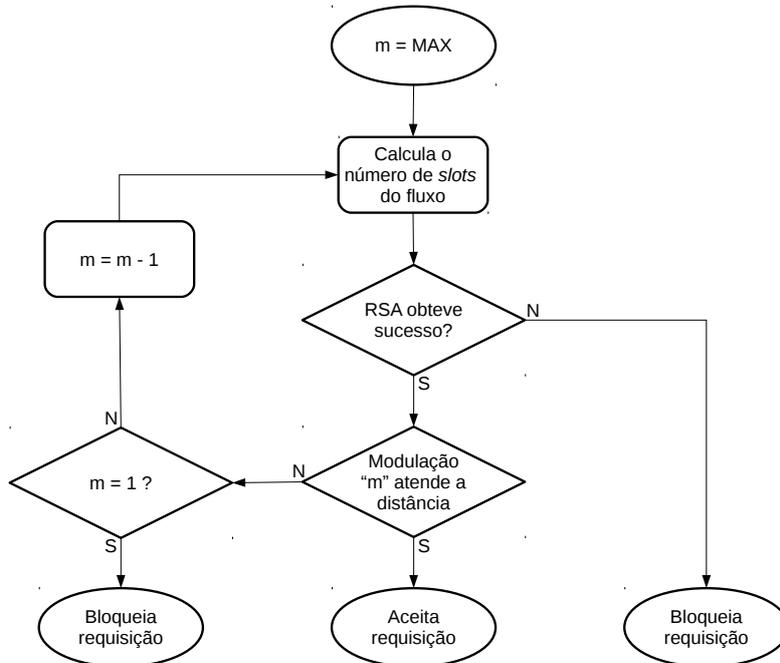


Figura 4.1: Esquema de modulação adaptativa para o problema RSA *mAdap*.

A cada chegada de fluxo com taxa em b/s , o algoritmo escolhe o maior nível de modulação disponível no transmissor, em seguida calcula o número de *slots* necessários, dada esta modulação e o tamanho em Hz dos *slots* da rede, para atender a demanda. Uma vez conhecido o número de *slots* necessários para atender a demanda, calcula-se a rota, de acordo com algum algoritmo RSA e em seguida verifica se existe uma rota disponível que atenda os requisitos de continuidade e contiguidade do problema RSA. Caso não exista

rota disponível, bloqueia-se a requisição, caso exista rota disponível, verifica se a distância percorrida por essa rota atende os requisitos mínimos de QoT da modulação. Caso a rota atenda os requisitos mínimos de QoT da modulação escolhida, a requisição é aceita, caso não atenda, o nível de modulação é diminuído e recalcula-se o número de *slots* que é necessário para atender a demanda neste novo nível de modulação.

Esse laço é executado até o menor nível de modulação possível do transmissor. Se mesmo no menor nível de modulação possível, o algoritmo RSA fornecer uma rota que não atende os requisitos de QoT da aplicação então a requisição também é bloqueada. Os resultados apresentados dessa abordagem são comparados com um ILP proposto e apresentam uma redução significativa na taxa de bloqueio e no uso do espectro.

O uso do esquema de modulação adaptativa *mAdap* faz com que qualquer abordagem RSA possa resolver o problema RMLSA. Suas características ainda propiciam uma melhora no desempenho da abordagem RSA além de tornar a solução como um todo um pouco mais realista para o cenário de rede EON [66]. Os resultados de simulação para este trabalho mostraram uma redução significativa no bloqueio e no uso do espectro.

Os autores em [130] propõem o primeiro algoritmo de modulação adaptativa com técnicas de agregação de tráfego. No algoritmo proposto, as demandas de tráfego com mesma origem que compartilham o mesmo enlace são agregadas opticamente e comutadas pelo meio óptico sem a utilização de bandas de guarda. Embora o algoritmo leve em consideração o uso da modulação adaptativa, o trabalho não leva em consideração o ambiente de tráfego de rede dinâmico, somente a abordagem estática. Outro fator importante não investigado é o uso de múltiplos saltos na topologia virtual.

Até o momento, são poucos os trabalhos que consideram o uso do roteamento *multihop* e o cenário de modulação adaptativa em EON. Em trabalhos anteriores do autor desta Tese [127, 126], uma abordagem para o problema RMLSA translúcido em SBVT-EONs foi apresentada. A solução foi comparada com várias abordagens RSA utilizando o esquema *mAdap*. Os resultados demonstraram que o multi-hop pode maximizar o uso das modulações mais eficientes, melhorando a utilização dos recursos espectrais e levando à eficiência energética.

Observando as vantagens do roteamento *multihop* com o uso de modulação adaptativa, os autores desta Tese apresentaram em [59] e, posteriormente, em [128], um novo esquema de modulação adaptativa chamado **AMMS** (*Adaptive Modulation Multi-hop Schema*). O AMMS estabelece soluções de engenharia de tráfego através de múltiplos saltos na topologia virtual. Os resultados mostram uma redução de até 82% na taxa de bloqueio de banda e um ganho de eficiência energética de até 34% em comparação com abordagens da literatura.

Em [119], é proposto o primeiro esquema de modulação adaptativa à distância, focado na eficiência energética, chamado **EEMS** (*Energy-efficient Modulation Scheme*). O *EEMS* visa encontrar o nível mais baixo de modulação, sem aumentar o custo dos recursos do espectro. Para isso, o esquema propõe um mecanismo que utiliza níveis de modulação mais robustos sem aumentar o espectro (número de slots) para economizar energia, considerando que os níveis de modulação robustos são mais eficientes em termos energéticos. Os resultados demonstram que o esquema *EEMS* não aumenta o consumo do espectro, ao mesmo tempo em que economiza o consumo de energia em comparação ao esquema *mAdap*. Com base nos esquemas de modulação adaptativa apresentados, pode-se observar que o uso desses esquemas traz benefícios às soluções de engenharia de tráfego.

Embora o esquema *mAdap* forneça o nível de modulação mais adequado para a solução de engenharia de tráfego, estudos posteriores (por exemplo [126, 59]) mostraram as vantagens que o *multihop* fornece ao utilizar níveis de modulações mais eficientes proporcionando a economia do espectro. O esquema *AMMS* mantém parâmetros fixos e não fornece modulações diferentes nos caminhos ópticos da solução *multihop*. Por outro lado, a técnica utilizada pelo esquema *EEMS*, que consiste no uso de modulações mais robustas para proporcionar uma maior eficiência energética, prejudica os algoritmos RSA que executam a agregação de tráfego, EG ou OG, pois estabelece caminhos ópticos com taxas mais baixas.

4.2 Esquema de modulação adaptativa *DMMAS*

Com base nos esquemas de modulação adaptativa apresentados em [59, 128, 66], a proposta deste capítulo visa criar um novo esquema de modulação adaptativa, denominado *DMMAS* (*Dynamic Multi-Modulation Allocation Scheme*) que estende o antigo *AMMS* (*Adaptive Modulation Multihop Schema*) [59].

O *DMMAS* atribui formas dinâmicas para o uso do roteamento *multihop* por meio do índice de fragmentação da rede. Além disso, propõe-se um mecanismo de *Energy-Aware* que utiliza níveis de modulação mais eficientes espectralmente com o intuito de utilizar menos espectro e economizar energia.

O *DMMAS* tem como objetivo atribuir níveis de modulação adequados, associado a uma quantidade de saltos necessários para atender uma requisição de tráfego. Para atingir esse objetivo ele caracteriza a rede em zonas de alcançabilidade.

A implementação das zonas de alcançabilidade se dá por meio de gráficos auxiliares (AGs) que representam o alcance relativo de cada nó para um nível de modulação específico. A partir da topologia física, o mecanismo constrói topologias de modulação (*off-line*) cujas arestas representam a zona de alcançabilidade de cada nó. Cada aresta, na determi-

nada topologia de modulação, é construída a partir do caminho mais curto entre os nós, satisfazendo o alcance do nível de modulação adotado para fornecer um QoT aceitável na rede.

A Figura 4.2 mostra as topologias virtuais de modulação para uma topologia física com 7 nós. Neste exemplo, os formatos de modulação BPSK e QPSK foram considerados permitindo alcances máximos de 8000 e 4000 km, respectivamente, de acordo com a Tabela 2.1.

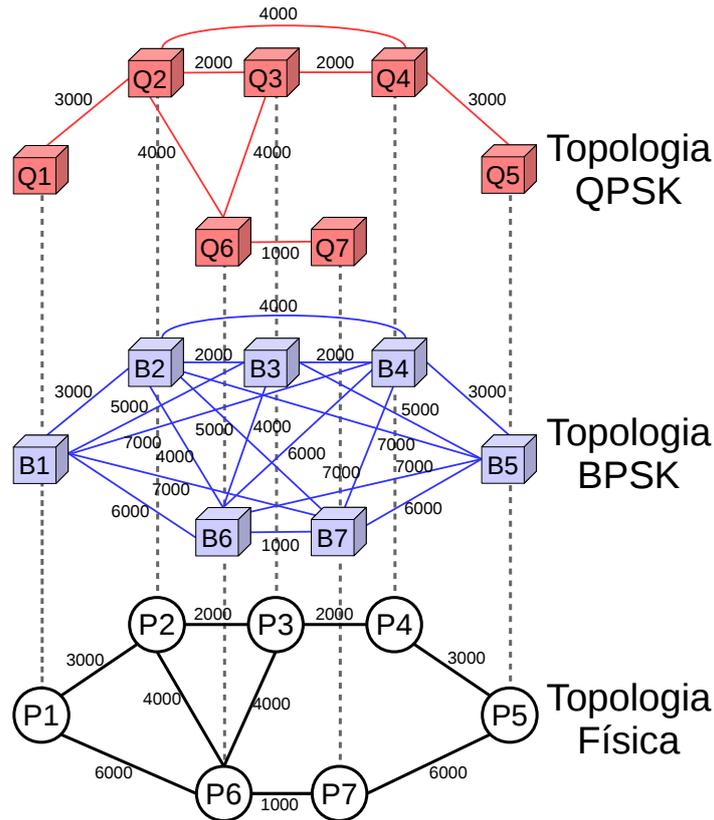


Figura 4.2: Exemplos de topologias virtuais de modulação para uma topologia com 7 nós. As distâncias dos enlaces são apresentadas em quilômetros.

Pode-se observar que em cada topologia as arestas são construídas a partir dos alcances entre os nós. O peso da aresta representa a menor distância entre os nós (a soma das arestas que compõe a menor distância). Portanto, isso representa que cada par de nós ligados por uma aresta pode estabelecer um caminho óptico fim-a-fim no determinado nível de modulação.

Por exemplo, considere um pedido de conexão do nó P1 para o nó P4, é possível atender a conexão com apenas um caminho óptico ($B1 \rightarrow B4$) no nível de modulação

BPSK, no entanto são necessários no mínimo 2 caminhos ópticos ($Q1 \rightarrow Q2 \rightarrow Q4$) para atender a conexão no nível de modulação QPSK.

A ideia geral é dividir a rota da requisição de tráfego em várias partes procurando sempre atender os níveis de modulação mais adequados a essa requisição. Para isso, o esquema é composto por uma estrutura de dados, computada *off-line*, formada a partir dos k -menores caminhos entre cada par de nós de cada topologia virtual de modulação.

O *DMMAS* contém uma rotina, chamada $\omega(s, d, k, M)$, que obtém o k -menor caminho entre os nós de origem e destino da requisição de tráfego (s e d), sob a topologia virtual de modulação M . A rotina $\omega(s, d, k, M)$ retorna um conjunto de sub-caminhos $P = p_1m_1, \dots, p_nm_n$ tal que $p_i = \{s', d', b\}$, em que cada sub-caminho p_i é associado a um nível de modulação m_i e cada sub-fluxo compõe uma parte do caminho entre os nós de origem e destino (s e d) da requisição. Portanto, ω define os nós de articulação da solução RMLSA da requisição $R\{s, d, b\}$.

Cada travessia em cada nó de articulação representa uma conversão OEO ou, em outras palavras, um salto na topologia virtual. Dessa forma, a rotina ω retorna um conjunto P , em que o número de sub-caminhos deste conjunto ($|P|$), representa o número de execuções de um algoritmo RSA necessários para atender a demanda.

A Figura 4.3 faz a ilustração da relação entre nós de articulação e o número de sub-caminhos do conjunto P para uma requisição $R\{s, d, b\}$. Supondo que $\omega(s, d, k, m)$ retorne $P = p_1m_1, p_2m_2, p_3m_3$, existirão 2 nós de articulação (x, y), 3 caminhos de rede ($p[s, x], p[x, y], p[y, d]$) e 4 nós no caminho total da solução RMLSA para R .



Figura 4.3: Exemplo de relação entre nós de articulação e o número de sub-caminhos de um conjunto P para uma requisição $R\{s, d, b\}$.

4.2.1 Restrição *multihop* (MHC)

Com o intuito de escolher um nível de modulação apropriado à demanda, um número específico de nós de articulação deve ser calculado, tendo em vista que muitos nós de articulação significam muitos saltos virtuais, o que poderá prejudicar a qualidade da solução.

Nos trabalhos [59, 128], uma constante, denominada *MHC* (*multihop Constraint*), foi definida baseada em dados empíricos. Para o *DMMAS* [101] a constante foi modificada para se basear no índice de fragmentação do estado atual da rede.

O *MHC* é um mecanismo de controle que define o número apropriado de saltos virtuais que o esquema irá propor. Além disso, o *MHC* também impacta na escolha do nível de modulação apropriado para a solução RMLSA.

Para definir o valor do *MHC* são considerados a topologia de rede, os níveis de modulação adotados na rede e o índice de fragmentação do estado atual da rede, como mostra a Equação 4.1

$$MHC = \left\lceil \frac{dia \cdot F_{ent}}{Reach(maxM)} \right\rceil \quad (4.1)$$

onde “*dia*” é o diâmetro da rede e “*Reach(maxM)*” representa o alcance máximo do nível de modulação mais eficiente espectralmente na rede. Por último, calcula-se o índice de fragmentação da rede (F_{ent}) baseado na métrica de fragmentação da entropia de Shannon que é representado pela Equação 2.4 de acordo com [88].

Portanto, o *MHC* define um limite superior no número de nós de articulação. Mais especificamente, *MHC* representa o número máximo de saltos virtuais que o *DMMAS* deve propor para que se possa aceitar uma requisição de tráfego. Se a rotina $\omega(s, d, k, m)$ retornar um conjunto com um número de sub-caminhos maior que *MHC*, então o esquema irá ignorar este caminho para não oferecer uma solução com muito saltos na topologia virtual. Neste contexto, utiliza-se o índice de fragmentação como meio de avaliar o estado da rede e propor soluções com mais ou menos saltos na topologia virtual, quando necessário.

4.2.2 Módulo de Eficiência Energética do esquema *DMMAS*

Em [59] todos os segmentos do caminho óptico utilizam o mesmo nível de modulação, para o *DMMAS* vários níveis de modulação podem ser utilizados. Com o intuito de proporcionar a eficiência energética da rede, o *DMMAS* contém um módulo denominado, *EA-Scheme*. Este módulo procura encontrar o maior nível de modulação que atenda a restrição de alcance transparente (QoT) com o intuito de utilizar menos espectro na rede e por sua vez gastar menos energia. O módulo *EA-Scheme* pode ser visto na Figura 4.4.

O algoritmo recebe um conjunto P da rotina ω e atribui $i = 1$. Em seguida, m_i recebe o índice do nível de modulação mais eficiente espectralmente da rede ($maxM$) e verifica se o caminho p_i atende à restrição de alcance transparente da modulação m_i ($Reach(p_i, m_i)$), conforme a Tabela 2.1. Se a restrição de alcance transparente não for atendida, então decrementa m_i e verifica se m_i é menor ou igual à sua modulação inicial M . Caso contrário, o laço é executado novamente. Se a restrição de alcance for satisfeita

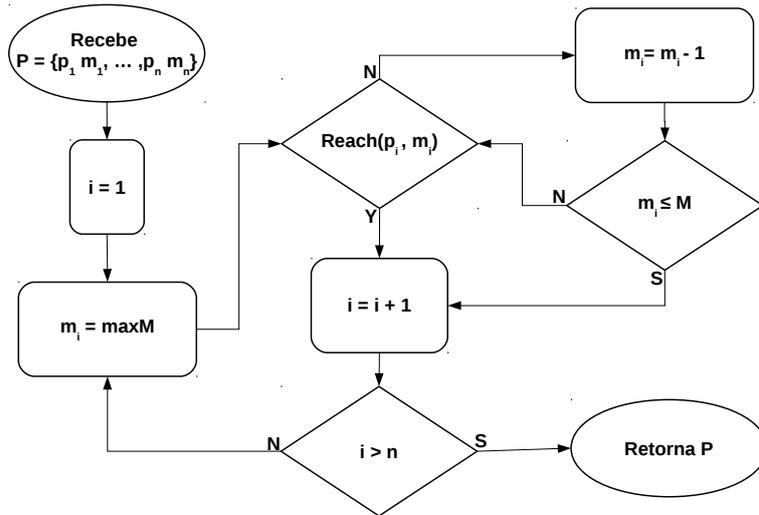


Figura 4.4: Módulo *Energy-Aware* do esquema *DMMAS* (*EA-Scheme*).

ou $m_i = M$, i será de incrementado e o mesmo procedimento será realizado para os outros sub-caminhos de P até seu retorno.

Em resumo, o módulo *EA-Scheme* busca atribuir os melhores níveis de modulação para cada $p_i \in P$ com o intuito de proporcionar eficiência energética utilizando um nível de modulação mais eficiente e por sua vez utilizando menos espectro.

4.2.3 Esquema de Modulação Proposto

O esquema geral do *DMMAS* pode ser visto na Figura 4.5.

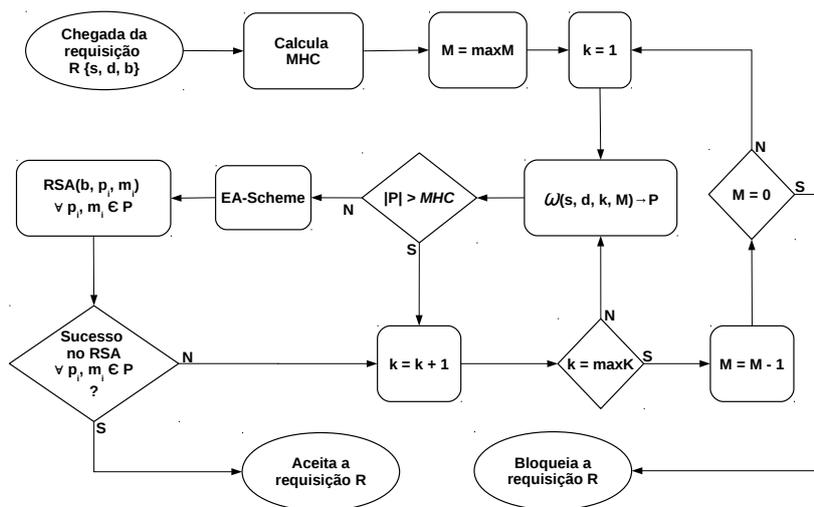


Figura 4.5: Esquema de modulação adaptativa *DMMAS*.

A cada chegada de requisição $R\{s, d, b\}$, o primeiro passo é calcular o MHC e definir o número máximo de saltos (caminhos ópticos) que podem ser utilizados para atender R . Em seguida, o esquema escolhe o nível de modulação mais eficiente, em termos de uso do espectro, disponível na rede ($M = \max M$). Posteriormente, atribui $k = 1$ e executa a rotina $\omega(s, d, k, M)$, baseado no k -menor caminho e no nível de modulação M , definindo o conjunto “ P ”. Depois, o algoritmo verifica se o número de sub-caminhos em “ P ” ($|P|$) é maior que “ MHC ”. Se não for, o conjunto “ P ” é enviado para o módulo *EA-Scheme* que atribui os níveis de modulação mais eficientes espectralmente maiores que M para cada $p_i \in P$. Em seguida, o módulo *EA-Scheme* retorna “ P ” para o algoritmo *RSA* para que ele possa resolver o problema RSA para todo $p_i \in P$ com o nível de modulação $m_i \in P$.

Se o algoritmo *RSA* atribuir espectro para todos os sub-fluxos de “ P ”, então a requisição R é aceita na rede. Caso contrário, ou se $|P| > MHC$ (passo anterior), incrementa-se o valor de k . O próximo passo verifica se $k = \max K$, se não for, a rotina $\omega(s, d, k, M)$ é executada novamente com um novo valor de k , caso contrário decrementa-se M , atribui $k = 1$ e executa-se os passos anteriores novamente. Este laço é executado até $M = 0$, em caso de insucesso, bloqueia-se a requisição R .

4.2.4 Complexidade do esquema *DMMAS*

A complexidade de tempo da fase *offline* do esquema *DMMAS* é analisada como segue. Para construção das topologias de modulação tem-se $|V|^2$ execuções do algoritmo de Dijkstra para cada par de nós. Logo a complexidade de tempo é dada como $O(|V|^2 * (|E| + |V|\log|V|))$, onde E é o conjunto de enlaces e V é o conjunto de nós da rede. Para formar a estrutura de dados que armazena os k -menores caminhos entre cada par de nós em cada topologia virtual de modulação, o algoritmo de YenKSP [129] é utilizado. Dessa forma, a complexidade de tempo final da fase *off-line* é dada como $O(m * |V|^2 * (k * |V|(E + |V|\log V)))$.

A complexidade de tempo da fase *on-line* do esquema *DMMAS* é baseada na quantidade de execuções do algoritmo *RSA* considerado. A rotina $\omega(s, d, k, m)$ pode ser executada até $\max K * \max M$ vezes e cada execução fornece até V execuções do algoritmo *RSA* adotado. Para o cálculo do MHC , considera-se a complexidade da Equação 2.5, que é dada por $O(|E| * S)$, onde S é o número de *slots* de um enlace. Para encontrar o nível de modulação mais eficiente, módulo *EA-Scheme*, executa no máximo $\max M * V$ vezes. Logo, a complexidade de tempo do esquema *DMMAS* é dado como $O(2|V| * \max K * 2\max M * |E| * s)$ multiplicado pela complexidade do algoritmo *RSA* adotado. É importante observar que $\max K$ e $\max M$ são, na prática, constantes de valor baixo.

4.3 Ambiente de Simulação

As simulações foram realizadas com o objetivo de avaliar o desempenho do esquema *DMMAS* proposto em comparação aos esquemas *mAdap*, *AMMS* e *EEMS*. Para todos os esquemas de modulação foi utilizado o algoritmo KSP [66] como RSA com o parâmetro de $k = 3$, alocação *first-fit* e roteamento *singlehop* com agregação elétrica de tráfego (EG) através da política *least used*. Para mostrar a importância e eficácia do *MHC*, também foi demonstrado o *DMMAS* sem *MHC* (*DMMASwoMHC*). Sem o *MHC*, o esquema irá propor soluções com saltos virtuais ilimitados.

Foram realizadas simulações usando o simulador de redes ONS [131]. Cada simulação foi realizada cinco vezes utilizando o método de replicações independentes. Para os resultados apresentados foram calculados intervalos de confiança com 95% de confiabilidade. Em cada simulação foram geradas 10^5 requisições de conexão com 6 níveis de granularidade: 25 Gb/s, 50 Gb/s, 100 Gb/s, 200 Gb/s, 300 Gb/s e 400 Gb/s com as proporções 6:5:4:3:2:1, respectivamente de acordo com [59, 128]. O processo de chegada das chamadas segue a distribuição de *Poisson* com um tempo médio de 600 segundos e com origem e destino distribuídos uniformemente para todos os pares de comunicação da rede.

As topologias consideradas nas simulações foram a USANet com 24 nós e 43 enlaces bidirecionais, e a topologia GERMAN com 17 nós e 25 enlaces bidirecionais. As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam as distâncias dos enlaces em quilômetros. Essas topologias foram usadas para exemplificar dois cenários realistas, porém distintos, um representando dimensões continentais de tamanho (USANet) e outra com dimensões curtas, como um país (GERMAN). Posteriormente, nota-se que esses cenários forçaram as soluções de alocação de recursos a se adaptarem a uma variedade diferente de formatos de modulação, devido ao seu alcance transparente.

A largura de banda de cada *slot* considerada foi 12,5 GHz e foi assumido que cada enlace possui a capacidade de 320 *slots*. Assume-se uma banda de guarda de 2 *slots*. Cada nó na topologia é equipado com transmissores e receptores suficientes sendo cada transmissor capaz de transmitir até 32 *slots*. As modulações consideradas são BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM com 1, 2, 3, 4, 5 e 6 bits por símbolo e, considerando eventuais regeneradores de sinal, calculam-se as distâncias máximas como 8000, 4000, 2000, 1000, 500 e 250 km, respectivamente conforme a Tabela 2.1.

4.4 Resultados Numéricos

Esta seção apresenta os resultados preliminares obtidos do novo esquema de modulação adaptativa proposto. As seguintes métricas são avaliadas para todos os algoritmos e

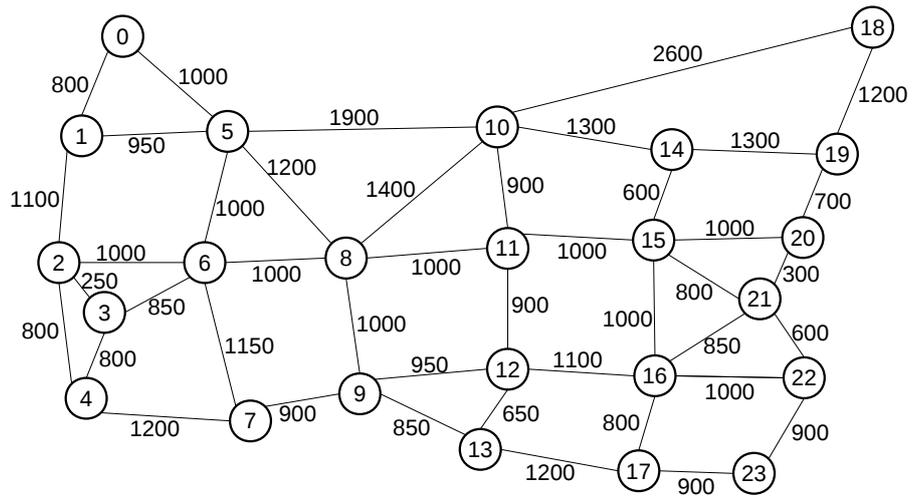


Figura 4.6: Topologia USANet.

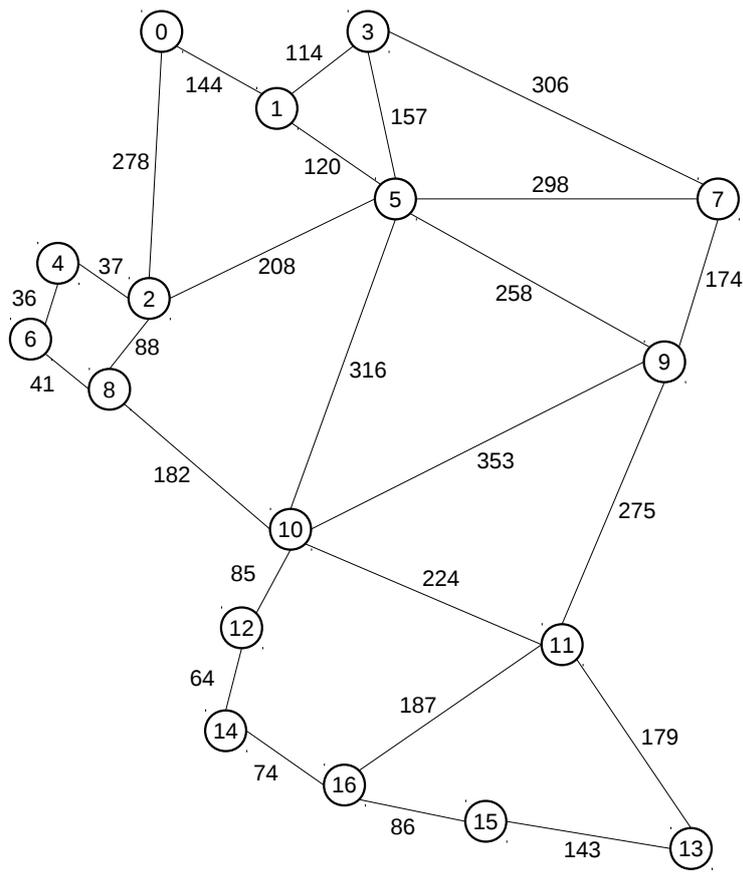


Figura 4.7: Topologia GERMAN.

esquemas de modulação adaptativa: taxa média do uso de modulação; taxa de bloqueio de banda (BBR); média de saltos na topologia virtual por requisição; taxa de fragmentação externa; e eficiência energética efetiva.

Taxa Média do Uso de Modulação

Para ilustrar melhor as restrições dos diferentes cenários de topologia, apresenta-se a taxa média do uso de modulação por meio da Tabela 4.1. Essa métrica indica a porcentagem de caminhos ópticos alocados por nível de modulação. Trata-se de um valor médio para todas as cargas de rede. Existe uma pequena variação entre as cargas, cerca de 2% no desvio padrão médio para todos os esquemas.

Como pode ser observado na Tabela 4.1, as modulações mais eficientes em termos espectrais raramente são usadas na topologia USANet, o que era esperado, visto que a maioria dos comprimentos de seus enlaces é maior ou próximo dos alcances dessas modulações. Por outro lado, na topologia GERMAN, as modulações menos eficientes praticamente não são usadas. Os resultados também evidenciam que o DMMAS sempre aproveita as técnicas de modulação espectralmente mais eficientes fornecidas pelos BVTs da rede, especialmente para topologias de distâncias curtas, o mesmo não ocorre com os outros esquemas.

Na topologia GERMAN, no DMMASwoMHC, por exemplo, pode-se observar o aumento no uso da modulação 64QAM, cerca de 81,03% dos caminhos ópticos estabelecidos utilizam esta modulação. Isto demonstra um aumento significativamente do seu uso, mesmo se comparado ao AMMS, com apenas 18,72%, o que demonstra a eficiência do módulo *EA-Schema*.

Tabela 4.1: Taxa Média do Uso de Modulação (%).

	Modulation	mAdap	AMMS	EEMS	DMMAS	DMMASwoMHC
USA	<i>BPSK</i>	24,00	0,07	23,65	0,16	0,03
	<i>QPSK</i>	42,07	2,29	56,47	4,79	1,65
	<i>8QAM</i>	21,66	13,37	10,82	21,27	9,54
	<i>16QAM</i>	11,62	84,03	8,90	73,18	88,31
	<i>32QAM</i>	0,33	0,11	0,05	0,45	0,34
	<i>64QAM</i>	0,33	0,13	0,11	0,15	0,12
GERMAN	<i>BPSK</i>	–	–	–	–	–
	<i>QPSK</i>	–	–	27,97	–	–
	<i>8QAM</i>	–	–	–	–	–
	<i>16QAM</i>	40,26	40,26	59,93	14,42	0,60
	<i>32QAM</i>	41,01	41,01	5,88	50,24	18,37
	<i>64QAM</i>	18,72	18,72	6,22	35,34	81,03

Taxa de bloqueio de banda (BBR)

O BBR (*Bandwidth Blocking Ratio*) reflete a taxa de banda bloqueada, quanto maior essa taxa, maior é a banda bloqueada. As Figuras 4.8 e 4.9 mostram o BBR dos algoritmos considerados para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e GERMAN, respectivamente.

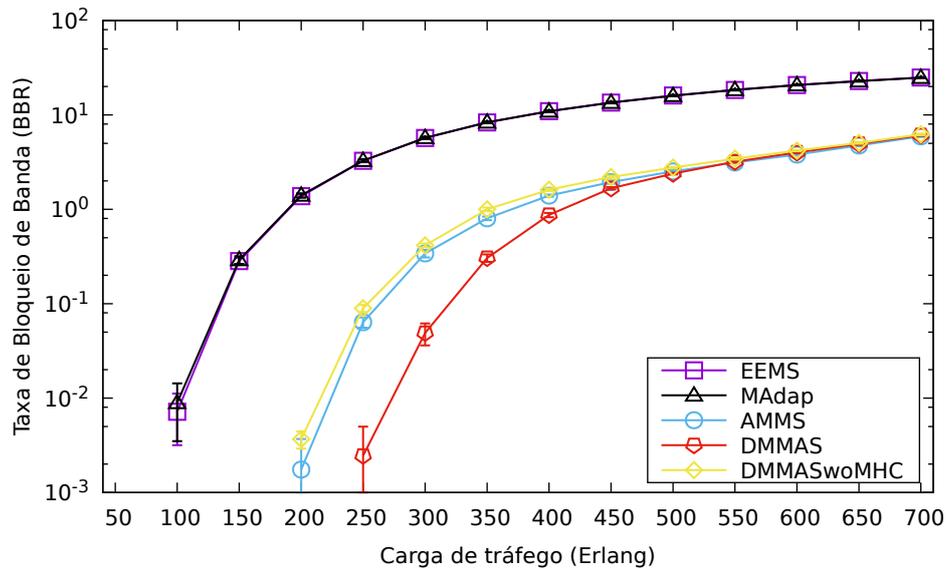


Figura 4.8: Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia USANet.

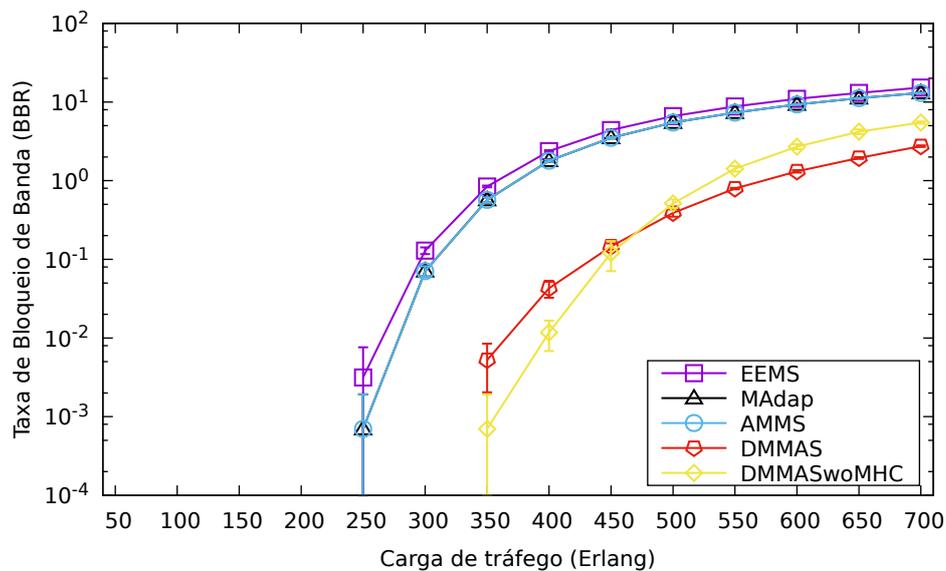


Figura 4.9: Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia GERMAN.

Observa-se que os resultados de BBR do esquema DMMAS alcançam um desempenho melhor que o esquema AMMS, em média de 77% na USANet e 86% na topologia GERMAN. Também é possível notar que, para cargas baixas e médias, o DMMAS obtém ganhos de até duas ordens de grandeza. Os ganhos em relação aos esquemas *mAdap* e EEMS são esperados e já explorados em [126] e [59], pois o uso do *multihop* oferece mais oportunidades para aceitar as solicitações de tráfego, diminuindo as restrições de continuidade do espectro e distância de transmissão do problema RMLSA.

Em relação ao AMMS, o esquema DMMAS traz duas vantagens: *EA-Schema* e o *MHC* dinâmico. O *EA-Schema* seleciona os níveis de modulação apropriados para o tamanho dos segmentos *multihop*, e o *MHC* limita dinamicamente o número de segmentos *multihop* usados na solução. Os benefícios do *MHC* dinâmico podem ser vistos quando comparados ao DMMASwoMHC. Nos resultados da topologia dos USANet, o DMMASwoMHC se torna muito semelhante ao AMMS, devido às maiores distâncias nessa rede. Para a topologia GERMAN, o DMMASwoMHC apresenta bons resultados para cargas mais baixas porque abusa do número de saltos virtuais, tornando seus caminhos ópticos muito curtos e permitindo a utilização dos formatos de modulação mais eficientes. Para cargas mais altas, esse comportamento ganancioso paga um preço alto pelo bloqueio devido o uso de mais bandas guarda no espectro. Essa combinação (*EA-Schema* e *MHC* dinâmico) suaviza os requisitos de continuidade do espectro utilizando melhor os recursos da rede.

Nota-se que as mudanças propostas no novo esquema de modulação adaptativa trouxeram uma redução na probabilidade de exaustão da rede. Ao utilizar o índice de fragmentação para avaliar o estado da rede, o esquema faz com que as soluções RMLSAs tenham mais possibilidades para atender as demandas através do controle no aumento do número de saltos virtuais da rede. Isto suaviza os requisitos de continuidade do espectro utilizando de forma melhor os recursos da rede.

Média de saltos na topologia virtual por requisição

O número de saltos na topologia virtual indica o número de conversões OEO e processamento elétrico que são utilizados na rede. As Figuras 4.10 e 4.11 mostram a média de saltos na topologia virtual por requisição para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e GERMAN, respectivamente.

Os esquemas *mAdap* e EEMS mantêm em qualquer carga de tráfego o valor esperado de um salto, porque eles empregam roteamento *singlehop*. Para o esquema AMMS, um comportamento semelhante é observado para a topologia GERMAN. Embora seja um esquema que implemente o *multihop*, o AMMS mantém seu valor constante de sal-

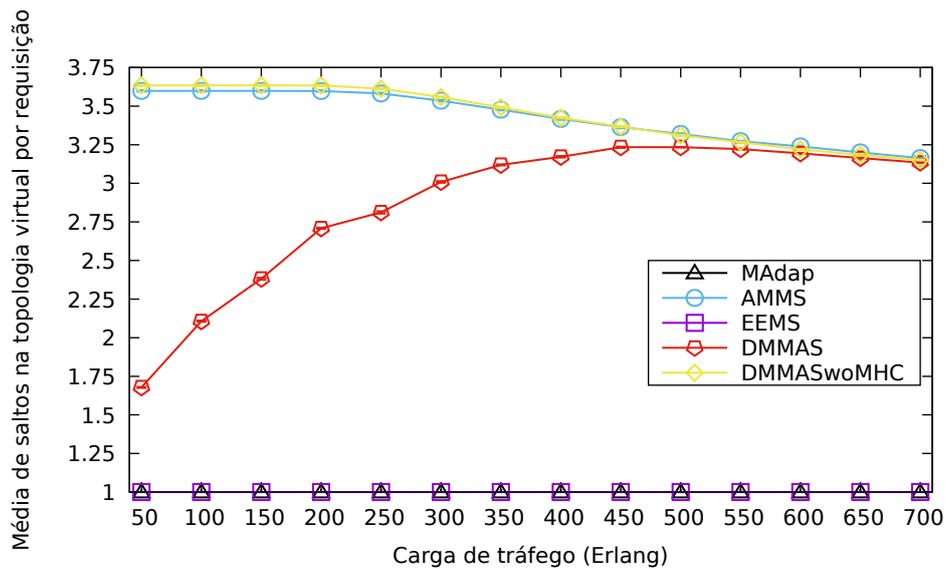


Figura 4.10: Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia USANet.

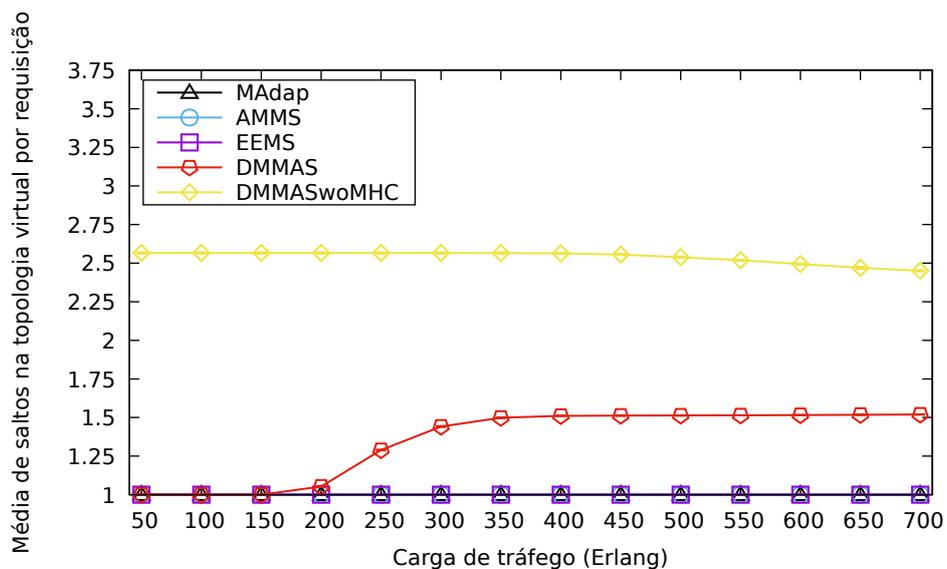


Figura 4.11: Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia GERMAN.

tos por requisição devido às curtas distâncias nesta topologia, que leva o valor de seu $MHC = 1$ [59].

Para a topologia USANet, o AMMS obteve um salto virtual médio entre 3 e 3,75 por requisição, próximo ao DMMASwoMHC. Na topologia GERMAN, o DMMASwoMHC apresenta aproximadamente uma média de 2,5 saltos. Isso ocorre porque o MHC é atribuído de forma estática no esquema AMMS e não é considerado no DMMASwoMHC, limitando assim as soluções à mesma quantidade de saltos virtuais. A pequena varia-

ção ocorre simplesmente devido à falta de recursos em cargas mais altas. Isso demonstra que em cenários com grandes distâncias, como apresentado na topologia USANet, o AMMS não é eficaz, comportando-se como uma solução sem qualquer limitação, como o DMMASwoMHC. Por outro lado, em redes mais curtas como a topologia GERMAN, o AMMS se comporta como um mecanismo de salto único, como o *mAdap* e o *EEMS*.

No DMMAS, o *MHC* é calculado dinamicamente, com base no índice de fragmentação da rede. Isto possibilita o esquema usar mais saltos quando os recursos se tornam escassos, adaptando-se melhor ao estado da rede. Na topologia GERMAN, o número de saltos virtuais propostos pelas soluções DMMAS é baixo, variando entre 1 a 1,5 em média. Na topologia dos USANet, o DMMAS propõe soluções com mais saltos, atingindo até 3,25 saltos à medida que a carga aumenta.

Estes resultados evidenciam que a proposta do fator *MHC* dinâmico baseado no índice de fragmentação da rede evita o atendimento das requisições de tráfego com um número excessivo de conversões OEO quando a carga é baixa e limita o uso do roteamento *multihop* desnecessário, contribuindo para a diminuição da latência total da rede.

Taxa de Fragmentação Externa

A taxa de fragmentação externa mede o nível médio de fragmentação externa de todos os links de rede durante o tempo de simulação, de acordo com a Equação 2.2. Níveis altos representam uma rede com um espectro fragmentado e, conseqüentemente, uma utilização ineficiente dos recursos do espectro. As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam a taxa de fragmentação externa da rede para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e GERMAN, respectivamente.

Pode-se observar que, para a topologia GERMAN, a taxa de fragmentação do esquema DMMAS é menor que os outros esquemas, com ganhos de até 52%. Na topologia dos USANet, a taxa de fragmentação apresentada pelo esquema DMMAS é muito próxima do AMMS, uma média de 19%. Para os outros esquemas, o DMMAS apresenta uma redução de até 55%. Isso demonstra que a estratégia do DMMAS fragmenta menos a rede. Isso ocorre porque o DMMAS usa níveis de modulação mais eficientes, que transportam mais bits por símbolo e, por sua vez, formam canais menores com maior capacidade. Canais mais estreitos impactam menos a fragmentação do espectro na rede.

Eficiência Energética Efetiva

Conforme mencionado na Seção 2.7.8, a eficiência energética efetiva (Equação 2.15) representa o *trade-off* entre a eficiência energética (Equação 2.14) e a eficiência da rede em termos de bloqueio de banda (BBR). Valores mais altos significam abordagens mais

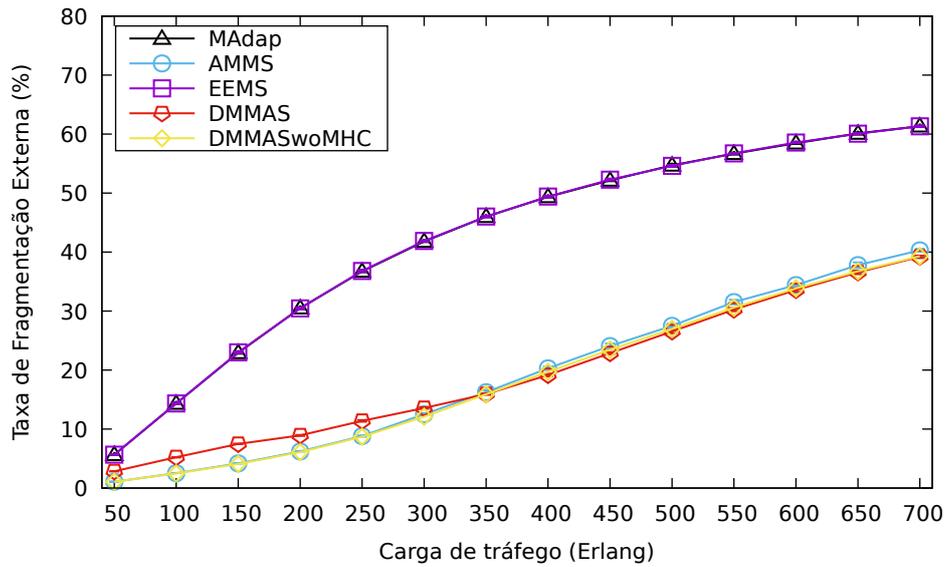


Figura 4.12: Taxa de Fragmentação Externa para topologia USANet.

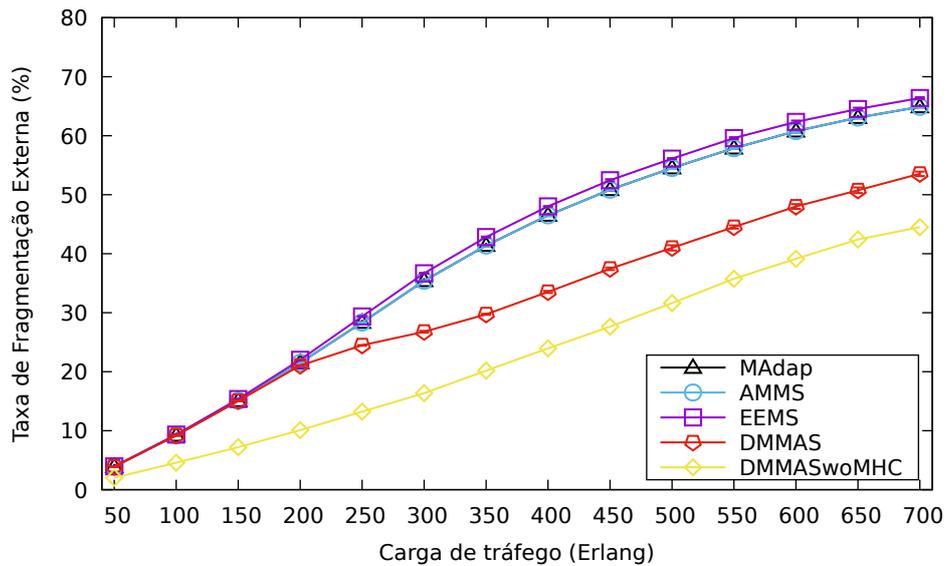


Figura 4.13: Taxa de Fragmentação Externa para topologia GERMAN.

eficientes. É importante observar que o aumento da carga não significa o aumento da quantidade de dados solicitado na simulação. As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os resultados para as topologias USANet e GERMAN, respectivamente.

Note que a relação entre o roteamento *singlehop* e roteamento *multihop* no contexto da eficiência energética ainda não foi bem explorada na literatura. O uso de mais segmentos na solução RMLSA causa o uso de mais BVTs por solicitação, o que causa um maior gasto de energia. No entanto, uma solução *multihop* leva à alocação de segmentos menores

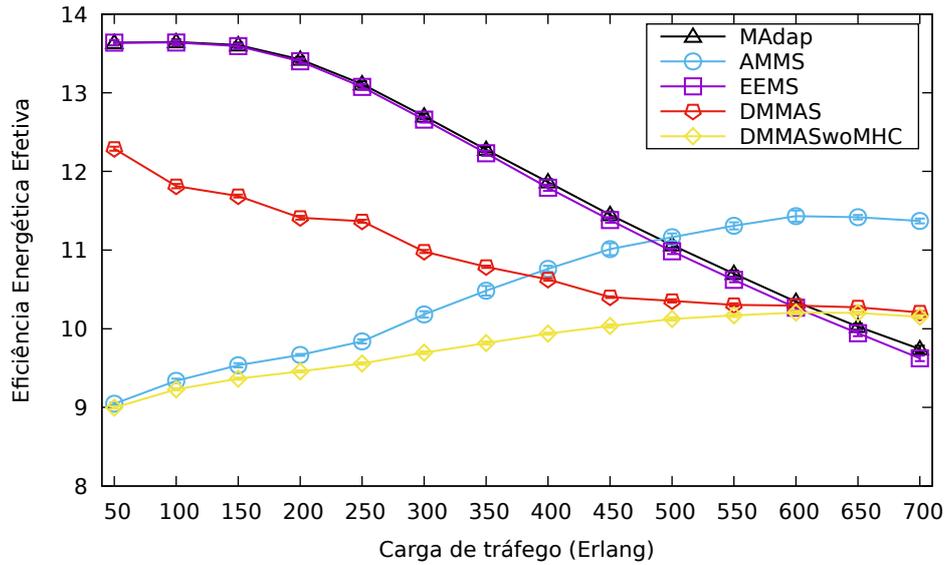


Figura 4.14: Eficiência Energética Efetiva para topologia USANet.

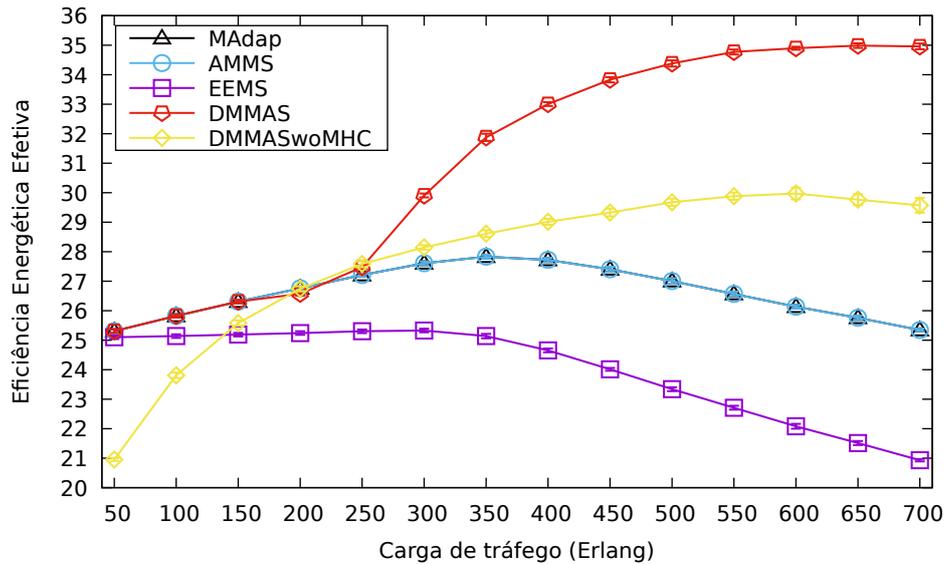


Figura 4.15: Eficiência Energética Efetiva para topologia GERMAN.

que permitem o uso de formatos de modulação mais eficientes espectralmente, utilizando menos *slots* de espectro nos caminhos ópticos. Embora o uso de níveis de modulação mais eficientes aumente naturalmente o consumo de energia nos BVTs, essa relação não é linear, como pode ser visto na Tabela 2.2. Por outro lado, o impacto do uso de menos *slots* (tamanho do canal) afeta diretamente o consumo de energia. Portanto, o *trade-off* ideal é um equilíbrio entre o número de saltos (uso de BVTs) e o formato de modulação usado na solução RMLSA.

Na topologia USANet, o esquema DMMAS fornece uma eficiência energética efetiva de até 5% entre as cargas de 50 a 350 Erlangs em relação ao esquema AMMS. Para cargas mais leves, os esquemas *mAdap* e EEMS obtiveram melhores resultados, apresentando ganhos de até 8%. Isso se deve ao fato de que esses esquemas não exploram o uso de soluções *multihop* e, portanto, usam menos BVTs na solução. Por outro lado, na topologia GERMAN, o DMMAS apresenta ganhos de até 40% em relação aos esquemas da literatura. As curtas distâncias nessa topologia favorecem o desempenho do esquema DMMAS, pois o uso de níveis de modulação mais eficientes gera menor consumo de energia. Isso mostra que o esquema DMMAS fornece ganhos em eficiência energética efetiva na rede, mesmo usando mais BVTs, uma vez que o uso de níveis de modulação mais eficientes geram economia suficiente nos recursos do espectro.

4.5 Resumo Conclusivo

Este capítulo estudou o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA). Foi proposta uma técnica para solucionar o problema RMLSA através do uso de um novo esquema de modulação adaptativa que permite a utilização de qualquer abordagem RSA para resolver o problema RMLSA.

O *DMMAS* amplia o esquema proposto em [59, 128] e adiciona atribuição de forma dinâmica para o uso do roteamento *multihop* por meio do índice de fragmentação da rede. Além disso, propõe-se um mecanismo de *Energy-Aware* que utiliza níveis de modulação mais eficientes espectralmente com o intuito de utilizar menos espectro e economizar energia.

Para demonstrar a eficiência do novo esquema de modulação adaptativa proposto, foram comparados três esquemas de modulação adaptativa da literatura: *mAdap* [66]; *AMMS* [59, 128]; e o *EMMS* [119]; em duas topologias de rede com diferentes dimensões: USANet e GERMAN.

Os resultados numéricos mostraram que o esquema proposto alcança uma redução na taxa de bloqueio de banda (BBR) de até duas ordens de grandeza em um cenário de rede sub carregado e até 86% com cargas mais altas em relação as abordagens da literatura. Além disso, o esquema proposto proporcionou um ganho na eficiência energética de até 40% em topologias com pequenas dimensões.

Pode-se concluir que as mudanças realizadas no novo esquema torna as soluções RMLSAs melhores proporcionando ganhos significativos na taxa de bloqueio e na eficiência energética da rede, contudo deve-se levar em consideração a topologia da rede no *trade-off* entre número de saltos virtuais e eficiência energética da rede.

Capítulo 5

Modelagem analítica para o problema RMLSA com eficiência energética

Como foi observado na Seção 2.4, as possibilidades oferecidas pela engenharia de tráfego em EON são inúmeras. Combinar técnicas de agregação de tráfego, elétrica ou óptica, com diferentes níveis de modulação e roteamento dinâmico é um problema desafiador. Associar essas características e encontrar uma boa solução em termos de eficiência energética é ainda mais difícil.

É importante explorar todo o potencial da flexibilidade fornecida pelas EONs ao lidar com o problema RMLSA, principalmente no que tange a questão da eficiência energética. A literatura vem estudando o problema RSA/RMLSA há algum tempo e diversos modelos analíticos baseados em programação (linear ou não linear) inteira (mista ou não) vem sendo desenvolvidos [22].

Neste Capítulo, são apresentados alguns trabalhos da literatura que desenvolveram estes modelos para os problemas RSA/RMLSA. Estes trabalhos serviram como base para a elaboração de um modelo mais completo, que leva em consideração todas as características da arquitetura SLICE e técnicas de engenharia de tráfego para EON.

De acordo com o conhecimento deste autor, este trabalho é o primeiro a propor um modelo baseado em programação linear inteira (*Integer Linear Programming* – ILP) para o problema RMLSA translúcido sobre SBVT-EON (com agregação elétrica e óptica) em um cenário dinâmico (online). Com intuito de oferecer uma compreensão mais didática deste modelo completo, este capítulo apresenta três formulações exatas baseadas em ILP para o problema RMLSA.

O primeiro modelo é aplicado para o problema RMLSA dinâmico em EONs transparentes, ou seja, sem conversão OEO da origem ao destino das requisições. O segundo,

apresenta uma modelagem para o problema RMLSA em redes translúcidas, característica pouco explorada pelas modelagens presentes na literatura. Por fim, apresenta-se o modelo completo com agregação de tráfego elétrica e óptica. Este último modelo agrega todas as características mencionadas na Seção 2.4.

Para todos os modelos apresentados, são destacadas diferentes funções de custo para resolver o problema RMLSA. Em todos os casos, pode-se alcançar diversas políticas de engenharia de tráfego para diferentes propósitos, principalmente os focados na eficiência energética. Ao fim de cada modelo, apresenta-se sua complexidade de espaço em relação ao número de variáveis e restrições. O restante deste capítulo apresenta as validações numéricas dos modelos propostos e o resumo conclusivo deste estudo.

5.1 Trabalhos Relacionados

A seguir são apresentados alguns trabalhos da literatura que desenvolveram modelos ILP e MILP para o problema RMLSA. Todos os trabalhos apresentados já foram mencionados no Capítulo 3. Entretanto, a descrição dos artigos focava na questão energética do problema RMLSA. As descrições definidas nesta seção focam nas características dos modelos ILP/MILP apresentados nos artigos da literatura. Muitos dos trabalhos apresentados a seguir serviram como base para a elaboração dos modelos analíticos apresentados neste capítulo.

Os autores em [72] foram os primeiros a apresentar de forma abrangente o problema RSA em uma rede SLICE. Os autores formularam o problema através de um ILP cujo o objetivo é minimizar o número máximo de sub-portadoras necessárias para alocação de demandas no tráfego estático. Os autores provam que o problema RSA é NP-Difícil, conforme apresentado na Seção 2.4.1, e propõem dois algoritmos heurísticos que buscam realizar a melhor utilização do espectro. Os resultados mostraram a exatidão do modelo ILP proposto bem como a quase otimalidade dos resultados dos algoritmos heurísticos.

Em [34] os autores foram os primeiros a apresentar o problema RMLSA. Os autores também provam que o problema é NP-Completo e apresentam vários algoritmos de resolução para o tráfego estático. Uma modelagem ILP para minimizar o espectro utilizado em uma matriz de tráfego é elaborada. No modelo, os autores decompõem o problema em duas partes, (i) roteamento e escolha de modulação; e (ii) alocação de espectro. A resolução de ambas as partes é feita de forma sequencial. Os experimentos de simulação são avaliados em comparação com uma rede WDM tradicional. Os resultados mostraram que as redes baseadas em OFDM têm benefícios de espectro significativos sobre redes WDM tradicionais oferecendo uma solução promissora para futuras redes de transporte de alta capacidade.

Em [66] os autores investigam o problema RMLSA dinâmico na sua completude, levando em consideração o conjunto das restrições de continuidade do espectro, de distância de transmissão e a relação entre a taxa de bits do tráfego e a largura de banda do canal. Uma modelagem baseada em programação inteira não linear (*Nonlinear Integer Programming* – NIP) é apresentada definindo todos os aspectos do problema RMLSA dinâmico. Para validar o modelo, os autores introduzem abordagens heurísticas combinadas com um esquema de modulação adaptativa que decompõe o problema em etapas. Os resultados mostraram que algoritmos heurísticos apresentados alcançam quase os mesmos desempenhos que a abordagem ILP proposta com a vantagem de exigir um tempo de processamento muito menor.

Os autores em [45] são os primeiros a investigar abordagens RSA com agregação óptica. Os autores demonstram os benefícios proporcionados pela distribuição do tráfego diretamente na camada óptica através de uma modelagem ILP e dois algoritmos heurísticos propostos. Na modelagem ILP apresentada, os autores demonstram a complexidade de tempo e espaço do problema RSA com agregação óptica. Os resultados demonstraram que uma economia significativa de transmissor e espectro pode ser alcançada por meio da agregação óptica em comparação com um cenário sem agregação de tráfego. Além disso, os autores identificam que a compensação entre os objetivos de minimizar o uso do transmissor e minimizar o uso do espectro deve ser cuidadosamente considerada durante o projeto da rede.

Em [28] os autores apresentam uma abordagem RSA para minimizar o consumo total de energia da rede. A abordagem proposta é comparada com o paradigma de redes MLR para o cenário de tráfego estático. Os autores propõem dois modelos de programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Programming* – MILP) para cada tipo de rede (MLR e EON) com o objetivo de modelar a eficiência energética em dois cenários de tráfego. Os resultados demonstraram que a EON é superior em termos de eficiência energética, especialmente quando o tráfego na rede leva picos aleatórios em alguns dos enlaces.

Os autores em [132] propõem uma nova estrutura de transmissão paralela projetada para EON com suporte a serviços Ethernet de alta velocidade. Os autores formulam um modelo de otimização ILP que leva em consideração várias restrições do problema RSA dinâmico, incluindo fragmentação de espectro, atraso diferencial e restrições de banda de guarda. Os autores também propõem um algoritmo heurístico que pode ser aplicado quando o modelo de otimização for intratável. Os resultados numéricos mostraram a eficácia e adequação das EONs com requisitos de alta largura de banda.

Em [110] os autores investigam a eficiência energética das EONs no cenário de modulação adaptativa. Os autores desenvolvem um modelo ILP para minimizar o consumo

total de energia da rede através de dois esquemas de otimização baseadas na minimização de potência e uso do espectro. Os resultados mostram uma economia de até 31% do consumo total de energia da rede em comparação com as redes WDM tradicionais. Posteriormente em [111], os mesmos autores ampliam a exibição dos seus resultados e avaliam o consumo das redes em um cenário de tráfego assimétrico, em que o tráfego é maior em determinados nós da topologia. Nestes casos, o consumo energético das EONs aproxima-se bastante das rede WDM tradicionais.

Os autores em [35] propõem o primeiro estudo sobre eficiência energética EON utilizando técnicas de agregação de tráfego elétrico e óptico. Os autores formulam uma modelagem ILP baseada nas técnicas de agregação com o objetivo de minimizar o gasto energético. Além disso, os autores desenvolvem duas heurísticas para alocação de espectro baseadas no gasto espectral e no gasto energético. Os resultados de simulação mostram a eficiência das heurísticas propostas em termos da proximidade com os resultados da modelagem ILP.

Em [120] os autores avaliam a eficiência energética para três tipos de transmissores EON. Os autores desenvolvem modelos ILP para cada tipo de transmissor para a resolução do problema RSA estático. Os resultados mostram que é possível obter uma economia significativa de energia no uso de transmissores baseados na tecnologia de SBVT. Os autores destacam que há um compromisso entre o uso das técnicas de agregação elétrica e óptica para reduzir o consumo de energia na rede. Posteriormente em [47], os mesmos autores, ampliam o estudo e propõem uma heurística para avaliar os modelos desenvolvidos em cenários maiores e em taxas de tráfego diferentes.

Os autores em [109] estudam o problema de proteção com eficiência energética para tráfego assimétrico em EON. Os autores baseiam-se na proteção por meio da utilização de *p-Cycles* direcionados pré-configurados na rede. Um modelo MILP é proposto para minimizar o consumo total de energia da rede. Para oferecer escalabilidade ao modelo MILP os autores propõem um algoritmo de seleção dos *p-Cycles* e um modelo ILP mais simplificado. Os resultados mostraram que os *p-Cycles* direcionados alcançam uma economia significativa de energia para proteção de tráfego assimétrica em comparação com *p-Cycles* não direcionados.

Os autores em [133] também se baseiam em esquemas de proteção com o uso de *p-Cycles* em redes EON. Uma modelagem ILP é proposta, dividindo o problema em duas partes, a alocação de caminhos ópticos primários e de *backups*. Os autores propõem uma técnica de sobreposição do espectro em caminhos ópticos de *backup* associadas a agregação de tráfego óptica. São formuladas heurísticas para comparação com o modelo e os resultados mostram um desempenho similar entre as heurísticas e o modelo ILP proposto.

Em [21], os autores abordam o problema de alocação de espectro para a sobrevivência em redes definidas por software. Os autores propõem um modelo ILP para minimizar o uso de transmissores e da utilização do espectro para o cenário de tráfego estático. Os autores ainda elaboram um algoritmo heurístico para a criação de caminhos de *backup* compartilhado através de técnicas de agregação de tráfego. Os resultados mostram que o esquema proposto obtém desempenhos melhores na proteção em relação aos esquemas da literatura além de proporcionar uma economia de energia significativa.

Os autores em [116] investigam o problema RMLSA com eficiência energética e o impacto da capacidade dos transmissores na agregação de tráfego. Os autores dividem o problema RMLSA em duas etapas. Na primeira etapa, a abordagem foca no roteamento e na agregação de tráfego. Para isso, uma modelagem ILP é proposta para a minimização do número de amplificadores ópticos e uso de transmissores. A segunda etapa foca na alocação de espectro e escolha da modulação. Nesta etapa, uma modelagem MILP é proposta para otimizar os parâmetros do transmissor e minimizar o consumo total de energia da rede. Ao contrário das formulações convencionais, o trabalho foca na potência óptica do transmissor no caminho óptico. Os resultados de simulação mostraram que a solução proposta reduz o consumo de energia da rede em mais de 9% em comparação com o cenário sem agregação de tráfego. Os autores também analisam o compromisso entre as despesas de capital (*Capital Expenditure* – CAPEX) e as despesas operacionais (*Operational Expenditure* – OPEX) em termos do cenário EON utilizado.

Por fim, os autores em [44] propõem um esquema para a criação de redes ópticas virtuais com eficiência energética para SBVT-EONs. Neste esquema, dois métodos de economia de energia são propostos com foco nos transmissores e nós. Os autores elaboram uma modelagem ILP que tem como objetivo reduzir gasto energético da rede e compara seus resultados com as heurísticas propostas. Os resultados de simulação demonstraram que os esquemas baseados em transmissores atingem uma maior eficiência energética para cargas de tráfego alta enquanto os esquemas baseados em nós apresentam melhores resultados em cargas baixas.

A Tabela 5.1 apresenta uma classificação dos artigos da literatura mencionados que desenvolveram modelos ILP/MILP para EONs. Foram destacadas quatro características que a modelagem proposta pelos artigos abordam: *(i)* se o problema é RSA ou RMLSA; *(ii)* se o cenário de rede é transparente ou translúcido; *(iii)* se o cenário de tráfego investigado é estático ou dinâmico; e *(iv)* se utiliza alguma técnica de agregação de tráfego.

Com exceção do artigo proposto pelo autor desta Tese [134], pode-se observar que não foram encontrados modelos de ILP na literatura EON para o problema RMLSA no cenário de tráfego dinâmico que utiliza técnicas de agregação elétrica e óptica para redes translúcidas. Neste sentido, este capítulo propõe uma modelagem ILP inovadora que leva

Tabela 5.1: Propostas da literatura EON que desenvolveram modelos analíticos.

Trabalho	Problema	Cenário de Rede	Cenário de Tráfego	Técnica de Agregação
Y. Wang [72]	RSA	Transparente	Estático	-
G. Zhang [45]	RSA	Transparente	Estático	Óptica
X. Chen [132]	RSA	Transparente	Dinâmico	-
Helder M. N. S. [133]	RSA	Transparente	Dinâmico	Óptica
Y. YingWu [35]	RSA	Transparente	Dinâmico	Elétrica/ Óptica
M. Zhu [44]	RSA	Transparente	Estático/ Dinâmico	Óptica
A. Nag [28]	RSA	Translúcido	Estático	-
J. Zhang [120]	RSA	Translúcido	Estático	Elétrica/ Óptica
J. Zhang [47]	RSA	Translúcido	Estático	Elétrica/ Óptica
J. Wu [21]	RSA	Translúcido	Estático	Óptica
K. Christodoulopoulos [34]	RMLSA	Transparente	Estático	-
X. Dong [110]	RMLSA	Transparente	Estático	-
Taisir E. H. [111]	RMLSA	Transparente	Estático	-
M. Ju [109]	RMLSA	Transparente	Estático	-
X. Wan [66]	RMLSA	Transparente	Dinâmico	-
M. Hadi [116]	RMLSA	Transparente	Dinâmico	Elétrica
Nossa Proposta [134]	RMLSA	Translúcido	Dinâmico	Elétrica/ Óptica

em consideração todas as características da arquitetura SLICE e técnicas de engenharia de tráfego EON.

5.2 Modelos analíticos para o problema RMLSA

Tendo em vista a lacuna da literatura frente aos modelos ILPs propostos no estado da arte, esta seção apresenta uma formulação ILP para o problema RMLSA translúcido sobre SBVT-EON (com agregação elétrica e óptica) em um cenário de tráfego dinâmico. Para melhor compreensão do desenvolvimento do modelo proposto, esta seção apresenta três modelos ILPs para o problema RMLSA, sendo dois modelos preliminares antes do modelo final. Dessa forma, pode-se apresentar melhor o modelo, notando as diferenças da complexidade e descrevendo o modelo final de forma evolutiva.

O primeiro modelo ILP resolve o problema RMLSA dinâmico em EONs transparentes. O segundo modelo é aplicado para o problema RMLSA dinâmico para EONs translúcidas.

Por fim, o modelo final contempla todas características anteriores e possibilita a agregação elétrica e óptica do tráfego.

Para cada modelo, apresentam-se inicialmente os parâmetros, suas variáveis e as funções de custo do problema. Estas últimas, podem ser utilizadas para alcançar diferentes políticas de engenharia de tráfego de acordo com os requisitos da rede e do operador, por exemplo, requisitos que compõem a eficiência energética. Em seguida, são apresentadas a função objetivo e as restrições do modelo ILP. Ao final de cada modelo, apresenta-se uma análise de complexidade de tempo e espaço do ILP.

Em todos os modelos, a topologia da rede é definida como $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de nós e E é o conjunto de enlaces direcionais. No cenário de tráfego dinâmico, as solicitações de conexão chegam uma de cada vez, são retidas por um determinado período e depois partem. Cada solicitação de conexão é representada por $r_i(s, d, bw)$, onde s é o nó de origem, d o nó de destino da solicitação de conexão e bw é a largura de banda da solicitação de conexão. Dessa forma, o modelo é executado para cada r_i para resolver o problema RMLSA. Caso o modelo não encontre uma solução, r_i é bloqueado.

5.2.1 Constantes dos Modelos

Constantes são valores que representam o cenário EON considerado, independentemente de seu estado atual da rede. As constantes apresentadas são utilizadas nos três modelos ILP apresentados.

D_{ij} : Comprimento do enlace ij , onde $ij \in E$.

β : Total de slots por fibra.

M : Índice do nível de modulação mais alto (mais eficiente) disponível ($M \in \mathbb{N}$).

ω_m : Alcance máximo transparente do nível de modulação m ($0 \leq m \leq M$).

δ_m^{bw} : Número de *slots* para suportar a taxa de bw , com o nível de modulação m ($0 \leq m \leq M$).

GB : Número de *slots* usados na banda de guarda.

U : Capacidade máxima de transmissão dos transponders em *slots*.

λ : Um número grande, auxilia o modelo em algumas restrições ($\lambda = \beta^3$). É utilizado, por exemplo, no balanceamento das funções de custo compostas de variáveis binárias.

5.2.2 Modelagem ILP do Problema RMLSA para EONs transparentes

Nesta Seção, apresenta-se o problema RMLSA dinâmico em EONs transparentes. O modelo leva em consideração o problema de continuidade de espectro, contiguidade de espectro, alcance máximo de modulação, número de transmissores e receptores de cada nó e capacidade máxima do transmissor [66, 19].

Parâmetros

Esses parâmetros são as entradas do problema. Eles representam o estado atual da rede no momento da chegada de r_i .

K_{ij} : Número de blocos com slots livres contíguos no enlace $ij \in E$.

a_{ij}^k : Índice do primeiro *slot* livre no k -ésimo bloco do enlace $ij \in E$.

b_{ij}^k : Índice do último *slot* livre no k -ésimo bloco do enlace $ij \in E$.

T_v : Número de transmissores (Tx) disponíveis no BV-OXC $v \in V$.

R_v : Número de receptores (Rx) disponíveis no BV-OXC $v \in V$.

Variáveis

As variáveis representam a solução do problema, mostrando como deve ser resolvido o RMLSA.

fa : Inteira, representa o primeiro índice de *slot* do caminho óptico transparente alocado.

fb : Inteira, representa o último índice de *slot* do caminho óptico transparente alocado.

m^k : Binária, representa o nível de modulação utilizada no caminho óptico transparente alocado. É igual a 1 se o caminho óptico alocado utilizar o formato de modulação k ($0 \leq k \leq M$).

e_{ij} : Binária, representa o uso do enlace $ij \in E$ no caminho óptico alocado. É igual a 1 se o caminho óptico utilizar o enlace ij .

π_{ij}^k : Binária, representa o segmento do espectro utilizado na solução. É igual a 1 se a solução for roteada pelo enlace $ij \in E$. O espectro do canal é alocado dentro do k -ésimo segmento disponível $\pi_{ij}^k = \{a_{ij}^k, b_{ij}^k\}$ do enlace ij .

Uma representação gráfica da variável $\pi_{ij}^k = \{a_{ij}^k, b_{ij}^k\}$ pode ser vista na Figura 5.1 composta por quatro caminhos ópticos na fibra. Pode-se observar que a variável representa o estado atual da rede no momento da requisição. Se, $\pi_{0_1}^0 = 1$ significa que o caminho óptico alocado utilizará este espaço de espectro disponível (bloco) na composição do seu canal. Isto também significa que o primeiro e último *slot* do caminho óptico estará dentro do intervalo $\{a_{0_1}^0, b_{0_1}^0\}$ que neste caso, representa os *slots* 0 e 4. Deve-se observar que a banda de guarda, representada na Figura 5.1 como “G”, é considerada um *slot* livre, o que é fato.

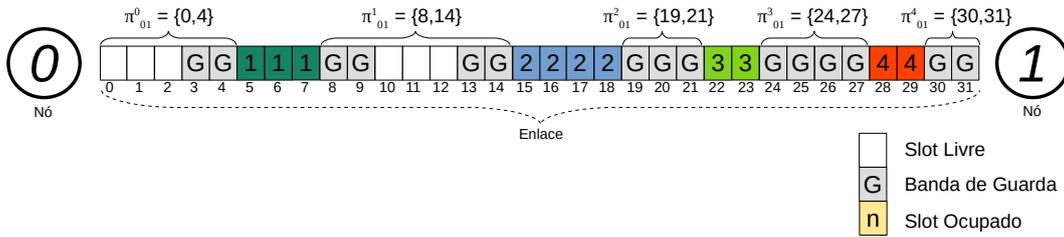


Figura 5.1: Representação gráfica da variável $\pi_{ij}^k = \{a_{ij}^k, b_{ij}^k\}$ para um enlace.

A. Funções de Custo

Várias funções de custo são apresentadas para o problema RMLSA. Com o ajuste correto pode-se elaborar diferentes políticas de engenharia de tráfego para alcançar diferentes propósitos.

1) Número de slots utilizados

$$C_1 = fb - fa \quad (5.1)$$

Esta função de custo (Eq. 5.1) refere-se ao número de *slots* utilizados no caminho óptico translúcido alocado. O mais adequado é usar o menor número possível de *slots* para que não haja superdimensionamento na largura de banda do caminho óptico e a utilização do espectro seja minimizada.

2) Nível de modulação mais eficiente

$$C_2 = \sum_{k=0}^M (m^k \cdot \omega_k) \quad (5.2)$$

Esta função de custo (Eq. 5.2) refere-se ao nível de modulação utilizado no caminho óptico da solução. De acordo com [126], usar modulações mais eficientes economiza recursos espectrais. Dessa forma, modulações mais robustas precisam de mais *slots* para atender as demandas (valor de ω_k maior), enquanto modulações mais eficientes possuem um alcance óptico transparente menor (valor de ω_k menor).

3) *Número de enlaces utilizados*

$$C_3 = \sum_{ij \in E} (e_{ij} \cdot \lambda) \quad (5.3)$$

Esta função de custo (Eq. 5.3) lista o número de enlaces utilizados na solução e pode ser considerada como o número de saltos físicos. Multiplica-se o número de enlaces utilizados por um valor grande para ponderação dos custos.

4) *Tamanho da rota*

$$C_4 = \sum_{ij \in E} (e_{ij} \cdot D_{ij}) \quad (5.4)$$

Esta função de custo (Eq. 5.4) refere-se ao tamanho da rota do caminho óptico que será alocado, ou seja, soma-se o tamanho de cada enlace ij (D_{ij}) utilizado na solução que atenderá r_n . Em geral, o caminho mais adequado é o menor.

Considerações sobre as funções de custo

Algumas funções de custo estão relacionadas entre si, por exemplo, Eq. 5.3 com Eq. 5.4. O ajuste fino das funções de custo de acordo com os objetivos da rede traz benefícios de desempenho. Opta-se por usar λ ao multiplicar variáveis binárias em comparação com outros custos não binários. Porém, pode ser ponderado de outra forma, segundo o operador.

B. Função Objetivo

Diferentes objetivos podem ser alcançados usando uma combinação das funções de custo apresentadas. Neste modelo, aplica-se todas as funções de custo descritas, pois elas estão diretamente relacionadas à eficiência energética e ao desempenho da rede, conforme definido na Equação 2.11.

No tráfego dinâmico, no qual não há controle sobre quanto tempo os caminhos ópticos permanecerão na rede, o plano de controle apenas coordena o estabelecimento do caminho óptico. Portanto, apenas o consumo de energia (PC da Eq. 2.11) deve ser observado. Estabelecer caminhos ópticos com o menor PC possível é o desejável para fornecer eficiência energética.

Para PC_{BVT} (Eq. 2.6), a relação entre o número de *slots* e a modulação do caminho óptico deve ser observada. Considerando que a relação entre a capacidade da subportadora e seu consumo de energia não é linear (Tabela 2.2), escolhe-se o menor número de *slots* (**Função de custo C_1**). Para isso, deve-se usar o nível de modulação mais eficiente (**Função de custo C_2**).

Para PC_{OXC} (Eq. 2.8), a quantidade de OXCs utilizados no caminho óptico deve ser observado. Isso significa reduzir o número de saltos físicos na solução (**Função de custo C_3**).

Por fim, para PC_{OLA} (Eq. 2.10), a distância percorrida pelo caminho óptico (**Função de custo C_5**) é levada em consideração, uma vez que um OLA é usado a cada 80 km.

Assim, o objetivo deste modelo é apresentado na Eq. 5.5, em que i representa o índice da função de custo.

$$\text{Minimize } \sum_i^4 C_i \quad (5.5)$$

C. Restrições

As restrições são condições para resolução do problema de otimização que o modelo deve satisfazer. Todas as condições devem ser válidas para que o problema RMLSA seja resolvido.

1) Restrições de Rota

$$\sum_{i \in V} e_{ij} - \sum_{i \in V} e_{ji} = \begin{cases} -1 & | j = s \\ 1 & | j = d \\ 0 & | j \neq s \wedge j \neq d \end{cases} \quad (5.6)$$

$, \forall j \in V$

$$\sum_{j \in V} e_{ij} \leq 1, \forall i \in V \quad (5.7)$$

As restrições da Equação 5.6 são relativas à conservação de fluxo da topologia física da rede. Já as restrições da Equação 5.7 garantem que a demanda de tráfego seja roteada em um único caminho sem laços.

2) Restrições de Contiguidade e Continuidade do Espectro

$$\sum_{k=1}^{K_{ij}} \pi_{ij}^k = e_{ij}, \forall ij \in E \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned}
fb &\leq b_{ij}^k + GB \mid \forall e_{ij} = 1 \wedge \pi_{ij}^k = 1 \\
a_{ij}^k &\leq fa^{xy} + GB \mid \forall e_{ij} = 1 \wedge \pi_{ij}^k = 1 \\
&, \forall ij \in E, \forall k
\end{aligned} \tag{5.9}$$

As restrições da Equação 5.8 garantem que apenas um segmento de espectro disponível seja selecionado em cada enlace ao longo da rota. Já as restrições da Equação 5.9 garantem a escolha do primeiro (fa) e último (fb) *slot* do caminho óptico que irá atender a requisição atual. Deve-se observar que as variáveis ficam dentro do intervalo de *slots* escolhido no bloco livre ($\pi_{ij}^k = 1$) e enlace ($e_{ij} = 1$). As bandas de guarda são garantidas por meio da constante GB .

3) Restrições de Formato de Modulação

$$\sum_{k=0}^M m^k = 1 \tag{5.10}$$

$$\sum_{ij \in E} (e_{ij} \cdot D_{ij}) \leq \sum_{k=0}^M (m^k \cdot \omega_k) \tag{5.11}$$

$$fb - fa + 1 \geq \sum_{k=0}^M (m^k \cdot \delta_k^{bw}) \tag{5.12}$$

A restrição da Equação 5.10 garante que seja escolhido apenas um formato de modulação para o caminho óptico que irá atender a demanda. A restrição da Equação 5.11 garante que o tamanho da rota escolhida para o caminho óptico atenda os requisitos de QoT, referentes aos limiares de distância mencionados na Seção 2.3 (Tabela 2.1), do formato de modulação escolhido. Por fim, a restrição da Equação 5.12 garante que o tamanho do circuito alocado seja suficiente à taxa bw em Gb/s requisitada. Calcula-se o número de *slots* do circuito do lado esquerdo da equação, enquanto o lado direito calcula quantos *slots* são necessários para atender a demanda no formato de modulação escolhido.

4) Restrições de Transponders

$$T_s = 1 \tag{5.13}$$

$$R_d = 1 \tag{5.14}$$

$$U \geq f_b - f_a + 1 \tag{5.15}$$

As restrições da Equação 5.13 e Equação 5.14 garantem que existam pelo menos um transmissor (Tx) e um receptor (Rx) disponíveis no nó de origem (s) e no nó de destino (d) da requisição, respectivamente. Finalmente, a restrição da Equação 5.15 estabelece

que o tamanho do caminho óptico que será alocado não será maior que a capacidade do transmissor em termos de número de *slots*.

D. Complexidade

O número de variáveis e restrições utilizadas pelo ILP proposto irá depender do cenário e da topologia em que será empregado o modelo. Dentre as questões envolvidas têm-se o número de nós ($|V|$) e enlaces ($|E|$) da topologia, o número de níveis de modulação disponíveis ($|M|$) na rede e número de *slots* por fibra (β). A Tabela 5.2 mostra o número de variáveis e restrições para cada equação de restrição no pior caso (onde todas as variáveis inteiras e binárias são consideradas).

Tabela 5.2: Número de variáveis e restrições do ILP para redes transparentes (pior caso).

Restrição	Nº Variáveis	Nº Restrições
Eq. 5.6	$ E $	$ V $
Eq. 5.7	$ E $	$ V $
Eq. 5.8	$ E * \beta + E $	$ E $
Eq. 5.9	$2(2 * E * \beta + E + 1)$	$ E * \beta$
Eq. 5.10	M	1
Eq. 5.11	$ E + M$	1
Eq. 5.12	$2 + M$	1
Eq. 5.13	1	1
Eq. 5.14	1	1
Eq. 5.15	2	1

5.2.3 Modelagem ILP do Problema RMLSA para EONs translúcidas

Nesta seção, apresenta-se o problema RMLSA dinâmico em EONs translúcidas. Na Tabela 5.1, nota-se que são poucos os trabalhos da literatura que formulam um ILP para o problema RMLSA translúcido. Dos trabalhos que tratam do problema, todos são para o cenário de tráfego estático e para o problema RSA. Nesta Seção, apresenta-se uma nova formulação ILP para o problema RMLSA translúcido dinâmico. Semelhante ao modelo anterior, este modelo também leva em consideração o problema de continuidade de espectro, contiguidade de espectro, alcance máximo de modulação, número de transmissores e receptores de cada nó e capacidade máxima do transmissor [66, 19].

Parâmetros

Os parâmetros de entrada do problema permanecem os mesmos parâmetros do modelo apresentado na Seção 5.2.2. Eles representam o estado atual da rede no momento da chegada de r_i .

Variáveis

As variáveis representam a solução do problema. Como o problema aqui é mais complexo que o anterior, houve mudanças significativas na quantidade de variáveis do problema. No problema RMLSA para redes translúcidas tem-se que ter controle sobre a quantidade de caminhos ópticos que a solução irá ter. Tendo em vista que, uma r_i pode ser atendida por um ou mais caminhos ópticos na rede.

Neste sentido, adicionamos os índices “ $x \in V$ ” e “ $y \in V$ ” para quase todas as variáveis do problema anterior. Elas irão representar o nó de origem e destino de cada caminho óptico. Em outras palavras, representará a topologia virtual da solução na rede. Segue a relação das variáveis do novo modelo:

L_{xy} : Binária, representa o uso de um novo caminho óptico para atender r_i . É igual a 1 se a solução que atenderá r_i utilizar um caminho óptico que conecta o par de nós $x, y \in V | x \neq y$. Caso contrário, é 0.

fa^{xy} : Inteira, representa o primeiro índice de *slot* do caminho óptico L_{xy} , onde $x, y \in V | x \neq y$.

fb^{xy} : Inteira, representa o último índice de *slot* do caminho óptico L_{xy} , onde $x, y \in V | x \neq y$.

m_{xy}^k : Binária, representa o nível de modulação utilizada no caminho óptico L_{xy} , onde $x, y \in V | x \neq y$. É igual a 1 se o caminho óptico L_{xy} utilizar o formato de modulação k ($0 \leq k \leq M$).

e_{ij}^{xy} : Binária, representa o uso do enlace $ij \in E$ no caminho óptico L_{xy} , onde $x, y \in V | x \neq y$. É igual a 1 se o caminho óptico L_{xy} utilizar o enlace ij .

π_{ij}^k : Mesma representação do modelo na Seção 5.2.2

A. Funções de Custo

Dentre as funções de custo apresentadas no problema anterior, adiciona-se mais uma no problema RMLSA translúcido: o número de caminhos ópticos da solução. Esta nova função tem impacto direto no uso dos recursos da rede, tais como uso de transmissores e receptores. Além disso, essa questão traz efeitos significativos na qualidade de serviço (*Quality of Service* – QoS) da rede, uma vez que, um fluxo de tráfego com muitas conversões OEO sofre latência na comunicação. As demais funções de custo são modificadas apenas pelo fato que as variáveis foram modificadas.

1) Número de caminhos ópticos da solução

$$C_1 = \sum_{x,y \in V} (L_{xy} \cdot \lambda) \quad (5.16)$$

Esta função de custo (Eq. 5.16) se refere ao número de caminhos ópticos utilizados para atender a demanda r_i . Espera-se que seja usado o menor número de caminhos ópticos. Além disso, menos caminhos ópticos representam menos transponders utilizados (transmissores/receptores) na rede.

2) Número de slots utilizados

$$C_2 = \sum_{x,y \in V} (fb^{xy} - fa^{xy}) \quad (5.17)$$

Semelhante a função de custo Eq. 5.1, esta função de custo (Eq. 5.17) refere-se ao número de *slots* utilizados na solução, considerando todos seus caminhos ópticos.

3) Nível de modulação mais eficiente

$$C_3 = \sum_{x,y \in V} \sum_{k=0}^M (m_{xy}^k \cdot \omega_k) \quad (5.18)$$

Semelhante a função de custo Eq. 5.2, esta função de custo (Eq. 5.2) refere-se ao nível de modulação utilizado na solução em todos os seus caminhos ópticos.

4) Número de enlaces utilizados

$$C_4 = \sum_{x,y \in V} \sum_{ij \in E} (e_{ij}^{xy} \cdot \lambda) \quad (5.19)$$

Semelhante a função de custo Eq. 5.3, esta função de custo (Eq. 5.19) lista o número de enlaces utilizados na solução para todos os caminhos ópticos e pode ser considerada como o número de saltos físicos.

5) Tamanho da rota

$$C_5 = \sum_{x,y \in V} \sum_{ij \in E} (e_{ij}^{xy} \cdot D_{ij}) \quad (5.20)$$

Semelhante a função de custo Eq. 5.4, esta função de custo (Eq. 5.20) refere-se ao tamanho da rota da solução, ou seja, soma-se o tamanho de cada enlace ij (D_{ij}) para cada caminho óptico L_{xy} utilizado para atender r_n .

B. Função Objetivo

As mesmas considerações mencionadas na Seção 5.2.2 aplicam-se aqui, levando em consideração que o plano de controle coordena apenas o estabelecimento dos caminhos ópticos no cenário de tráfego dinâmico. Tendo em vista a Equação 2.13 que mostra que o gasto energético total da rede está relacionado a quantidade de caminhos ópticos estabelecidos, estabelecer menos caminhos ópticos por solução é o desejável para fornecer eficiência energética. Portanto, a função de custo Eq. 5.16 é acrescentada na função objetivo deste novo modelo.

Assim, o objetivo deste modelo é apresentado na Eq. 5.21.

$$\text{Minimize } \sum_i^5 C_i \quad (5.21)$$

C. Restrições

As restrições são condições para resolução do problema de otimização que o modelo deve satisfazer. Novamente, tendo em vista que este modelo é ainda mais complexo que anterior, novas restrições são necessárias para satisfazer a representação do problema. Por exemplo, as restrições de rota, que antes tratava apenas a um caminho óptico, agora trata a solução como um todo, portanto, divide-se as restrições entre a rota da topologia física e virtual. Uma outra questão é a relação entre qual enlace pertence a qual caminho óptico da solução. Além disso, tendo em vista as mudanças nas variáveis, todas as restrições do problema anterior foram modificadas.

1) Restrições da Topologia Virtual

$$\sum_{x \in V} L_{xy} - \sum_{x \in V} L_{yx} = \begin{cases} -1 & | y = s \\ 1 & | y = d \\ 0 & | y \neq s \wedge y \neq d \end{cases}, \forall y \in V \quad (5.22)$$

$$\sum_{y \in E} L_{xy} \leq 1, \forall x \in V \quad (5.23)$$

As restrições da Equação 5.22 são relativas a conservação de fluxo da topologia virtual da rede. Já as restrições da Equação 5.23 garantem que a demanda de tráfego seja roteada em um único caminho, sem laços na topologia virtual.

2) Restrições da Topologia Física

$$\sum_{i \in V} e_{ij}^{xy} - \sum_{i \in V} e_{ji}^{xy} = \begin{cases} -L_{xy} & | j = x \\ L_{xy} & | j = y \\ 0 & | j \neq x \wedge j \neq y \end{cases}$$

$$, \forall j \in V, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.24)$$

$$\sum_{x, y \in V} \sum_{j \in V} e_{ij}^{xy} \leq 1, \forall i \in V \quad (5.25)$$

$$\sum_{x, y \in V} \sum_{i \in V} e_{ij}^{xy} \leq 1, \forall j \in V \quad (5.26)$$

As restrições da Equação 5.24 são relativas a conservação de fluxo da topologia física da rede. Já as restrições das Equações 5.25 e 5.26 garantem que a demanda de tráfego seja roteada em um único caminho sem laços na topologia física.

3) Restrições que relacionam caminhos ópticos e seus enlaces

$$\sum_{x, y \in V} \sum_{ij \in E} e_{ij}^{xy} \geq \sum_{x, y \in V} L_{xy} \quad (5.27)$$

$$\sum_{j \in V} e_{xj}^{xy} \geq L_{xy}, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.28)$$

$$\sum_{i \in V} e_{iy}^{xy} \geq L_{xy}, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.29)$$

Essas restrições listam os enlaces que pertencem aos seus respectivos caminhos ópticos. As restrições da Equação 5.27 garantem que o número de enlaces na rota seja sempre maior ou igual ao número de caminhos ópticos. As restrições da Equação 5.28 e 5.29 garantem que a origem e o destino dos respectivos enlaces sejam iguais aos dos seus caminhos ópticos.

4) Restrições de Contiguidade e Continuidade do Espectro

$$\sum_{k=1}^{K_{ij}} \pi_{ij}^k = \sum_{x, y \in V} e_{ij}^{xy}, \forall ij \in E \quad (5.30)$$

$$fb^{xy} \leq b_{ij}^k + GB \mid \forall e_{ij}^{xy} = 1 \wedge \pi_{ij}^k = 1$$

$$a_{ij}^k \leq fa^{xy} + GB \mid \forall e_{ij}^{xy} = 1 \wedge \pi_{ij}^k = 1$$

$$, \forall ij \in E, \forall k, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.31)$$

As restrições da Equação 5.30 garantem que apenas um segmento de espectro disponível seja selecionado em cada enlace ao longo de toda a rota da solução. Já as restrições da Equação 5.31 garantem a escolha do primeiro (fa^{xy}) e último (fb^{xy}) *slot* de cada caminho óptico L_{xy} que irá atender a requisição atual. Deve-se observar que as variáveis ficam dentro do intervalo de *slots* escolhido no bloco livre ($\pi_{ij}^k = 1$) de cada enlace ($e_{ij}^{xy} = 1$) pertencente ao seu caminho óptico L_{xy} . As bandas de guarda são garantidas por meio da constante GB .

5) Restrições de Formato de Modulação

$$\sum_{k=0}^M m_{xy}^k = L_{xy}, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.32)$$

$$\sum_{ij \in E} (e_{ij}^{xy} \cdot D_{ij}) \leq \sum_{k=0}^M (m_{xy}^k \cdot \omega_k), \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.33)$$

$$fb^{xy} - fa^{xy} + 1 \geq \sum_{k=0}^M (m_{xy}^k \cdot \delta_k^{bw}), \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.34)$$

A restrição da Equação 5.32 garante que seja escolhido apenas um formato de modulação para seu respectivo caminho óptico. A restrição da Equação 5.33 garante que o tamanho da rota escolhida para seu respectivo caminho óptico atenda os requisitos de QoS relativos à distância (Tabela 2.1). Por fim, a restrição da Equação 5.34 garante que o tamanho dos circuitos ópticos pertencentes a solução sejam suficientes à taxa bw em Gb/s requisitada. Calcula-se o número de *slots* do circuito do lado esquerdo da equação, enquanto o lado direito calcula quantos *slots* são necessários para atender a demanda no formato de modulação escolhido para cada L_{xy} .

6) Restrições de Transponders

$$\sum_y L_{xy} \leq T_x, \forall x \in V \quad (5.35)$$

$$\sum_x L_{xy} \leq R_y, \forall y \in V \quad (5.36)$$

$$U \geq fb^{xy} - fa^{xy} + 1, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.37)$$

As restrições da Equação 5.35 e Equação 5.36 garantem que existam pelo menos um transmissor (T_x) e um receptor (R_x) disponíveis no nó de origem (x) e no nó de destino (y) de todos os caminhos ópticos L_{xy} alocados para atender a requisição. Finalmente, a

restrição da Equação 5.37 estabelece que o tamanho de cada caminho óptico L_{xy} alocado não será maior que a capacidade do transponder em termos de número de *slots*.

D. Complexidade

Novamente, o número de variáveis e restrições utilizadas pelo ILP proposto irá depender do cenário e da topologia em que será empregado o modelo, tamanhos de $|V|$, $|E|$, número de modulação disponíveis ($|M|$) e número de *slots* por fibra (β). A Tabela 5.3 mostra o número de variáveis e restrições para cada equação de restrição no pior caso (onde todas as variáveis inteiras e binárias são consideradas).

Tabela 5.3: Número de variáveis e restrições do ILP para redes translúcidas (pior caso).

Restrição	Nº Variáveis	Nº Restrições
Eq. 5.22	$ V ^2$	$ V $
Eq. 5.23	$ V ^2$	$ V $
Eq. 5.24	$ V ^2 * E + V ^2$	$ V ^3$
Eq. 5.25	$ V ^2 * E $	$ V $
Eq. 5.26	$ V ^2 * E $	$ V $
Eq. 5.27	$ V ^2 * E + V ^2$	1
Eq. 5.28	$ V ^2 * E + V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.29	$ V ^2 * E + V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.30	$ E * \beta + V ^2 * E $	$ E $
Eq. 5.31	$2(V ^2 + 2 * \beta * E + V ^2 * E)$	$ E * \beta * V ^2$
Eq. 5.32	$M * V ^2 + V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.33	$ V ^2 * E + M * V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.34	$2 * V ^2 + M * V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.35	$ V ^2$	$ V $
Eq. 5.36	$ V ^2$	$ V $
Eq. 5.37	$2 * V ^2$	$ V ^2$

5.2.4 Modelagem ILP do Problema RMLSA translúcido sobre SBVT-EON

Nesta seção, apresenta-se o problema RMLSA dinâmico em SBVT-EONs translúcidas. Em outras palavras, são consideradas as técnicas de agregação de tráfego elétrico e óptico. Pode-se observar que na Tabela 5.1 tem-se poucos trabalhos que apresentam modelos com técnicas de agregação elétrica e óptica ao mesmo tempo. Dos três trabalhos apresentados, apenas um é para o cenário de tráfego dinâmico, contudo é para o problema RSA transparente.

Nesta Seção, apresenta-se uma formulação ILP sem precedentes para o problema RMLSA translúcido dinâmico em SBVT-EONs. O modelo cobre todas as características de engenharia de tráfego em EONs translúcida habilitada para SBVTs no cenários de tráfego dinâmico (com agregação elétrica e óptica). Semelhante ao modelo anterior, este modelo também leva em consideração o problema de continuidade de espectro, contigui-

dade de espectro, alcance máximo de modulação, número de transmissores e receptores de cada nó e a capacidade máxima do transmissor [66, 19].

Parâmetros

Para os parâmetros de entrada, foram adicionadas cinco tipos de variáveis no problema. Essas variáveis são relativas às técnicas de agregação elétrica e óptica do problema. Deve-se observar que o uso dessas técnicas aumenta bastante as possibilidades de engenharia de tráfego EON. Portanto, a complexidade deste modelo é muito maior que dos modelos anteriores.

Os demais parâmetros de entradas do problema permanecem os mesmo parâmetros do modelo apresentado na Seção 5.2.2. Todos eles representam o estado atual da rede no momento da chegada de r_i . Segue a descrição dos novos parâmetros do modelo:

G_{xy} : Vetor binário, igual a 1 se houver um caminho óptico estabelecido entre os nós $x, y \in V$, com largura de banda disponível (bw) para suportar a demanda de tráfego atual r_i . Caso contrário, G_{xy} é 0.

$E\gamma_{ij}^k$: Índice do último *slot* no túnel óptico representado pela variável γ_{ij}^k antes de seu uso, onde $ij \in E$ e $(0 \leq k \leq (\beta - 1))$.

$M\gamma_{ij}^k$: Nível de modulação do túnel óptico representado pela variável γ_{ij}^k ($0 \leq M\gamma_{ij}^k \leq M$), onde $ij \in E$ e $(0 \leq k \leq (\beta - 1))$.

$S\gamma_{ij}^k$: O nó de origem do túnel óptico representado pela variável γ_{ij}^k ($S\gamma_{ij}^k \in V$), onde $ij \in E$ e $(0 \leq k \leq (\beta - 1))$.

$L\gamma_{ij}^k$: Posição do enlace ij em relação à origem do túnel óptico representado pela variável γ_{ij}^k , onde $ij \in E$ e $(0 \leq k \leq (\beta - 1))$. Por exemplo, pode ser o primeiro enlace do túnel, ou o segundo, e assim por diante.

Variáveis

As variáveis representam a solução do problema. O problema representado nesta seção é ainda mais complexo que na seção anterior. Para isso, foram criados mais seis tipos de variáveis para o problema. A primeira variável (φ_{xy}), relaciona como será a solução RMLSA, se utilizará caminhos ópticos novos ou já estabelecidos na rede. A segunda variável (P_{xy}) adicionada, informa se será ou não utilizado um caminho óptico já estabelecido na rede, ou seja, se a solução utilizará agregação elétrica ou não. Por fim, são adicionadas mais

quatro variáveis relativas à agregação óptica e toda sua complexidade. Segue a relação das novas variáveis neste modelo¹:

φ_{xy} : Binária, representa o uso de um caminho óptico novo ou já estabelecido. É igual a 1 se a solução para r_i utilizar um caminho óptico que conecta o par de nós $x, y \in V | x \neq y$. Caso contrário, é 0.

P_{xy} : Binária, representa o uso de um caminho óptico estabelecido (representado pela política *Least Used*) para atender r_i . É igual a 1 se a solução para r_i utilizar um caminho óptico já estabelecido na rede que conecta o par de nós $x, y \in V | x \neq y$. Caso contrário, é 0.

γ_{ij}^k : Binária, representa o uso de um túnel para agregação óptica. É igual a 1 se o túnel óptico que começa no índice de *slot* k ($0 \leq k \leq (\beta - 1)$) for utilizado na agregação óptica para algum novo caminho óptico (L_{xy}) no enlace $ij \in E$.

A_{ij}^k : Inteira, representa o primeiro índice de *slot* do túnel óptico γ_{ij}^k após seu uso, se aplicável ($0 \geq A_{ij}^k \leq k$).

B_{ij}^k : Inteira, representa o último índice de *slot* do túnel óptico γ_{ij}^k após seu uso, se aplicável ($k \geq B_{ij}^k \leq \beta$).

Δ_{ijop}^k : Binária, representa os enlaces já utilizados no túnel óptico. É igual a 1 se o túnel óptico γ_{ij}^k utilizar o enlace $op \in E$.

Uma representação gráfica dos novos parâmetros e variáveis utilizados neste modelo pode ser vista na Figura 5.2.

A Figura 5.2 mostra uma topologia com 5 nós e 4 enlaces. Alguns caminhos ópticos (1 a 6) já estão alocados na rede. Existe uma agregação óptica nos caminhos ópticos 1 e 2 e nos caminhos ópticos 3, 4 e 5. Entre os caminhos ópticos 1 e 2, há uma faixa de *slots* livres devido a um circuito agregado opticamente, que partiu (foi desativado) antes dos caminhos ópticos 1 e 2. Os caminhos ópticos 1 e 2 têm os mesmos nós de origem e destino. Para os caminhos ópticos 3, 4 e 5, seus destinos são diferentes. O caminho óptico 4 termina no nó 1 (primeira bifurcação do túnel). Observe que a redução no tamanho do túnel não é possível, pois o caminho óptico 5 não pode ser movido. O caminho óptico 5 termina no nó 3 (2ª bifurcação do túnel), podendo então ser realizada a redução no tamanho do túnel. Finalmente, o caminho óptico 3 chega ao seu destino. O caminho óptico 6, embora tenha o mesmo destino que 3, não pode ser agregado opticamente pelos caminhos 3, 4 e 5, porque sua origem é o nó 1.

¹Demais variáveis do modelo encontra-se na Seção 5.2.3.

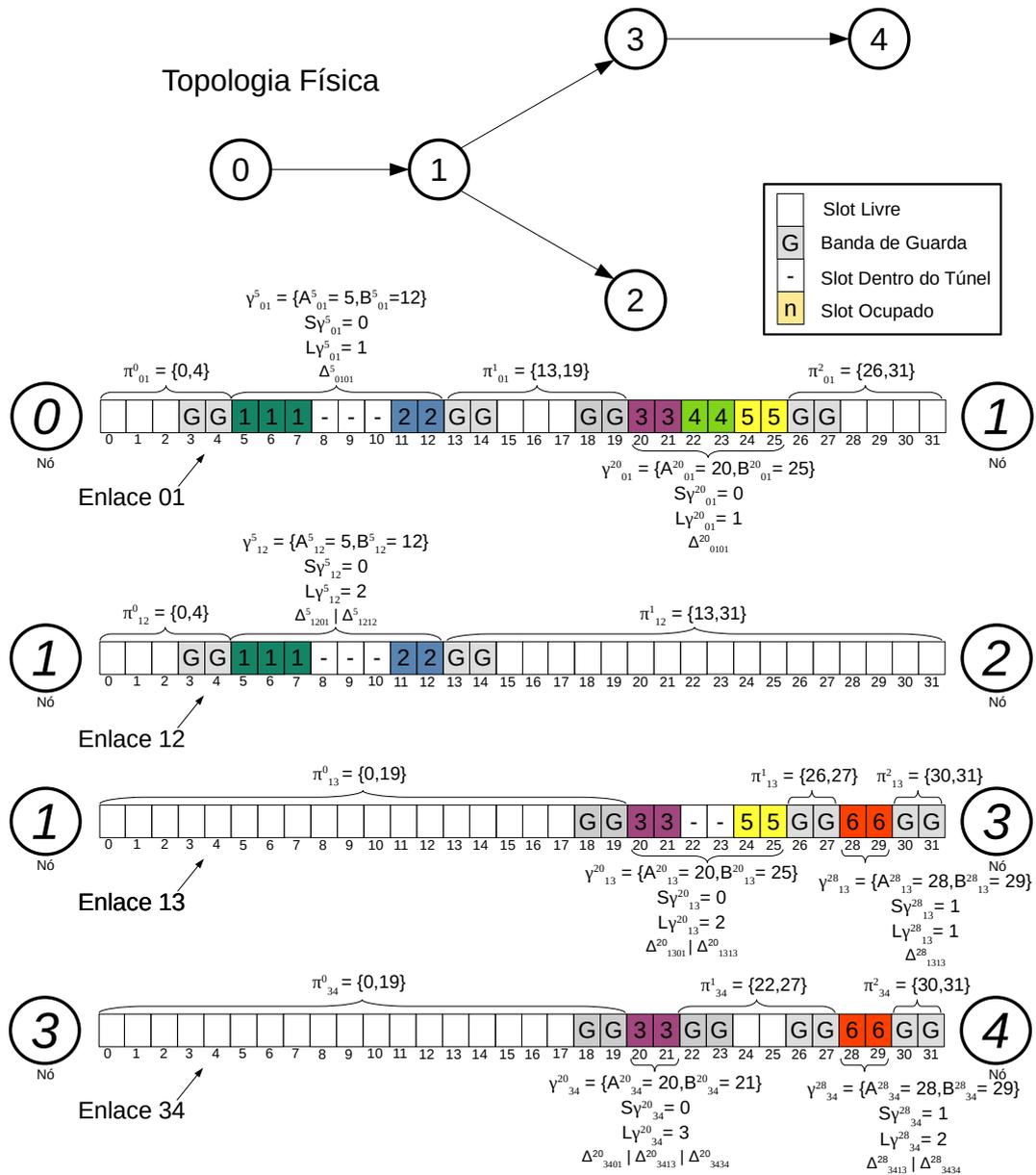


Figura 5.2: Representação gráfica dos parâmetros e variáveis utilizados no modelo para alguns enlaces.

Agora que o cenário foi descrito, deve-se compreender os valores dos novos parâmetros e variáveis do problema. A variável γ_{01}^5 representa o túnel óptico que inicia no *slot* 5 do enlace 0 1, logo $A_{01}^5 = 5$ e $B_{01}^5 = 12$. Note que estes valores podem mudar, pois o túnel pode ser estendido para ambos os lados. O valor de $S\gamma_{01}^5 = 0$ pois o nó de origem deste túnel óptico é o nó 0. O valor de $L\gamma_{01}^5 = 1$ pois o enlace 01 é o primeiro enlace percorrido pelo túnel óptico, note que $L\gamma_{12}^5$ já é igual a 2, pois é o segundo enlace percorrido por este túnel óptico. Por fim a variável Δ_{0101}^5 existe para garantir a continuidade de um

túnel óptico, melhor explicado a seguir.

A. Funções de Custo

Dentre as funções de custo apresentadas no problema anterior, são adiciona-se mais duas no problema RMLSA translúcido para SBVT-EON: o número de agregações elétricas e o número de agregações ópticas da solução. Para ambas as funções, seu objetivo é maximizar o uso de agregações. Por este motivo, estas funções recebem um sinal de subtração (“−”). Além dessas duas novas funções, a função de custo relativa ao número de caminhos ópticos da solução foi modificada, uma vez agora deve-se considerar caminhos ópticos já estabelecidos na rede (agregação elétrica). Segue a relação das novas funções de custo deste modelo:

1) Número de caminhos ópticos da solução

$$C_1 = \sum_{x,y \in V} (\varphi_{xy} \cdot \lambda) \quad (5.38)$$

Esta função de custo (Eq. 5.38) se refere ao número de caminhos ópticos (novos ou já estabelecidos) utilizados para atender a demanda r_i . Novamente, espera-se que seja usado o menor número de caminhos ópticos. Além disso, menos caminhos ópticos representam menos transponders utilizados (transmissores/receptores) na rede.

2) Número de slots utilizados

$$C_2 = \sum_{x,y \in V} (fb^{xy} - fa^{xy}) \quad (5.39)$$

Igual à função de custo da Equação 5.17.

3) Nível de modulação mais eficiente

$$C_3 = \sum_{x,y \in V} \sum_{k=0}^M (m_{xy}^k \cdot \omega_k) \quad (5.40)$$

Igual à função de custo da Equação 5.18.

4) Número de enlaces utilizados

$$C_4 = \sum_{x,y \in V} \sum_{ij \in E} (e_{ij}^{xy} \cdot \lambda) \quad (5.41)$$

Igual à função de custo da Equação 5.19.

5) *Tamanho da rota*

$$C_5 = \sum_{x,y \in V} \sum_{ij \in E} (e_{ij}^{xy} \cdot D_{ij}) \quad (5.42)$$

Igual à função de custo da Equação 5.20.

6) *Número de Agregações Elétricas*

$$C_6 = - \sum_{x,y \in V} (P_{xy} \cdot \lambda) \quad (5.43)$$

Esta função de custo (Eq. 5.43) refere-se ao número de agregações elétricas realizadas na solução. Motivar o uso de agregações elétricas diminui o custo com transmissores, o que pode ser desejável. Por outro lado, utilizar muito agregações elétricas faz com que caminhos ópticos fiquem alocados por um longo período, o que pode tornar a rede menos flexível.

7) *Número de Agregações Ópticas*

$$C_7 = - \sum_{ij \in E} \sum_k^{B^{total}} (\gamma_{ij}^k \cdot D_{ij}) \quad (5.44)$$

Esta função de custo (Eq. 5.44) refere-se ao número de agregações ópticas realizadas na solução. Motivar o uso desse tipo de agregação diminui o custo com transmissores e com bandas de guarda (espectro inutilizável).

B. Função Objetivo

As mesmas considerações mencionadas na Seção 5.2.3 aplicam-se aqui. Em relação às novas funções de custo, deve-se levar em consideração dois aspectos: (i) realizar agregações elétricas (função de custo C_6) evita o estabelecimento de novos caminhos ópticos; e (ii) realizar agregações ópticas (função de custo C_7) evita a utilização de um novo transmissor além de economizar o uso do espectro. Ambas características são mecanismos que promovem a eficiência energética da rede. Assim, o objetivo deste modelo é apresentado na Eq. 5.45.

$$\text{Minimize } \sum_i^7 C_i \quad (5.45)$$

C. Restrições

Levando em consideração que o problema de otimização deste modelo é ainda mais complexo que o anterior, novas restrições são necessárias para satisfazer as representações das técnicas de agregação elétrica e óptica. Por exemplo, restrições de possibilidade de

agregação elétrica e expansão de túnel óptico. Outras restrições como a separação de caminhos ópticos com bandas de guarda foram modificadas para verificar se há uma agregação óptica ou não. Havendo, essas bandas de guarda não são necessárias. A seguir são apresentadas todas as restrições deste modelo e sua explicação:

1) Restrições de Agregação Elétrica

$$P_{xy} \leq G_{xy}, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.46)$$

As restrições da Equação 5.46 garantem que a solução só será capaz de usar um caminho óptico com agregação elétrica ($P_{xy} = 1$) se houver um caminho óptico estabelecido ($G_{xy} = 1$) capaz de acomodar a demanda r_i , com largura de banda suficiente (bw).

2) Restrições da Topologia Virtual

$$\varphi_{xy} = P_{xy} + L_{xy}, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.47)$$

$$\sum_{x \in V} \varphi_{xy} - \sum_{x \in V} \varphi_{yx} = \begin{cases} -1 & | y = s \\ 1 & | y = d \\ 0 & | y \neq s \wedge y \neq d \end{cases}, \forall y \in V \quad (5.48)$$

$$\sum_{y \in E} \varphi_{xy} \leq 1, \forall x \in V \quad (5.49)$$

$$\sum_{x \in E} \varphi_{xy} \leq 1, \forall y \in V \quad (5.50)$$

As restrições da Equação 5.47 garantem que a topologia virtual será composta por apenas caminhos ópticos novos ou já estabelecidos na rede. Deve-se observar que a variável φ_{xy} compõem a solução do problema RMLSA. As restrições da Equação 5.48 são relativas à conservação de fluxo da topologia virtual da rede. Já as restrições das Equações 5.49 e 5.50 garantem que a demanda de tráfego seja roteada em um único caminho, sem laços na topologia virtual. Note que a utilização da nova restrição 5.50 se faz necessária aqui pois a função de custo C_6 é negativa. Caso não houvesse esta restrição, o modelo de otimização poderia propor soluções com agregações elétricas desnecessárias com laços na topologia virtual.

3) Restrições da Topologia Física

$$\sum_{i \in V} e_{ij}^{xy} - \sum_{i \in V} e_{ji}^{xy} = \begin{cases} -L_{xy} & | j = x \\ L_{xy} & | j = y \\ 0 & | j \neq x \wedge j \neq y \end{cases}$$

$$, \forall j \in V, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.51)$$

$$\sum_{x, y \in V} \sum_{j \in V} e_{ij}^{xy} \leq 1, \forall i \in V \quad (5.52)$$

$$\sum_{x, y \in V} \sum_{i \in V} e_{ij}^{xy} \leq 1, \forall j \in V \quad (5.53)$$

Igual às restrições da topologia física do modelo anterior, Equações 5.24, 5.25 e 5.26.

4) Restrições que relacionam caminhos ópticos e seus enlaces

$$\sum_{x, y \in V} \sum_{ij \in E} e_{ij}^{xy} \geq \sum_{x, y \in V} L_{xy} \quad (5.54)$$

$$\sum_{j \in V} e_{xj}^{xy} \geq L_{xy}, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.55)$$

$$\sum_{i \in V} e_{iy}^{xy} \geq L_{xy}, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.56)$$

Igual às restrições que relacionam caminhos ópticos e seus enlaces do modelo anterior, Equações 5.27, 5.28 e 5.29.

5) Restrições de Contiguidade e Continuidade do Espectro

$$\sum_{k=1}^{K_{ij}} \pi_{ij}^k = \sum_{x, y \in V} e_{ij}^{xy}, \forall ij \in E \quad (5.57)$$

$$fb^{xy} \leq \begin{cases} b_{ij}^k & | \exists \gamma_{ij}^{k'} = 1 \wedge e_{ij}^{xy} = 1 \wedge \pi_{ij}^k = 1 \\ b_{ij}^k + GB & | \forall \gamma_{ij}^{k'} \neq 1 \wedge e_{ij}^{xy} = 1 \wedge \pi_{ij}^k = 1 \end{cases}$$

$$a_{ij}^k \leq \begin{cases} fa^{xy} & | \exists \gamma_{ij}^{k'} = 1 \wedge e_{ij}^{xy} = 1 \wedge \pi_{ij}^k = 1 \\ fa^{xy} + GB & | \forall \gamma_{ij}^{k'} \neq 1 \wedge e_{ij}^{xy} = 1 \wedge \pi_{ij}^k = 1 \end{cases}$$

$$, \forall ij \in E, \forall k, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.58)$$

As restrições da Equação 5.57 tem o mesmo sentido da Equação 5.30 do modelo anterior. Por outro lado, as restrições da Equação 5.58 são modificadas em relação ao modelo anterior. Isso se deve ao fato que na agregação óptica, caminhos ópticos no mesmo túnel não precisam ser separados por um banda de guarda. Dessa forma, caso $\exists \gamma_{ij}^{k'} = 1$ então haverá agregação óptica no enlace ij e por sua vez, não será necessário bandas de guarda para a separação entre os caminhos ópticos. Analogamente, se $\forall \gamma_{ij}^{k'} \neq 1$ então não haverá agregação óptica no enlace ij , logo deve-se utilizar bandas de guarda na separação de caminhos ópticos.

6) Restrições de Formato de Modulação

$$\sum_{k=0}^M m_{xy}^k = L_{xy}, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.59)$$

$$\sum_{ij \in E} (e_{ij}^{xy} \cdot D_{ij}) \leq \sum_{k=0}^M (m_{xy}^k \cdot \omega_k), \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.60)$$

$$fb^{xy} - fa^{xy} + 1 \geq \sum_{k=0}^M (m_{xy}^k \cdot \delta_k^{bw}), \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.61)$$

Igual às restrições de formato de modulação do modelo anterior, Equações 5.32, 5.33 e 5.34.

7) Restrições de Transponders

$$\sum_y L_{xy} \leq T_x, \forall x \in V \quad (5.62)$$

$$\sum_x L_{xy} \leq R_y, \forall y \in V \quad (5.63)$$

$$U \geq fb^{xy} - fa^{xy} + 1, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.64)$$

$$U \geq B_{ij}^k - A_{ij}^k + 1, \forall ij \in E, \forall k \quad (5.65)$$

Em relação às Equações 5.62, 5.63 e 5.64, sua definição são as mesmas do modelo anterior, Equações 5.35, 5.36 e 5.37. Já para a Equação 5.65, estas restrições são referentes ao tamanho máximo do túnel óptico da agregação óptica. De modo que o tamanho máximo do túnel óptico $\gamma_{ij}^k = \{A_{ij}^k, B_{ij}^k\}$ não pode ultrapassar a capacidade máxima U do transmissor.

8) Restrições de Agregação Óptica

$$\sum_k \gamma_{ij}^k \leq 1, \forall ij \in E \quad (5.66)$$

$$\gamma_{ij}^k \leq \sum_{y \in V} e_{ij}^{S\gamma_{ij}^k y}, \forall ij \in E, \forall k \quad (5.67)$$

$$\gamma_{ij}^k \leq \sum_{y \in V} m_{S\gamma_{ij}^k y}^{M\gamma_{ij}^k}, \forall ij \in E, \forall k \quad (5.68)$$

$$\Delta_{ijop}^k \leq \sum_{x,y \in V} e_{ij}^{xy}, \forall ij \in E, \forall op \in E, \forall k \quad (5.69)$$

$$L\gamma_{ij}^k = \sum_{op \in E} \Delta_{ijop}^k \mid \gamma_{ij}^k = 1, \forall ij \in E, \forall k \quad (5.70)$$

As restrições da Equação 5.66 estabelece que haverá no máximo uma agregação óptica por enlace. As restrições da Equação 5.67 garantem que para que um túnel óptico ij seja utilizado ($\gamma_{ij}^k = 1$), é necessário que haja um enlace e_{ij}^{xy} sendo utilizado e este pertença ao mesmo caminho óptico L_{xy} do túnel γ_{ij}^k , logo $x = S\gamma_{ij}^k$. As restrições da Equação 5.68 garantem que o nível de modulação ($M\gamma_{ij}^k$) do caminho óptico que conecta os nós $S\gamma_{ij}^k$ e y é o mesmo que o do túnel óptico, se $\gamma_{ij}^k = 1$. Em outras palavras, o novo caminho óptico agregado opticamente deve ter o mesmo formato de modulação do túnel óptico. Para compreender as restrições das Equações 5.69 e 5.70 deve-se entender o problema descrito na seção a seguir:

Problema de continuidade do túnel na agregação óptica

Os caminhos ópticos originários do mesmo nó podem ser agregados opticamente. Porém, se dois caminhos ópticos agregados opticamente são separados em algum nó intermediário, suas rotas consecutivas não podem ter nenhum enlace em comum, a fim de evitar interferências trazidas por BV-OXCs distintos [45]. Este empecilho é aqui intitulado como o problema de continuidade do túnel na agregação óptica. Para entender melhor, toma-se como exemplo a topologia da Figura 5.3 e os seguintes caminhos ópticos alocados:

1. Enlaces $e_0^0 1^5, e_1^0 2^5, e_2^0 4^5$ e $e_4^0 5^5$, Slots: 6→8.
2. Enlaces $e_1^1 2^2$, Slots: 3→3.
3. Enlaces $e_1^1 2^2$, Slots: 11→11.

Caso um novo caminho óptico necessite ser alocado entre os nós 0 e 5, não será possível realizar uma agregação óptica “fim-a-fim” no caminho óptico 1, pois o caminho óptico 2

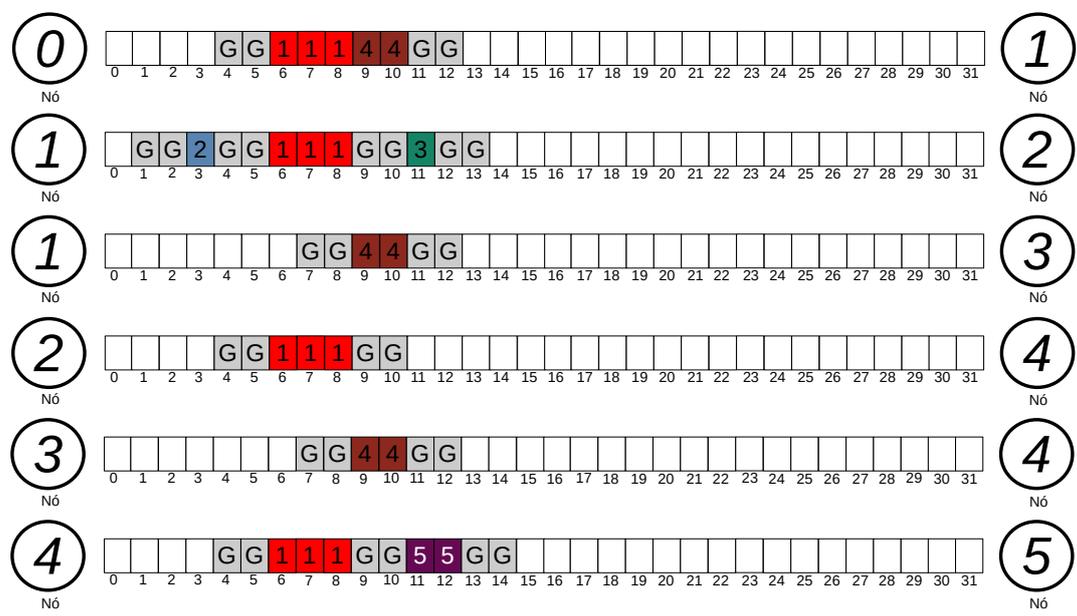
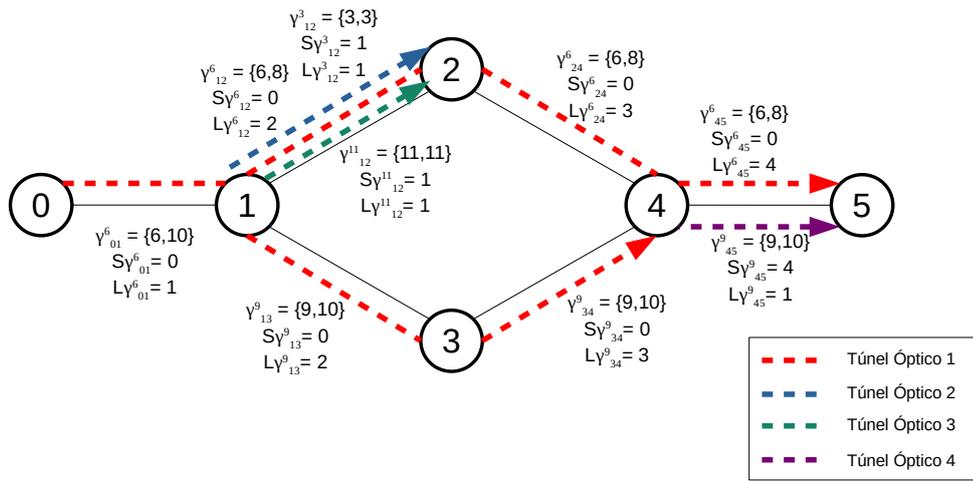


Figura 5.3: Representação gráfica do problema de contiguidade e continuidade do túnel na agregação óptica.

impede a sua expansão à esquerda do espectro e o caminho óptico 3 impede a sua expansão à direita do espectro no enlace 12, vide Figura 5.3.

Dessa maneira, a única forma de realizar uma agregação óptica no caminho óptico 1 seria através de bifurcação no nó 1. Assim, a agregação ocorreria apenas no enlace 0 1 (primeiro enlace) e uma bifurcação no nó 1 seria necessária até o seu destino. Entretanto, para se chegar até o nó 5 é obrigatória a utilização do enlace 4 5, que também é utilizado pelo caminho óptico 1. Isso não poderia ocorrer, por restrições físicas, tais como, a não ortogonalidade dos BV-OXC's [45]. Para isso, seria necessário a criação de um novo caminho óptico. Portanto, para que a solução realizasse uma agregação óptica no caminho

óptico 1, ela deveria, por exemplo, bifurcar no nó 1, utilizar os enlaces 1 3 e 3 4 e então realizar um salto virtual no nó 4, criando um novo caminho óptico entre os nós 4 5.

Obviamente, outras soluções ainda são possíveis neste caso, pode-se realizar uma nova agregação no caminho óptico 3, bifurcar em 2 e seguir até 5. De todo caso, neste exemplo, para realizar a agregação óptica seria necessário criar um novo caminho óptico, forçando a solução a ser translúcida (*multi-hop*). A solução também poderia criar um novo caminho óptico, sem agregação entre os nós 0 e 5 e assim criar uma solução transparente (*single-hop*). Por este motivo é tão importante o ajuste fino entre as funções de custo do problema.

As restrições das Equações 5.69 e 5.70 abordam esse problema. Assim, a Equação 5.69 garante que $\Delta_{ijop}^k = 1$ apenas se $e_{ij}^{xy} = 1$. Já a Equação 5.70 garante que o túnel óptico ij só pode ser usado se todos os enlaces desde a origem do túnel forem utilizados. Em outras palavras, que não haja separação nos nós intermediários da fonte.

9) Restrições Referente ao Túnel Óptico

$$\left\{ \begin{array}{l} fb^{xy} \leq B_{ij}^k \mid \gamma_{ij}^k = 1 \wedge e_{ij}^{xy} = 1 \\ A_{ij}^k \leq fa^{xy} \mid \gamma_{ij}^k = 1 \wedge e_{ij}^{xy} = 1 \end{array} \right. , \forall ij \in E, \forall k, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.71)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} fa^{xy} \leq E\gamma_{ij}^k + 1 \mid \gamma_{ij}^k = 1 \wedge e_{ij}^{xy} = 1 \\ k - 1 \leq fb^{xy} \mid \gamma_{ij}^k = 1 \wedge e_{ij}^{xy} = 1 \end{array} \right. , \forall ij \in E, \forall k, \forall x \in V, \forall y \in V \quad (5.72)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{ij}^k + GB + 1 \leq A_{ij}^{k+1} \mid \exists \gamma_{ij}^{k+1} \\ A_{ij}^k - GB - 1 \geq B_{ij}^{k-1} \mid \exists \gamma_{ij}^{k-1} \end{array} \right. , \forall ij \in E, \forall k \quad (5.73)$$

As restrições da Equação 5.71 garantem que o primeiro e o último *slots* do caminho óptico agregado xy ocorram dentro do túnel óptico $\gamma_{ij}^k = \{A_{ij}^k, B_{ij}^k\}$. As restrições da Equação 5.72 garantem que se o túnel óptico for utilizado e expandido, o novo caminho óptico agregado será adjacente ao túnel. Finalmente, As restrições da Equação 5.73 garantem que todos os túneis ópticos serão separados por uma banda de guarda, anterior ou posterior.

D. Complexidade

Este modelo apresenta mais variáveis e restrições para o problema RMLSA, uma vez que, aumenta-se as possibilidades para tendimento do tráfego. Neste sentido, a complexidade de espaço aumenta bastante. A Tabela 5.4 mostra o número de variáveis e restrições para

cada equação de restrição no pior caso (onde todas as variáveis inteiras e binárias são consideradas).

Tabela 5.4: Número de variáveis e restrições do ILP para redes translúcidas sobre SBVT-EON (pior caso).

Restrição	Nº Variáveis	Nº Restrições
Eq. 5.46	$2 * V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.47	$3 * V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.48	$ V ^2$	$ V $
Eq. 5.49	$ V ^2$	$ V $
Eq. 5.50	$ V ^2$	$ V $
Eq. 5.51	$ V ^2 * E + V ^2$	$ V ^3$
Eq. 5.52	$ V ^2 * E $	$ V $
Eq. 5.53	$ V ^2 * E $	$ V $
Eq. 5.54	$ V ^2 * E + V ^2$	1
Eq. 5.55	$ V ^2 * E + V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.56	$ V ^2 * E + V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.57	$ E * \beta + V ^2 * E $	$ E $
Eq. 5.58	$2(V ^2 + 3 * \beta * E + V ^2 * E)$	$ E * \beta * V ^2$
Eq. 5.59	$M * V ^2 + V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.60	$ V ^2 * E + M * V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.61	$2 * V ^2 + M * V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.62	$ V ^2$	$ V $
Eq. 5.63	$ V ^2$	$ V $
Eq. 5.64	$2 * V ^2$	$ V ^2$
Eq. 5.65	$2 * E * \beta$	$ E * \beta$
Eq. 5.66	$ E * \beta$	$ E $
Eq. 5.67	$ E * \beta + E * V ^2$	$ E * \beta$
Eq. 5.68	$ E * \beta + M * V ^2$	$ E * \beta$
Eq. 5.69	$ E ^2 * \beta + E * V ^2$	$ E ^2 * \beta$
Eq. 5.70	$ E ^2 * \beta$	$ E * \beta$
Eq. 5.71	$2(V ^2 + 2 * E * \beta + E * V ^2)$	$ E * \beta * V ^2$
Eq. 5.72	$2(V ^2 + E * \beta + E * V ^2)$	$ E * \beta * V ^2$
Eq. 5.73	$4 * E * \beta$	$ E * \beta$

O restante deste capítulo apresenta o ambiente de simulação utilizado para as validações numéricas dos modelos propostos seguido do resumo conclusivo deste Capítulo.

5.3 Ambiente de Simulação

As simulações foram realizadas pelo simulador de rede ONS (*Optical Network Simulator*) [131]. O solucionador de programa linear utilizado nas simulações foi o Gurobi [135] 9.1v. O Gurobi foi integrado ao ONS via biblioteca Java do Gurobi. O método de replicação independente foi empregado para gerar intervalos com nível de confiança de 95%. Cada simulação envolveu 10^5 solicitações com dezesseis tipos de solicitações de conexão: 25 Gb/s à 400 Gb/s (com passos de 25 Gb/s), todas com a mesma probabilidade de chegada. A carga de tráfego foi fixada em 120 Erlangs para todas as topologias. As solicitações de conexão seguem um processo de *Poisson* com um tempo médio de retenção de 600 segundos, de acordo com uma distribuição exponencial negativa e uniformemente distribuída entre todos os pares de nós. Foi considerada a largura de banda de cada sub-

portadora (*slot*) como sendo 12,5 GHz e foi assumido que cada enlace possui a capacidade de 320 *slots* (4 THz). Admite-se uma banda de guarda de 2 *slots* (25 GHz). Assume-se que cada nó na topologia possui 15 transmissores/receptores e cada transmissor tem a capacidade máxima de transmitir até 32 *slots*. Os níveis de modulação considerados foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, sua respectiva capacidade de subportadora, alcance transparente máximo e consumo de energia estão de acordo com as Tabelas 2.1 e 2.2, respectivamente.

As topologias consideradas nas simulações foram: *5-nodes*, *6-nodes* e a *Manhattan* nos tamanhos de 3x3 até 6x6. A Figura 5.4 mostra as topologias consideradas. Todos os enlaces são bidirecionais e seu tamanho é apresentado em km.

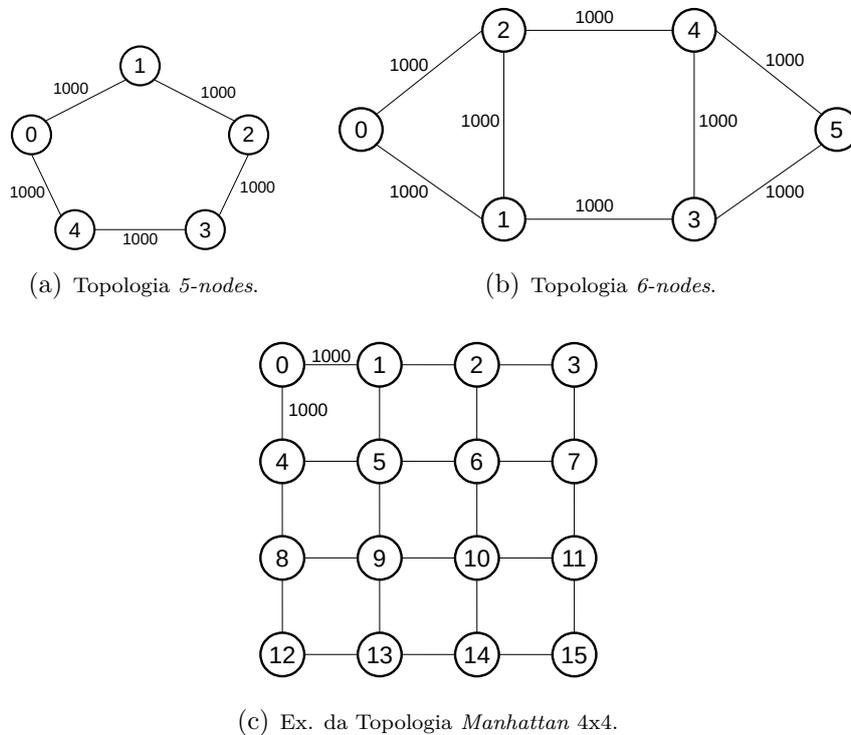


Figura 5.4: Topologias avaliadas.

5.4 Avaliações de Desempenho

Nesta seção são apresentados os resultados de performance dos modelos ILP propostos em comparação com heurísticas da literatura. Para cada modelo ILP, uma respectiva heurística da literatura foi comparada. Para o modelo ILP transparente apresentado na Seção 5.2.2, a heurística comparada foi o algoritmo KSP com o esquema de modulação adaptativa MAdap de [63] (MAdap-KSP) que combinados implementa um RMLSA transparente. Para o modelo ILP translúcido apresentado na Seção 5.2.3, a heurística compa-

rada foi o algoritmo KSP com o esquema de modulação adaptativa DMAAS de [101] e do Capítulo 4 (DMAAS-KSP) que combinados implementa um RMLSA translúcido. Por fim, para o modelo ILP translúcido SBVT-EON apresentado na Seção 5.2.4, a heurística comparada foi o algoritmo AG de [29] com o esquema de modulação adaptativa DMAAS (DMAAS-AG) que combinados implementam um RMLSA translúcido para SBVT-EONs.

Inicialmente, apresenta-se uma avaliação da complexidade assintótica dos modelos com suas respectivas heurísticas. Posteriormente, são apresentadas as seguintes métricas de desempenho: taxa de bloqueio de banda (BBR), número de transmissores por requisição, média de saltos na topologia virtual por requisição, percentual de agregação na rede e eficiência energética.

5.4.1 Avaliação de Complexidade Assintótica dos modelos

Esta avaliação compara o desempenho dos modelos ILP propostos neste capítulo e seu respectivo algoritmo heurístico da literatura. Como a complexidade dos modelos ILP e dos algoritmos heurísticos são em função do tamanho da rede, foram avaliadas a complexidade de todos utilizando diferentes configurações da topologia de Manhattan, com tamanhos variando de 3x3 a 6x6.

O desempenho do tempo de execução é avaliado pela métrica “Tempo médio para atender à solicitação”. Esta métrica calcula o tempo médio gasto pelo algoritmo para aceitar ou bloquear uma solicitação. Vários testes foram realizados em uma máquina com processador de 3,19 GHz (Intel Core Processor (Skylake, IBRS)) e 12 GB de RAM. Para os ILPs, cada solicitação de tráfego foi resolvida usando o solucionador de programa linear Gurobi [135].

A Figura 5.5 apresenta os resultados da avaliação do modelo ILP transparente e a heurística MAdap-KSP. A Figura 5.6 apresenta os resultados da avaliação do modelo ILP translúcido e a heurística DMMAS-KSP. Por fim, a Figura 5.7 apresenta os resultados da avaliação do modelo ILP translúcido para SBVT-EON e a heurística DMMAS-AG.

Para todas as comparações, o modelo ILP apresenta um crescimento exponencial de tempo para atender às demandas à medida que a rede aumenta. Obviamente, os modelos mais simples apresentam um tempo médio de atendimento menor que os mais complexos. Pode-se observar também que a complexidade do problema RMLSA translúcido é três ordens de grandeza maior que do problema RMLSA transparente.

A Figura 5.7 apresenta os resultados em conjunto em escala logarítmica. Aqui pode-se observar que o modelo ILP-Transparente apresenta um tempo similar à heurística RMLSA translúcidas para SBVT-EON, atingindo um tempo médio de execução de 33 ms para a maior rede.

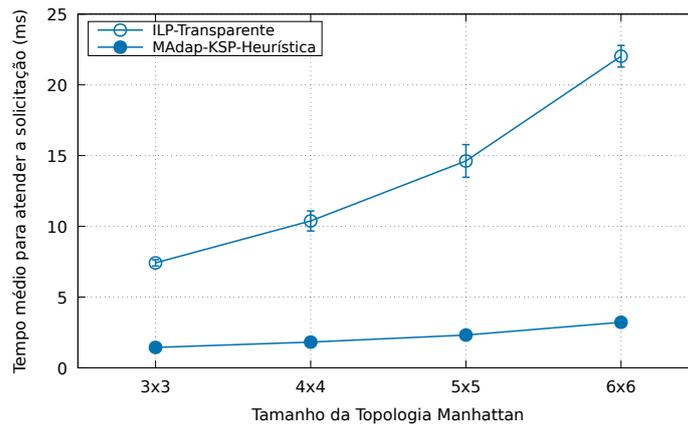


Figura 5.5: ILP Transparente \times Heurística MADap-KSP.

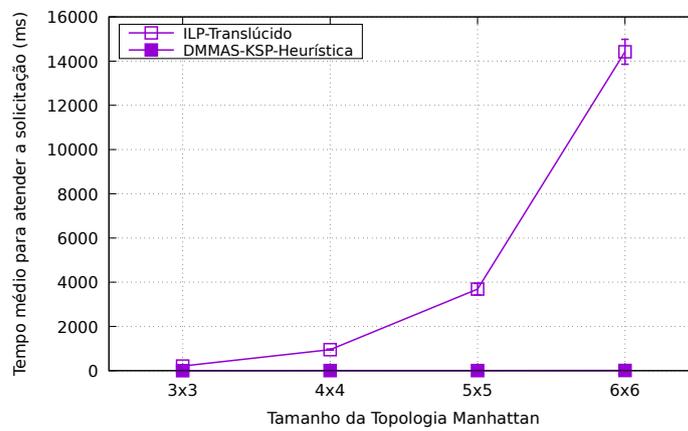


Figura 5.6: ILP Translúcido \times Heurística DMMAS-KSP.

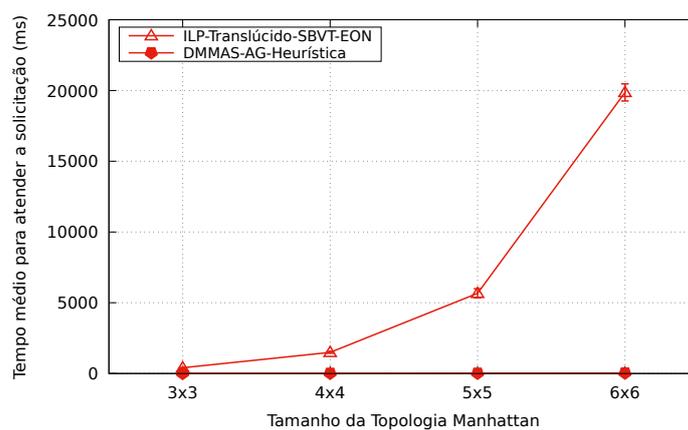


Figura 5.7: ILP Translúcido SBVT-EON \times AG-Heurística.

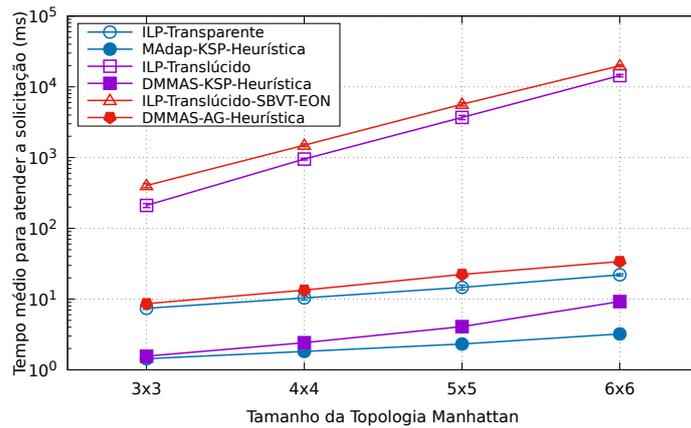


Figura 5.8: Complexidade Assintótica dos modelos ILP e algoritmos heurísticos em escala logarítmica.

Por fim, pode-se concluir que os modelos ILPs apresentados neste capítulo não possuem a escalabilidade viável para a execução em cenários de rede mais complexos. Para as demais avaliações numéricas, um pequeno cenário prático foi considerado para comparar as demais métricas de desempenho dos modelos propostos e heurísticas da literatura.

5.4.2 Taxa de bloqueio de banda (BBR)

O BBR (*Bandwidth Blocking Ratio*) reflete a taxa de banda bloqueada, quanto maior essa taxa, maior é a banda bloqueada na rede e pior o desempenho do algoritmo. A Figura 5.9 mostra o BBR dos modelos ILPs propostos e seus respectivos algoritmos heurísticos para as topologias *5-nodes* e *6-nodes*, respectivamente.

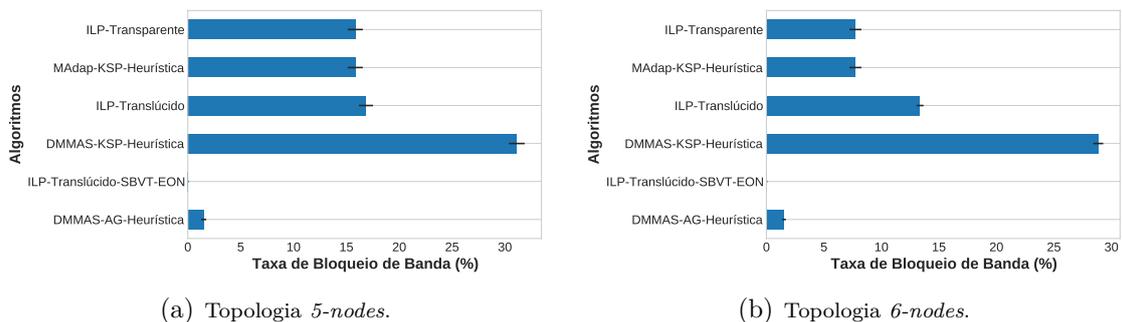


Figura 5.9: Taxa de bloqueio de banda (120 Erlangs).

É possível observar que a modelagem ILP-Translúcido apresentou os piores desempenhos de BBR junto com seu respectivo algoritmo heurístico DMMAS-KSP, cerca de 15% a 30% em ambas as topologias. Isto se deve ao fato que o cenário está limitado em número de transmissores. Quando a solução RMLSA utiliza conversores OEO na rota, a utilização

de transmissores aumenta prejudicando a alocação de recursos em cenário dinâmico. Em cenários irrestritos, em que há transmissores suficientes para todas as chamadas, estas soluções tornam-se melhores que as soluções transparentes.

Desse modo, a modelagem ILP-Transparente apresenta desempenho semelhante ao algoritmos heurístico MAdap-KSP, cerca de 14% na topologia *5-nodes* e 8% na topologia *6-nodes*. Pode-se observar que a heurística MAdap-KSP é bastante adequada ao modelo proposto, apresentando resultados semelhantes.

Por fim, os melhores resultados de BBR são observados no cenário translúcido com agregação. Pode-se observar que ILP-Translúcido-SBVT-EON não apresenta bloqueios na carga avaliada. Por outro lado, o algoritmo heurístico DMMAS-AG apresenta um BBR cerca de 1,5% para ambas as topologias. Conclui-se que propor soluções somente com múltiplos saltos não é interessante quando considera-se um número restrito de transmissores. Contudo, quando aplica-se técnicas de agregação de tráfego, pode-se aproveitar bem melhor os recursos da rede, pois a agregação de tráfego, seja elétrica ou óptica, reaproveita os transmissores e possibilita melhores resultados de BBR.

5.4.3 Média de Transmissores por Requisição

O número médio de transmissores por requisição é uma métrica de custo da rede, uma vez que, os recursos de transmissores são considerados mais custosos do que recursos de espectro. Em cenários translúcidos, pode-se utilizar mais de um transmissor na solução, por exemplo, pode-se atender uma demanda de tráfego com mais de um caminho óptico. Em um cenário com agregação de tráfego, o mesmo transmissor pode atender mais de uma demanda de tráfego ao mesmo tempo. Nesse sentido, a média de transmissores por requisição pode ser menor que 1. A Figura 5.10 mostra o número médio de transmissores por requisição dos modelos ILPs propostos e seus respectivos algoritmos heurísticos para as topologias *5-nodes* e *6-nodes*, respectivamente.

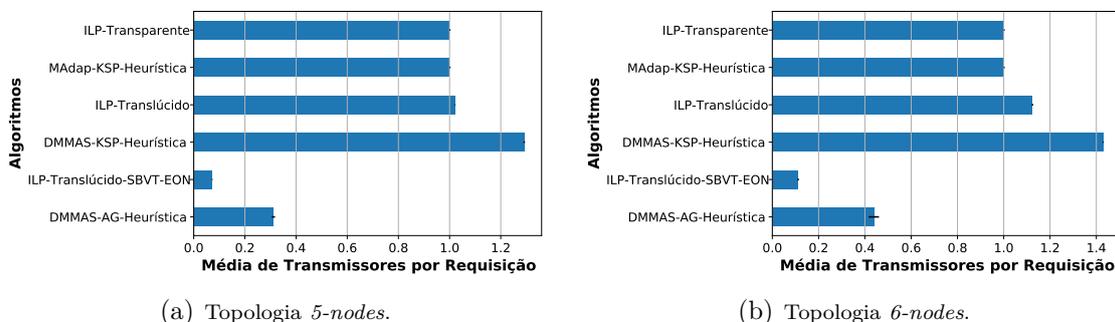


Figura 5.10: Média de Transmissores por Requisição (120 Erlangs).

Observa-se que a taxa de transmissores por requisição é fixa em cenários transparentes, apenas 1 transmissor por requisição de tráfego. Por outro lado, para o cenário translúcido, o modelo ILP-Translúcido e a heurística DMMAS-KSP, apresentam média em torno de 1,1 a 1,4 transmissores por requisição. Isso corrobora os resultados de BBR apresentados anteriormente, pois estas soluções utilizam mais transmissores e por sua vez apresentam um desempenho ruim neste cenário de rede.

Em contrapartida, a média de transmissores por requisição para o cenário translúcido com agregação de tráfego é bem menor, apresentado médias entre 0,1 a 0,4. O modelo ILP-Translúcido com agregação de tráfego mostra um desempenho até três vezes maior na utilização dos transmissores disponíveis na rede comparado com a heurística DMMAS-AG. Isso quer dizer que o modelo aproveita melhor a agregação de tráfego na rede, reaproveitando bastante os transmissores de modo geral.

5.4.4 Média de saltos na topologia virtual por requisição

O número de saltos na topologia virtual indica o número de conversões OEO e processamento elétrico que são utilizados na rede o que impacta na latência total de transmissão. A Figura 5.11 mostra a média de saltos na topologia virtual por requisição dos modelos ILPs propostos e seus respectivos algoritmos heurísticos para as topologias *5-nodes* e *6-nodes*, respectivamente.

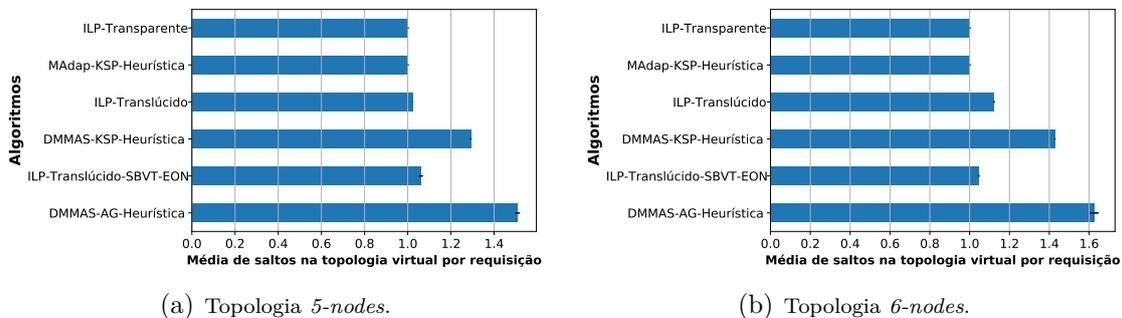


Figura 5.11: Média de saltos na topologia virtual por requisição (120 Erlangs).

Para o cenário de rede transparente, os valores apresentados nesta métrica fixam em 1, pois sempre a solução utilizará apenas um caminho óptico fim-a-fim. Para o cenário de rede translúcido, esta média apresenta valores acima de 1. Isso significa que algumas requisições são atendidas com pelo menos 2 caminhos ópticos. Pode-se observar que em ambos os cenários translúcidos com e sem agregação de tráfego, os modelos ILPs apresentam uma média menor que as heurísticas, cerca de 1,05 a 1,1 em ambas as topologias. Isso se deve ao fato que o objetivo desses modelos é a eficiência energética, e conversões OEO é uma das características que mais gastam energia.

Para os algoritmos heurísticos do cenário translúcido, a média de saltos na topologia virtual fica em torno de 1,1 a 1,65. Isso porque os algoritmos buscam ao máximo atender a demanda corrente com um número determinado de k -menores rotas e quando não encontra-se uma solução transparente entre essas rotas, a única alternativa é a utilização de saltos virtuais.

5.4.5 Percentual de Caminhos Ópticos Agregados na Rede

O percentual de agregação, apresenta quantos caminhos ópticos utilizam agregação, seja ela elétrica ou óptica. A caracterização de um caminho óptico que utilize agregação é dada pela quantidade de fluxos por transmissor, se este valor for maior que 1, então este caminho óptico utilizou agregação. Como somente o modelo ILP-Translúcido-SBVT-EON e a heurística DMMAS-AG utilizam agregação, somente estes serão apresentados. A Figura 5.12 mostra o percentual de caminhos ópticos agregados na rede para estas soluções para as topologias *5-nodes* e *6-nodes*, respectivamente.

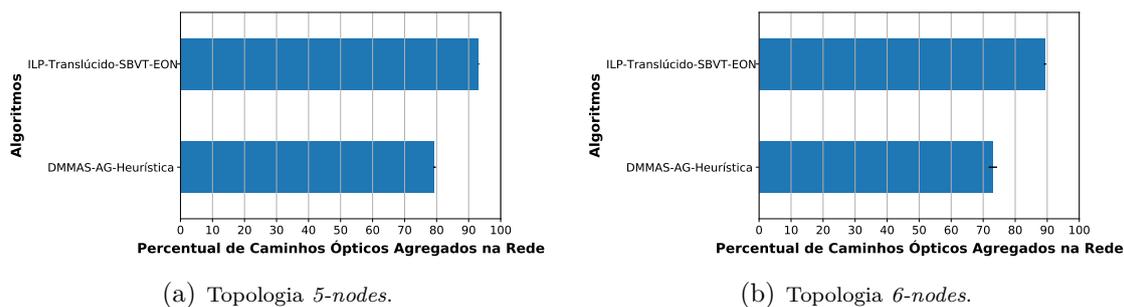


Figura 5.12: Percentual de Caminhos Ópticos Agregados na Rede (120 Erlangs).

Para o ILP-Translúcido-SBVT-EON, cerca de 93% dos caminhos ópticos alocados realizaram agregação na topologia *5-nodes*. Já para a topologia *6-nodes*, este percentual ficou em torno de 89%. Para o algoritmo DMMAS-AG este percentual ficou entre de 79% e 73% para as topologias *5-nodes* e *6-nodes* respectivamente. Isso demonstrou que a modelagem ILP consegue aproveitar ainda mais os recursos disponíveis na rede o que corrobora os resultados das métricas anteriores em relação ao aproveitamento dos transmissores. Isso também mostra, que a topologia influencia bastante no uso da agregação de tráfego, uma topologia mais restrita procura utilizar ainda mais agregação elétrica devido à falta de recursos.

Deve-se observar também, que a capacidade máxima do transmissor é a principal característica no percentual de agregação da rede. Neste cenário foi utilizada uma capacidade de 32 *slots*. Isso significa que ao utilizar uma agregação óptica, pode-se agregar até 32 caminhos ópticos por transmissor. Conforme apresentado na Seção 2.2, alguns

autores, tais como [43], delimitam este número de caminhos ópticos com os chamados sub-transmissores. Porém neste estudo, foi considerado o uso de *Fully SBVT* (F-SBVT)s o que possibilita um uso mais eficiente dos recursos da rede.

5.4.6 Eficiência Energética da Rede

A eficiência energética da rede é a razão entre o total de dados transmitidos e o gasto de energia para transmitir esses dados. Essa métrica é definida na Equação 2.14. Valores mais altos representam maior eficiência energética. A Figura 5.13 mostra a eficiência energética da rede em *Mbits/Joule* para os modelos ILPs propostos e seus respectivos algoritmos heurísticos para as topologias *5-nodes* e *6-nodes*, respectivamente.

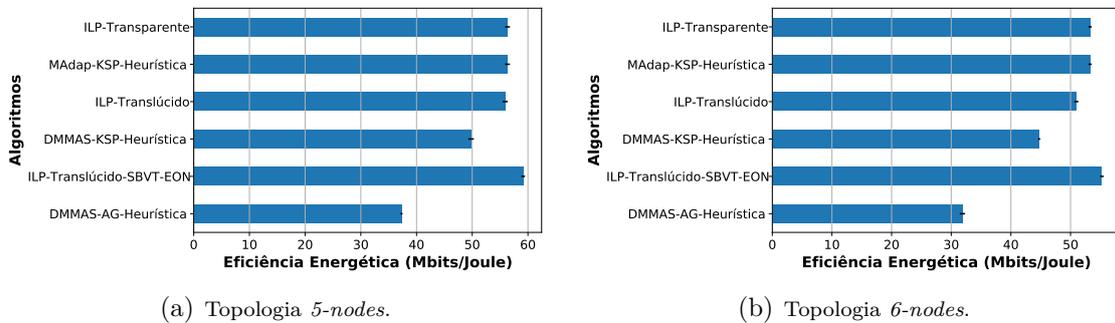


Figura 5.13: Eficiência Energética da Rede (120 Erlangs).

Pode-se observar que as soluções do cenário de rede transparente apresentam uma eficiência energética razoavelmente alta, cerca de 53 a 56 *Mbits/Joule*. Isso se deve ao fato dessas soluções sempre utilizarem somente um caminho óptico por requisição e este caminho óptico ser o mais simples possível, usando k-menores rotas.

Por outro lado, com exceção do modelo ILP-Translúcido-SBVT-EON, as demais soluções do cenário de rede translúcida, apresentam valores de eficiência energética menores, cerca de 32 a 37 *Mbits/Joule* para a heurística DMMAS-AG, 44 a 50 *Mbits/Joule* para a heurística DMMAS-KSP e 51 a 55 *Mbits/Joule* para o modelo ILP-Translúcido, em ambas as topologias

Isso por que para algumas requisições, são utilizados mais de um caminho óptico no seu atendimento. Deve-se observar que o modelo ILP-Translúcido-SBVT-EON apresentou valores ainda mais altos que as soluções transparentes. Isso mostra que o correto ajuste dos recursos e técnicas disponíveis na engenharia de tráfego EON possibilita prover um desempenho excelente no atendimento das chamadas, ao mesmo tempo em que promove uma maior eficiência energética na rede. O desempenho do modelo ILP-Translúcido-SBVT-EON apresenta uma eficiência energética próxima de 60 *Mbits/Joule*, isso quer

dizer um ganho de até 10% em relação as soluções do cenário de rede transparente, que por sua vez apresentam valores altos de BBR.

5.5 Resumo Conclusivo

Como foi observado, explorar todo o potencial e a flexibilidade fornecida pelas EONs é um problema desafiador e complexo. Associar todas essas características e encontrar uma boa solução em termos de eficiência energética é ainda mais difícil.

Este capítulo estudou o problema RMLSA com eficiência energética para SBVT-EONs. Foi proposto um modelo de programação linear inteira que leva em consideração todas as características da arquitetura SLICE e técnicas de engenharia de tráfego EON para resolver o problema RMLSA dinâmico.

De acordo com o conhecimento deste autor, este trabalho é o primeiro a propor um modelo com todas essas características. Com intuito de oferecer uma compreensão mais didática deste modelo completo, este capítulo apresentou três modelos analíticos baseados em ILP para o problema RMLSA com eficiência energética. Inicialmente apresenta-se o problema RMLSA para redes transparentes sem agregação de tráfego. Em seguida, mostra-se como torna-se complexo o problema RMLSA para redes translúcidas. Ao final, o modelo completo com técnicas de agregação de tráfego em RMLSA translúcido dinâmico é apresentado.

Para avaliar os modelos ILPs propostos, foram comparados três algoritmos heurísticos da literatura, considerando várias métricas, em três topologias de rede. Os resultados numéricos mostraram que os modelos ILP propostos moldam o problema RMLSA de maneira satisfatória embora sua escalabilidade não seja aplicável em um cenário de rede mais complexo.

Em relação às métricas avaliadas, os modelos propostos desempenham resultados melhores que suas respectivas heurísticas apresentando uma excelente performance na taxa de bloqueio de banda com uma eficiência energética até 10% melhor que as heurísticas da literatura apresentadas.

Pode-se concluir que os modelos ILPs propostos propicia um ajuste adequado no uso dos recursos da rede proporcionando um bom desempenho na taxa de bloqueio de banda e eficiência energética ao mesmo tempo.

Capítulo 6

Alcançando Eficiência Energética com Modelo de Grafo Auxiliar EON

O Capítulo 3 apresentou diversos trabalhos da literatura sobre eficiência energética EONs em diferentes classificações. A Seção 3.2 destacou as principais lacunas existentes na literatura EON em relação à sua eficiência energética. Pode-se observar que a literatura explora pouco todas as características da arquitetura EON e suas possibilidades na engenharia de tráfego. Além disso, não foi encontrado nenhum trabalho que aborda o problema RMLSA translúcido dinâmico com técnicas de agregação de tráfego elétrico e óptico (EG e OG).

Este capítulo apresenta um algoritmo RMLSA que utiliza técnicas de EG e OG baseado em um modelo de grafo auxiliar para SBVT-EON translúcida dinâmica. São propostas três políticas de engenharia de tráfego, para serem utilizadas no grafo auxiliar, cujo o objetivo é reduzir o número de dispositivos utilizados na rede proporcionando a sua possível suspensão (abordagem *Sleep Mode*).

O estudo apresentado neste capítulo, gerou duas publicações em conferências [29, 136] e uma publicação em uma revista [134].

6.1 Contextualização do problema

A literatura vem buscando soluções baseadas em redes de consumo energético consciente (*Energy-Aware* – EA) ou também chamadas redes verdes (*Green Networks* – GN) [14]. Essas abordagens exigem uma tecnologia capaz de aproveitar melhor os recursos reduzindo a lacuna entre a utilização da rede e a capacidade oferecida [28]. As EONs trouxeram novas concepções nas operações das redes ópticas, melhorando a flexibilidade da rede e sua eficiência [33].

Recentemente, algumas abordagens baseadas em Modelo de Grafo Auxiliar foram utilizadas para resolver o problema RSA com agregação de tráfego em EONs [74, 43]. Essas soluções são capazes de reduzir a taxa de bloqueio de banda na rede através de esquemas de reserva de espectro na alocação de recursos, contribuindo para a redução de sua probabilidade de exaustão. Embora as redes de núcleo sejam dimensionadas para demandas de tráfego elevadas, a quantidade de dados que flui na rede está normalmente abaixo das taxas de dados máximas suportadas [22]. Tais abordagens não levam em consideração o gasto de energia proporcionado por esses esquemas de reserva de espectro. O uso dessas políticas acarreta um aumento no consumo de energia dos dispositivos da rede.

Com base no fato de que os dispositivos de rede consomem uma determinada quantidade de energia independente da quantidade de dados processados [22], este capítulo, propõem um novo algoritmo heurístico RMLSA baseado em uma modelagem de grafo auxiliar com agregação de tráfego elétrico (EG) e óptico (OG).

A proposta tem como objetivo melhorar o consumo de energia da rede através do uso de abordagens *Sleep Mode* sem prejudicar o desempenho na taxa de bloqueio de banda da rede. Os resultados numéricos mostram que a proposta apresentada é capaz de obter desempenho melhor na taxa de bloqueio das abordagens da literatura, reduzindo significativamente os gastos de energia na rede em até 51%.

Esta proposta procura preencher as lacunas da literatura explorando melhor o cenário de tráfego dinâmico com roteamento *multihop* e agregação elétrica e óptica com foco no consumo energético EON. O restante deste capítulo apresenta os trabalhos relacionados que envolve a proposta desenvolvida, mostra o algoritmo heurístico proposto, apresenta o ambiente de simulação considerado e mostra os resultados obtidos. No final do capítulo, resume-se a proposta apresentada.

6.2 Trabalhos Relacionados

A seguir são apresentados alguns trabalhos relacionados às abordagens baseadas em grafo auxiliar utilizadas para alocação de espectro em redes ópticas. As abordagens relacionadas à eficiência energética das EONs já foram detalhadas no Capítulo 3, enquanto outras abordagens utilizadas nas avaliações numéricas foram descritas no Capítulo 4.

Grafos são comumente utilizados para modelar problemas de alocação de recursos, especialmente em redes ópticas. Os autores em [137] propõem um modelo de grafo auxiliar para o problema RWA com agregação de tráfego para redes WDM. A proposta baseia-se em um modelo que atinge vários objetivos através de diferentes políticas de agregação por meio da manipulação das arestas no grafo auxiliar. Vários esquemas de seleção de tráfego

baseados nesta abordagem são propostos e seu desempenho foi avaliado para diferentes topologias de rede.

Baseados na ideia [137], os autores em [74] investigam o problema da agregação elétrica para EONs. O trabalho propõe o uso de um grafo auxiliar para a implementação de quatro políticas de agregação de tráfego. A primeira política (MinLPs) procura minimizar o estabelecimento de novos caminhos ópticos na rede. A segunda política (MinHops) procura atender as demandas com o menor número de saltos na topologia virtual. A terceira política (MinTHP) procura atender as demandas com o menor número de saltos na topologia física. Por fim, a quarta política (LB) procura balancear as características das demais políticas.

Uma reserva de espectro para a agregação de futuras demandas de tráfego também é proposta, denominada SRLP (*Spectrum Reservation for each LightPath*). A cada novo caminho óptico alocado na rede, uma reserva de espectro é feita. Isso permite que um caminho óptico possa atender várias conexões através da técnica de agregação elétrica, utilizando os BVTs de forma mais eficiente. Os resultados mostraram que existe uma compensação entre as diferentes políticas de agregação de tráfego e estas devem ser adotadas de acordo com os objetivos e as circunstâncias da rede.

Em [138], os autores propõem a utilização de um grafo auxiliar para resolver o problema RSA com utilização de agregação de tráfego elétrico e óptico em EONs. São propostas três políticas de tráfego baseado no ajuste das arestas do grafo.

A primeira política baseia-se na minimização do número de caminhos ópticos estabelecidos. Essa política tem consequência direta em um menor uso de BVTs para atender as demandas de tráfego. A política tem como prioridade estabelecer o máximo de agregações de tráfego possíveis para minimizar os custos operacionais. Duas abordagens foram criadas para atender essa política a MEG (*Maximal Electrical Grooming*) e a MOG (*Maximal Optical Grooming*) ambas procuram realizar o máximo de agregação elétrica e óptica, respectivamente.

A segunda política tem como objetivo reduzir o número de saltos virtuais da rede (*Minimal number of Virtual Hops – MVH*). Essa abordagem causa a redução no número de conversões eletro-óptica na rede ao custo de estabelecer caminhos ópticos mais longos. A terceira e última política leva em consideração a diminuição do número de saltos físicos na rede (*Minimal number of Physical Hops – MPH*). Essa abordagem causa o estabelecimento de caminhos ópticos menores e um menor número de dispositivos BV-OXCs utilizados na rede.

Em [43] os mesmos autores propõem um novo esquema de reserva de espectro, semelhante ao esquema proposto por [74], e aplicam esta técnica nas mesmas soluções propostas em [138]. O novo esquema de reserva, denominado SRNP (*Spectrum Reservation for each*

Node-Pair), procura realizar reservas entre pares de nós. Diferentemente do esquema proposto em [74], onde o SRLP criava uma reserva para cada caminho óptico, no SRNP somente um caminho óptico dentre os pertencentes a um par de nós terá reserva. Isso permite que o transmissor consiga utilizar o espectro de forma mais eficiente.

Os resultados no novo esquema de reserva mostraram-se superiores ao esquema proposto em [74] e que existe uma compensação entre as diferentes políticas de agregação de tráfego e estas devem ser adotadas de acordo com os objetivos e as circunstâncias da rede dinâmica.

Embora ambas as ideias de reserva do espectro de [74] e de [43] reduzam a probabilidade de exaustão da rede, esses trabalhos não medem a eficiência energética. Essas abordagens utilizam uma quantidade maior de recursos da rede o que acarreta em um consumo maior de energia na rede [29].

Em trabalhos anteriores do autor desta Tese [29, 136], foi proposto um grafo auxiliar inovador que implementa técnicas de agregação de tráfego para o problema RSA dinâmico. Para este grafo, foram propostas duas políticas de eficiência de energia com base na redução do número de dispositivos utilizados. Neste capítulo, estende-se a solução proposta em [29] para o problema RMLSA e investiga-se o comportamento de diferentes políticas de engenharia de tráfego em relação à eficiência energética e ao desempenho da rede.

6.3 Algoritmo Proposto

Baseando-se na literatura de *Energy-Aware*, esta seção propõe um novo algoritmo heurístico RMLSA baseado em modelos de grafo auxiliares (AG) para melhorar o consumo de energia da rede através de abordagens *Sleep Mode*.

Baseados nos modelos de grafo auxiliares de [137] para redes WDM, os de [74, 43] e o de [35] para EONs, foi desenvolvido um novo modelo de grafo auxiliar que combina essas propostas usando técnicas de agregação elétrica e óptica que visam utilizar uma menor quantidade de dispositivos (BVT e BV-OXC) conectados na rede. Assim como os modelos ILPs propostos no Capítulo 5, o modelo AG proposto neste capítulo também permite a realização de várias políticas de engenharia de tráfego para diferentes fins. São propostas diferentes configurações de pesos nas arestas para melhorar a eficiência energética de acordo com as abordagens *Sleep Mode* e a literatura *Energy-Aware*.

A topologia da rede é definida como $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de nós e E é o conjunto de enlaces bidirecionais da rede. No cenário de tráfego dinâmico, os pedidos de conexão chegam um a um, mantêm-se por um certo período (*holding-time*) na rede e depois partem. O conjunto de requisições de conexão $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ é definido.

Cada pedido de conexão é representado por $r_i(s, d, b)$, onde s é o nó de origem e d é o nó de destino da requisição, b é a largura de banda do pedido de conexão.

Quando uma requisição r_i chega, o plano de controle determina como provisioná-la determinando sua rota através de caminhos ópticos existentes ou novos. O uso de um caminho óptico existente levará ao uso da agregação de tráfego elétrica. A utilização de um novo caminho óptico pode ocorrer em duas situações: (i) usando um transmissor (BVT) existente (agregação óptica); ou (ii) usando um novo transmissor e receptor para criação de um novo circuito óptico. A próxima seção mostra como o grafo auxiliar proposto coordena todas essas possibilidades.

6.3.1 Grafo Auxiliar (AG)

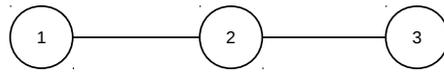
Nos modelos de grafo auxiliar apresentados em [74, 43, 29] e [136], os autores resolvem o problema RSA com agregação de tráfego. Baseado nestes modelos, este capítulo propõe um novo modelo de grafo auxiliar que resolve o problema RMLSA com agregação de tráfego. Para isso, o modelo proposto introduz um novo tipo de camada no grafo. Esta nova camada proporciona a alocação de caminhos ópticos com diferentes formatos de modulação possibilitando a utilização de múltiplos caminhos ópticos no atendimento da demanda.

A Figura 6.1 mostra um exemplo de AG para uma topologia física com três nós (Figura 6.1(a)) e a representação do estado da rede através do AG (Figura 6.1(b)). O modelo de grafo auxiliar proposto é composto por três camadas: (i) A **Camada Elétrica**; (ii) a **Camada Óptica**; e (iii) a **Camada de Modulação**. Como em [74] e em [43], um novo AG é construído sempre que uma nova solicitação de tráfego chega. Os nós em cada camada do grafo auxiliar correspondem aos nós na topologia física.

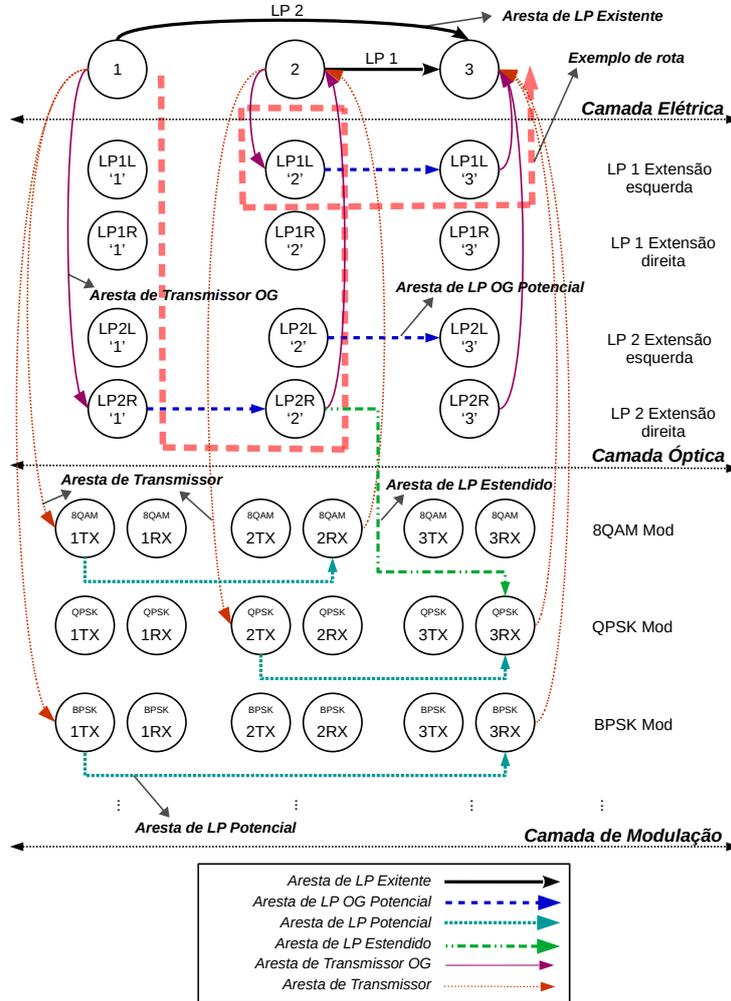
A **Camada Elétrica** faz a representação da topologia virtual da rede, exibindo os caminhos ópticos estabelecidos na rede que têm capacidade suficiente para acomodar a solicitação de tráfego através da agregação elétrica.

A **Camada Óptica** representa os caminhos ópticos estabelecidos que podem ser estendidos através da agregação óptica. Cada caminho óptico pode ser estendido para ambos os lados do espectro, esquerdo e direito, de modo que, para cada caminho óptico, existem pelo menos duas subcamadas na camada óptica que representam as possibilidades de agregação óptica neste caminho óptico. (por exemplo, *LP 1 Extensão esquerda ou direita*).

Por último, a **Camada de Modulação** é usada para representar os recursos de espectro que podem ser utilizados para a composição de novos caminhos ópticos na rede no seu respectivo formato de modulação. Os nós nesta camada representam os transmissores (Tx) e receptores (Rx) de cada BV-OXC, portanto, há dois nós por nó físico. Uma aresta



(a) Topologia Física.



(b) Grafo Auxiliar estabelecendo uma nova conexão entre os nós 1 e 3.

Figura 6.1: Grafo Auxiliar (*Auxiliary Graph – AG*) para o problema RMLSA.

em uma subcamada da Camada de Modulação representa a possibilidade de criação de um novo caminho óptico, e o índice desta subcamada representa o formato de modulação deste caminho óptico. Assim, existem pelo menos M subcamadas, onde M é o número de níveis de modulação disponíveis na rede.

Para conectar os nós na mesma camada, existem três tipos de arestas direcionais no AG: a **Aresta de LP Existente**; a **Aresta de LP OG Potencial**; e a **Aresta de LP Potencial**.

Aresta de LP Existente – ocorre caso haja um caminho óptico já estabelecido na rede e sua capacidade for suficiente para acomodar a banda da nova requisição de tráfego por meio da agregação elétrica. Caso haja mais de um caminho óptico estabelecido ligando os mesmos nós, o caminho óptico com maior capacidade será o escolhido.

Aresta de LP OG Potencial – indica que um caminho óptico pode ser estendido através da agregação óptica para o lado esquerdo ou direito do espectro no túnel óptico.

Aresta de LP Potencial – indica que existe recurso espectral contíguo e contínuo que pode ser alocado por um par de Tx/Rx para atender à demanda de tráfego atual. O K-Shortest-Path (KSP) e o First Fit (FF) são utilizados para encontrar um conjunto de caminhos ópticos potenciais e dentro deste conjunto é selecionado o mais curto disponível como “Aresta de LP Potencial”. Esta técnica visa reduzir a fragmentação do espectro [139].

Para conectar os nós em camadas diferentes, existem três tipos de arestas direcionais no AG: a **Aresta de LP Estendido**; a **Aresta de Transmissor OG**; e a **Aresta de Transmissor**.

Aresta de LP Estendido – ocorre se um caminho óptico pode ser estendido através da agregação óptica e possa ser estabelecido um novo caminho óptico com a mesma modulação através da bifurcação do túnel óptico [45].

Aresta de Transmissor OG – representa a possibilidade de reutilização de um SBVT por meio da agregação óptica. Para isso, é necessário atender restrições como capacidade máxima de subportadoras transmitidas pelo SBVT.

Aresta de Transmissor – representa se existem SBVTs livres para realização de uma conversão elétrica-óptica (E/O) ou óptica-elétrica (O/E) ainda não utilizada.

Um exemplo de rota para um pedido de conexão com origem no nó 1 e destino no nó 3 é apresentado na Figura 6.1(b). Neste exemplo existem pelo menos dois caminhos ópticos (LP 1 e LP 2) já estabelecidos na rede. A demanda é atendida através do roteamento *multihop*, utilizando dois caminhos ópticos para a transmissão e realizando uma conversão OEO no nó 2. Para o caminho do nó 1 ao 2, a conexão é realizada através da agregação óptica estendendo a frequência do espectro para *direita* no “LP 2”. Para o caminho do nó 2 ao 3, a conexão é realizada por meio da agregação óptica estendendo o espectro para a *esquerda* no “LP 1”. Observe que não é possível estender a frequência do espectro para a

esquerda no “LP 2” na rota 1-2, o mesmo acontece para a *direita* na rota 2-3 no “LP 1”. Em ambos os casos, o túnel óptico é estendido e um novo caminho óptico é criado com o mesmo formato de modulação dos caminhos ópticos estabelecidos.

Outras soluções RMLSA poderiam ser encontrados no AG apresentado. Por exemplo, a demanda de tráfego poderia ser atendida através da agregação elétrica sob o “LP 2”. Ou utilizando a agregação óptica até o nó 2 e, em seguida, executando uma agregação elétrica até o nó 3 via “LP 1”. Outra possibilidade seria a criação de um novo caminho óptico com o formato de modulação BPSK.

Algumas considerações sobre o grafo devem ser observadas. Qualquer agregação óptica deve ser realizada apenas no nó de origem do caminho óptico considerado (LP candidato). Por este motivo existe apenas uma “Aresta de Transponder OG” em cada subcamada na Camada Óptica. Tendo em vista que as subcamadas da “Camada Óptica” são formadas a partir dos caminhos ópticos já estabelecidos na rede, para evitar a alta complexidade de sua construção, executa-se (*offline*) o algoritmo de YenKSP [129] entre os nós de origem e destino da requisição e são considerados apenas os caminhos ópticos dos nós pertencentes aos k -menores caminhos. Isso limita o tamanho do grafo e evita uma maior complexidade na construção e na busca da solução proposta.

A principal contribuição desta proposta, em comparação com a proposta de [29] é a introdução da nova “Camada de Modulação” para o resolver o problema RMLSA. Além disso, acrescenta-se um grau a mais na elaboração das arestas de LP, pois agora deve-se levar em consideração o formato de modulação do circuito na agregação óptica.

6.3.2 Políticas de Eficiência Energética

Com o modelo AG proposto (Seção 6.3.1), diversas políticas para a alocação de tráfego podem ser facilmente implementadas para atender às necessidades do operador da rede.

Com o objetivo de melhorar o consumo de energia da EON, este capítulo propõe três políticas que proporcionam a eficiência energética. Todas elas se concentram na redução do número de dispositivos usados (SBVTs e BV-OXCs), seguindo abordagens *Sleep Mode*. As políticas são descritas a seguir:

Minimizar SBVTs (*MinSBVT*): visa minimizar o número de caminhos ópticos, reduzindo o número de conversões OEO. O peso das arestas de Transmissor é muito maior do que o peso das arestas de LP. Assim, a rota fornecida pelo Dijkstra evitará o uso dessas arestas no AG, evitando o uso excessivo de SBVTs e consequentemente saltos *multi-hop* na solução. São atribuídos ainda, um menor peso às arestas do Transmissor OG para que os SBVTs tenham prioridade na agregação óptica.

Maximizar Agregação (MaxGrooming): é proposto para maximizar a agregação elétrica e óptica na solução. O peso das arestas que estabelecem um novo caminho óptico e não reutilizam SBVTs é muito maior que as demais arestas. Além disso, as arestas de Transmissor (que representa o uso do novo SBVT) recebem um peso maior do que as arestas de Transmissor OG.

Minimizar Energia (MinEnergy): é proposto para minimizar o consumo de energia sem perder o desempenho da rede. O equilíbrio de carga entre a eficiência energética e a taxa de bloqueio é um problema desafiador. Para isso, o peso das arestas de Transmissor é mantido maior do que o peso das arestas de LP, neste sentido, as arestas de LP têm pesos ajustados para manter um melhor equilíbrio com as arestas de Transmissor.

Para a implementação destas políticas, os pesos das arestas são atribuídos de acordo com a Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Atribuição dos pesos do AG para as políticas de eficiência energética

	MinSBVT	MaxGrooming	MinEnergy
<i>Aresta de LP Existente</i>	$10^{-6} \cdot s \cdot h \cdot l \cdot m$	$10^{-6} \cdot s \cdot h \cdot l \cdot m$	$s \cdot h \cdot l \cdot m$
<i>Aresta de LP OG Potencial</i>	$10^{-6} \cdot s \cdot h \cdot l \cdot m$	$10^{-6} \cdot s \cdot h \cdot l \cdot m$	$0.05 \cdot s \cdot h \cdot l \cdot m$
<i>Aresta de LP Potencial</i>	$10^{-6} \cdot s \cdot h \cdot l \cdot m$	$s \cdot h \cdot l \cdot m$	$0.1 \cdot s \cdot h \cdot l \cdot m$
<i>Aresta de LP Estendido</i>	$10^{-6} \cdot s \cdot h \cdot l \cdot m$	$s \cdot h \cdot l \cdot m$	$0.1 \cdot s \cdot h \cdot l \cdot m$
<i>Aresta de Transmissor OG</i>	50	10^{-6}	$5 \cdot 10^6$
<i>Aresta de Transmissor</i>	100	1	$10 \cdot 10^6$

Para todas as arestas de LP, considera-se o número de *slots* (s), o número de saltos (h), o comprimento (l) e o formato de modulação (m) do caminho óptico em sua ponderação. É desejável que a solução tenha caminhos ópticos mais curtos e economize no uso de espectro sempre que possível. Isso também está de acordo com o modelo de eficiência energética apresentado na Seção 2.7.

6.3.3 Algoritmo RMLSA Dinâmico

O Algoritmo RMLSA Dinâmico que manipula o grafo auxiliar proposto é descrito no Algoritmo 1.

Quando o pedido de conexão r_i chega, o AG é construído de acordo com o estado atual da rede (linha 1). Todas as arestas que aparecem no AG devem satisfazer o requisito de largura de banda de r_i . Então, pode-se atribuir pesos das arestas de acordo com as diferentes Políticas de Eficiência Energética (Seção 6.3.2). Em seguida, executa-se o algoritmo de Dijkstra [140] entre os dois nós da “Camada Elétrica” que correspondem

Algoritmo 1 *Algoritmo RMLSA Dinâmico*

Entrada: O pedido de conexão r_i

Saída: Se uma solução RMLSA translúcida for encontrada, r_i deverá ser aceita e configurada de acordo com o AG. Caso contrário, r_i deverá ser bloqueada.

- 1: Construir o AG baseado em r_i e atribuir pesos correspondentes às arestas de acordo com as diferentes políticas de eficiência energética.
 - 2: Executar o algoritmo de Dijkstra entre os nós da “Camada Elétrica” do AG correspondentes a s e d em r_i .
 - 3: **se** nenhuma rota for encontrada **então**
 - 4: Bloqueia a requisição r_i .
 - 5: **senão**
 - 6: Provisiona r_i de acordo com a rota encontrada no AG, atendendo todas suas restrições, usando agregação elétrica, agregação óptica, ou estabelecendo um novo caminho óptico com o formato de modulação indicado quando necessário.
 - 7: Aceita a conexão r_i .
 - 8: **fim se**
-

à fonte s e ao destino d da requisição r_i no grafo auxiliar (linha 2). A rota selecionada determina se é possível e como deve ser provisionado a requisição de tráfego r_i . Caso o algoritmo de Dijkstra não encontre um caminho, bloqueia-se a requisição (linha 4). Caso contrário, são estabelecidos novos caminhos ópticos com o formato de modulação indicado e/ou são utilizados caminhos ópticos existentes, através da agregação de tráfego EG e OG de acordo com a restrições do AG (RMLSA) (linha 6). Em seguida, aceita o pedido de conexão r_i (linha 7). Nota-se que o grafo auxiliar possibilita a utilização de mais de um caminho óptico para o atendimento da requisição, ou seja, permite o roteamento *multihop* através de conversões OEO na rede.

6.3.4 Complexidade de Tempo do Algoritmo Proposto

A complexidade do tempo da solução proposta é analisada da seguinte forma. Para a construção do AG, $|E| * |S|$ é número máximo de caminhos ópticos existentes na rede, onde S é o conjunto de *slots* em cada enlace. Assim, a complexidade de tempo para a construção da “Camada Elétrica” é $O(|V| + |E| * |S|)$.

Analogamente, o número máximo de subcamadas na “Camada Óptica” é $2(|E| * |S|)$, por causa da extensão para os dois lados do espectro, *esquerda* e *direita*, em cada caminho óptico. Dessa forma, a complexidade de tempo para a construção da “Camada Óptica” é $O((|V| * 2(|E| * |S|))^2)$ pois cada nó pode ter uma “Aresta de LP OG Potencial” e/ou uma “Aresta de LP Estendido”. O número de subcamadas da “Camada de Modulação” é $|M|$, e há 2 nós por nó físico. Como é utilizado o KSP para encontrar uma Arestas de LP Potencial, a complexidade do tempo para construir esta camada com todas as “Arestas de LP Potencial” é $O((2 * |V| * M * K)^2)$. O número máximo de “Arestas de Transmissor OG”

mais as “Arestas de Transmissor” é $4 * (|E| * |S| * |V|) + 2 * |V| * M$, assim a complexidade de tempo para construir todas as arestas é $O(4 * (|E| * |S| * |V|) + 2 * |V| * M)$.

Substituindo a soma de todos os termos menores pelos maiores e cortando as constantes assintoticamente, tem-se que a complexidade de tempo total da construção de um AG é: $O((|E||S| * |V|)^2 + (|V|^2))$. Além disso, o número máximo de nós no grafo AG é $N = |V| + (2|E| * |S| * |V|) + (|V| * M)$, finalmente a complexidade de tempo para executar o Dijkstra no AG é $O(|N| \log |N|)$.

6.4 Ambiente de Simulação

Foram realizadas simulações para avaliar o desempenho do AG proposto (com o uso das políticas *MinSBVT*, *MaxGrooming* e *MinEnergy*) em comparação com as propostas de [115, 43] e [126] para resolver o problema RMLSA. Foram implementados os melhores algoritmos, em termos de desempenho da taxa de bloqueio de cada proposta da literatura.

Dos algoritmos implementados em [115], foi utilizado o algoritmo GGA (*Green Grooming Algorithm*) com o esquema de alocação DASRA (*Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation*) e a política MP (*Minimizing Power consumption*) descritos no Capítulo 3. Das propostas implementadas em [43], foram utilizadas o MVH (*Minimal number of Virtual Hops*) com dois esquemas de reserva de espectro proposto pelos autores: (i) SRLP (*For Each Lightpath*); e (ii) SRNP (*For Each Node-Pair*).

Os algoritmos de [115] e de [126] tratam do problema RMLSA, enquanto os algoritmos de [43] tratam do problema RSA. Para este último, para lidar com o problema RMLSA, foi utilizado o esquema de modulação adaptativa mAdap [63] descrito na Seção 4.1. Para todos os algoritmos, $k = 3$, a política escolhida para alocação de espectro é a *First Fit* (FF) e a agregação de tráfego elétrica emprega a política de caminho óptico menos utilizado (*least used lightpath*).

As simulações foram realizadas pelo simulador de rede ONS (*Optical Network Simulator*) [131]. Cada simulação foi realizada cinco vezes utilizando o método de replicações independentes. Para os resultados apresentados foram calculados intervalos de confiança com 95% de confiabilidade.

Em cada simulação foram geradas 10^5 requisições de conexão distribuídas uniformemente em 6 níveis de granularidade variando de 25 Gb/s até 400 Gb/s com passos de 25 Gb/s. O processo de chegada das chamadas segue a distribuição de *Poisson* com um tempo médio de retenção de 600 segundos, de acordo com uma distribuição exponencial negativa e uniformemente distribuída entre todos os pares de nós da rede.

As topologias consideradas nas simulações foram a *6-nodes* com 6 nós e 8 enlaces bidirecionais (Figura 5.4(b)), a USANet com 24 nós e 43 enlaces bidirecionais (Figura

4.6), e a topologia *Pacific Bell* com 17 nós e 23 enlaces bidirecionais (Figura 6.2). Em todas as Figuras, as distâncias apresentadas estão em quilômetros (km).

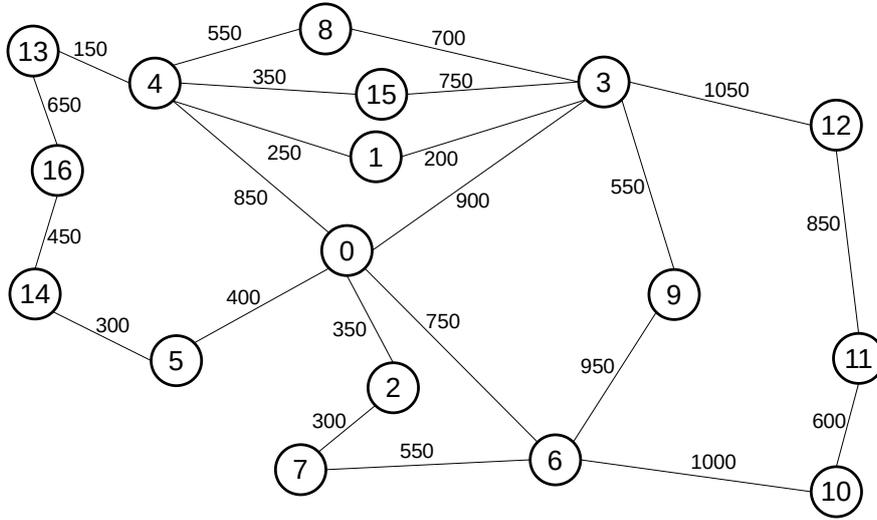


Figura 6.2: Topologia *Pacific Bell*.

Os parâmetros de rede a seguir foram os mesmos utilizados em [43]. Foi considerada a largura de banda de cada subportadora (*slot*) como sendo 12,5 GHz e foi assumido que cada enlace possui a capacidade de 320 *slots* (4 THz). Admite-se uma banda de guarda de 2 *slots* (25 GHz). Assume-se que cada nó na topologia possui 15 transmissores (Tx) e receptores (Rx). Cada transmissor tem a capacidade máxima de transmitir até 32 *slots*. As modulações consideradas são BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM com 1, 2, 3, 4, 5 e 6 bits por símbolo e, considerando eventuais regeneradores de sinal, calculam-se as distâncias máximas como 8000, 4000, 2000, 1000, 500 e 250 km, respectivamente conforme a Tabela 2.1.

O modelo de consumo energético adotado foi o apresentado na Seção 2.7, em que calcula-se o consumo de energia total da rede em Joules (J) de acordo com a Equação 2.13. Em outras palavras, calcula-se o consumo de energia de todos os caminhos ópticos estabelecidos na simulação.

6.5 Resultados Numéricos

Nesta seção, primeiro comparam-se as políticas de eficiência energética propostas na Seção 6.3.2 em diferentes métricas de desempenho. Investiga-se qual delas promove o melhor equilíbrio em eficiência energética e taxa de bloqueio de largura de banda (BBR). Para avaliar o desempenho do algoritmo heurístico (AG), utiliza-se o modelo ILP proposto na

Seção 5.2.4 e o AG sob a política *MinEnergy* (melhor avaliada). Finalmente, avalia-se o desempenho do AG sob a política *MinEnergy* em comparação com as propostas de [115, 43] e [126] para as diversas métricas de desempenho.

6.5.1 Avaliação das Políticas de Eficiência Energética

Para esta avaliação, foi utilizada a topologia USANet (Figura 4.6). Foram comparadas as políticas de eficiência energética *MinSBVT*, *MaxGrooming* e *MinEnergy*, com quatro métricas de desempenho: (i) Taxa de bloqueio de banda (BBR); (ii) Média de saltos na topologia virtual; (iii) Percentual de Caminhos Ópticos Agregados na Rede; e (iv) Eficiência Energética da Rede.

Taxa de bloqueio de banda (BBR)

Esta métrica (BBR) reflete o percentual de largura de banda bloqueada na rede, valores mais altos significam que mais bits foram bloqueados, portanto, valores mais baixos são desejáveis. A Figura 6.3 mostra os resultados desta métrica.

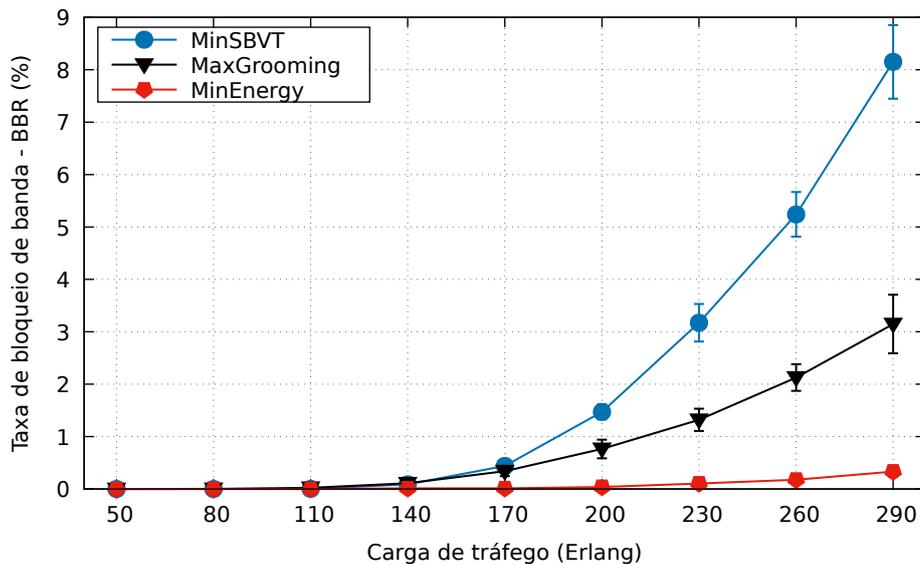


Figura 6.3: Avaliação das Políticas de Eficiência Energética para a Métrica BBR na Topologia USANet.

Pode-se observar que a política *MinEnergy* obteve o melhor desempenho de BBR, alcançando uma redução de até 96% considerando as demais políticas comparadas. Em relação à comparação entre as políticas *MaxGrooming* e *MinSBVT*, o *MaxGrooming* obteve uma redução de até 22% para cargas baixas e até 60% para cargas maiores. Observa-se que a promoção do uso de agregação óptica traz mais benefícios para o desempenho do

BBR do que o uso de menos transmissores. Em contrapartida, observaremos que o gasto de energia é muito maior.

Média de saltos na topologia virtual por requisição

A média de saltos na topologia virtual (VT) indica quantos caminhos ópticos (conversões OEO) foram utilizados para atender às demandas de tráfego. Isto está diretamente relacionado ao número de SBVTs utilizados na solução RMLSA. Assim, quando essa média é menor, menos SBVTs são utilizados por solicitação. A Figura 6.4 mostra os resultados desta métrica.

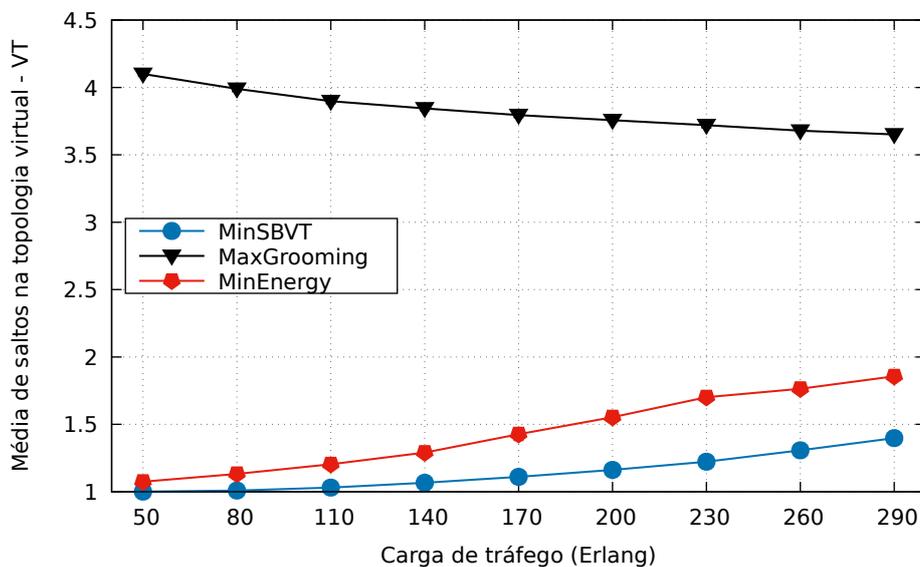


Figura 6.4: Avaliação das Políticas de Eficiência Energética para a Métrica VT na Topologia USANet.

Como esperado, pode-se observar que a política *MinSBVT* tem a menor média, em torno de 1,2 saltos virtuais por solicitação. A política do *MinEnergy* também apresenta baixa média de saltos, em torno de 1,4. Isso demonstra que o uso de mais SBVTs está diretamente relacionado ao aumento do gasto de energia, que a política do *MinEnergy* busca reduzir.

Por outro lado, a política *MaxGrooming* apresenta uma média de 3,8 saltos virtuais por solicitação. Isso se deve ao alto reaproveitamento dos recursos do transmissor, o que torna a solução muito gulosa. Embora isso traga benefícios para o desempenho do BBR, aumenta o gasto de energia e a latência da rede.

Percentual de Caminhos Ópticos Agregados na Rede

O percentual de caminhos ópticos agregados (GR) na rede mostra a porcentagem de caminhos ópticos estabelecidos que utilizaram agregação de tráfego óptico ou elétrico ao longo da simulação. A Figura 6.5 mostra os resultados desta métrica.

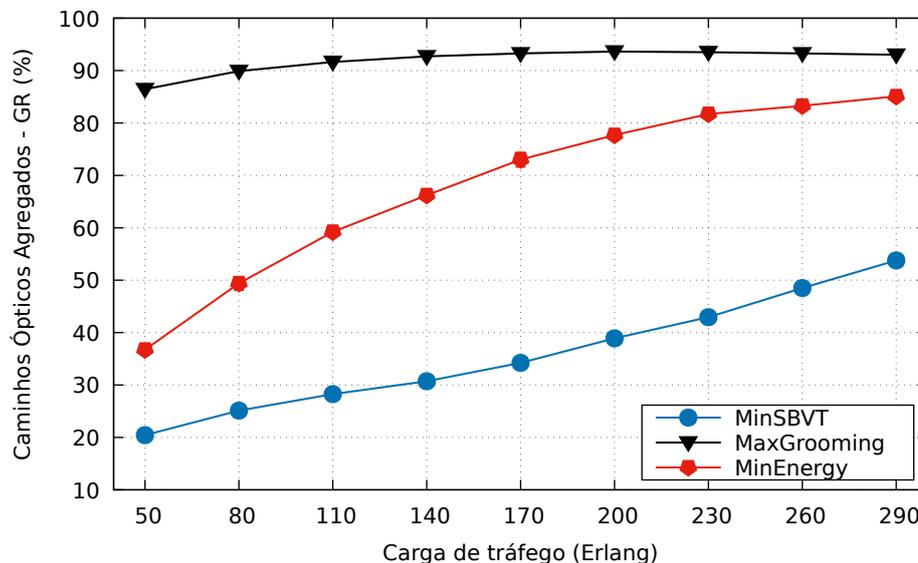


Figura 6.5: Avaliação das Políticas de Eficiência Energética para a Métrica GR na Topologia USANet.

Para a política *MaxGrooming*, praticamente todos os caminhos ópticos sofreram agregação óptica ou elétrica (cerca de 93%, dos quais 81% foram agregação óptica). O maior uso de agregação óptica ocorre porque suas restrições são mais simples do que a agregação elétrica (apenas a mesma fonte deve ser compartilhada, não o mesmo destino).

Além disso, para a política *MinEnergy*, a porcentagem agregada foi de 36% a 85%. Isso ocorre porque, com o aumento da carga de tráfego, a solução passa a utilizar mais SBVTs por solicitação, o que provoca automaticamente um maior uso da agregação de tráfego. Da mesma forma, a mesma situação ocorre com a política *MinSBVT*.

Eficiência Energética da Rede

É importante observar que aumentar a carga não aumenta a quantidade de dados servidos. A Figura 6.6 mostra os resultados desta métrica.

Pode-se perceber que a política com melhor desempenho energético foi a *MinEnergy*, seguida da *MinSBVT*. A *MinEnergy* mostrou uma eficiência média de cerca de 28,5 Mbits/Joule, que é cerca de 12% a mais que *MinSBVT* e 33% a mais que a *MaxGrooming*. Isso demonstra que o equilíbrio alcançado pela política *MinEnergy* proporciona

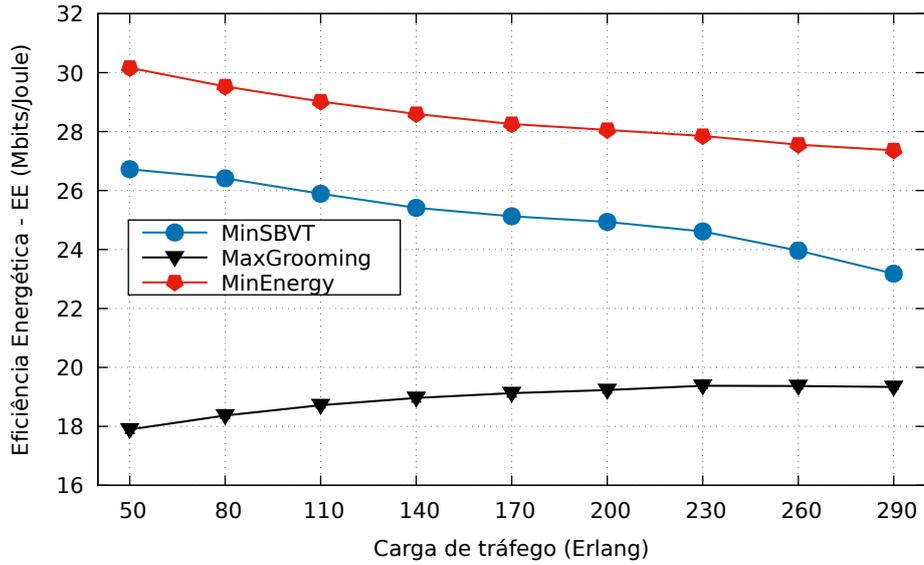


Figura 6.6: Avaliação das Políticas de Eficiência Energética para a Métrica EE na Topologia USANet.

melhores resultados em eficiência energética com um alto desempenho na taxa de bloqueio. Por outro lado, pode-se observar que o uso de muitos caminhos ópticos agregados pode proporcionar maior gasto de energia, devido ao alto uso de SBVTs por solução.

É importante destacar que as métricas foram avaliadas para mostrar os ganhos relacionados ao objetivo de cada política. A compensação apropriada de todos os recursos instalados na rede é um problema desafiador. O objetivo principal deste capítulo é encontrar a melhor solução em termos de eficiência energética e desempenho da rede, portanto, a solução mais adequada é a política *MinEnergy* que será utilizada nas próximas avaliações.

6.5.2 Avaliação de Desempenho do AG

Nesta avaliação, comparamos o desempenho do modelo ILP proposto na Seção 5.2.4 com o grafo auxiliar proposto neste capítulo sob a política do *MinEnergy* (melhor avaliada na seção anterior). Vários testes foram realizados em uma máquina com processador de 3,19 GHz (Intel Core Processor (Skylake, IBRS)) e 12 GB de RAM. Para o ILP, cada solicitação de tráfego foi resolvida usando o solucionador de programa linear Gurobi [135].

Devido à não escalabilidade do modelo ILP, visto na Seção 5.4.1, considera-se um pequeno cenário para que seja viável a comparação com o algoritmo heurístico proposto neste capítulo (*MinEnergy*). Para isso, utiliza-se a topologia *6-nodes* (Figura 5.4(b)), por ela possuir poucos nós e enlaces, o que reduz significativamente o número de variáveis e restrições do problema.

Três métricas de desempenho foram avaliadas: (i) Taxa de bloqueio de banda (BBR); (ii) Tempo médio para atender à solicitação; e (iii) Eficiência Energética da Rede.

Taxa de bloqueio de banda (BBR)

O BBR reflete o percentual de largura de banda bloqueada na rede. A Figura 6.7 mostra os resultados desta métrica.

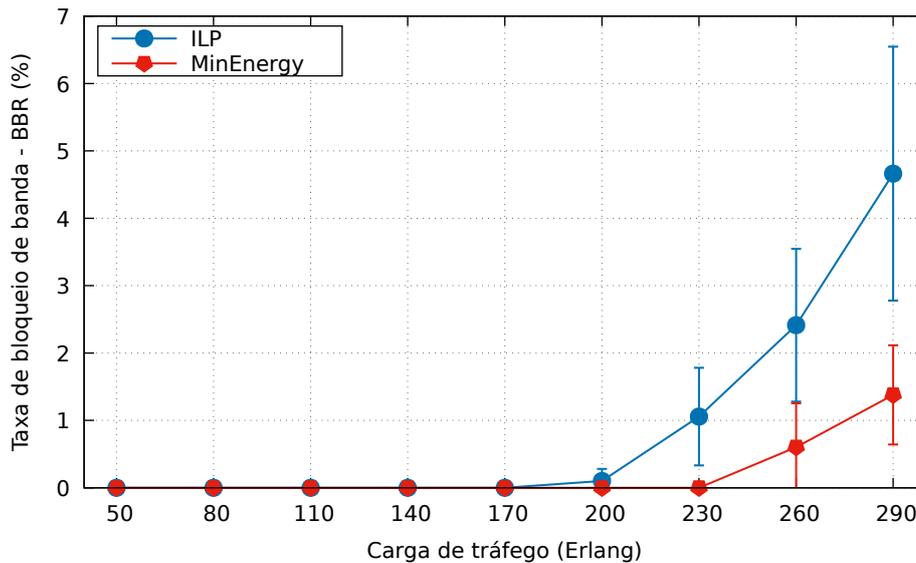


Figura 6.7: Avaliação de desempenho do modelo ILP e algoritmo heurístico AG para a Métrica BBR na Topologia *6-nodes*.

O desempenho de BBR do modelo ILP começa em 200 Erlangs, a partir desta carga, seu crescimento é bastante acentuado, chegando a 4,7%. O ganho médio apresentado pela heurística *MinEnergy* é em torno de 70%. Isso ocorre porque o ILP procura todas as alocações possíveis antes de bloquear. Isso permite o uso de soluções complexas com muitos caminhos ópticos, muitos SBVTs, que poderiam ser usados em demandas futuras, dado que o cenário de tráfego é dinâmico. É importante notar também que o intervalo de confiança é bastante alto nesta simulação, uma vez que a simplicidade do cenário em questão gera um espaço de estados relativamente restrito que, neste caso, possui alternativas de solução distintas o suficiente para gerar resultados de BBR com alta variabilidade, a despeito do número de simulações independentes realizadas.

Tempo médio para atender à solicitação

Esta métrica (TIME) calcula o tempo médio gasto pelo algoritmo para aceitar ou bloquear uma solicitação. Valores menores são o desejável. A Figura 6.8 mostra os resultados desta métrica.

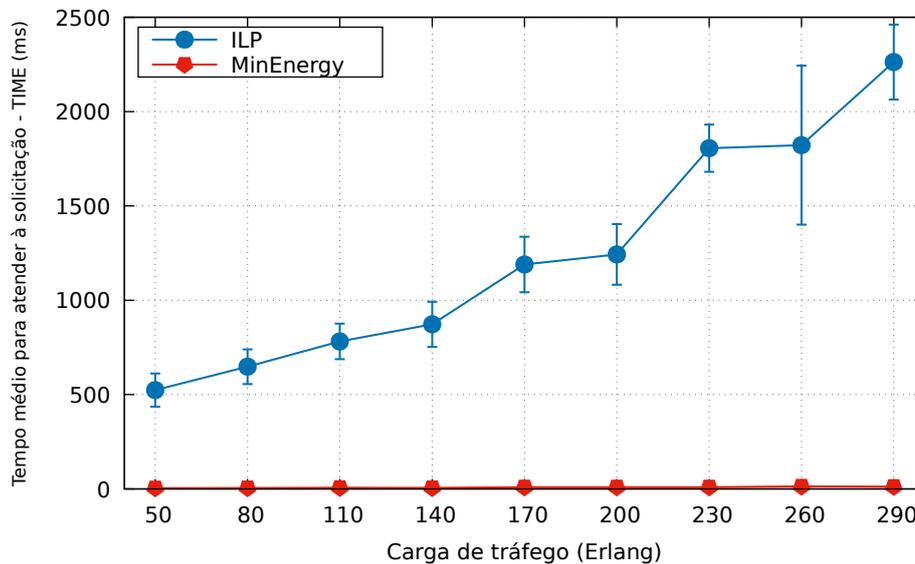


Figura 6.8: Avaliação de desempenho do modelo ILP e algoritmo heurístico AG para a Métrica TIME na Topologia *6-nodes*.

Observa-se que o tempo médio de atendimento de uma demanda do modelo ILP é até duas ordens de grandeza maior que o tempo médio do algoritmo heurístico *MinEnergy*. Isso mostra o qual o modelo complexo em relação a heurística proposta. Deve-se observar também que a topologia de rede considerada é pequena em relação ao número de nós e enlaces. Se a comparação fosse em topologias mais complexas este tempo seria ainda maior.

Outra característica notável é o crescimento do tempo com o aumento da carga de tráfego. Isso se deve ao fato que em cargas maiores, mais caminhos ópticos simultâneos estão estabelecidos na rede, logo o número de variáveis e restrições do problema aumenta e a complexidade para resolver o ILP torna-se maior.

Eficiência Energética da Rede

Esta seção apresenta os resultados da métrica (EE). A Figura 6.9 mostra os resultados desta métrica.

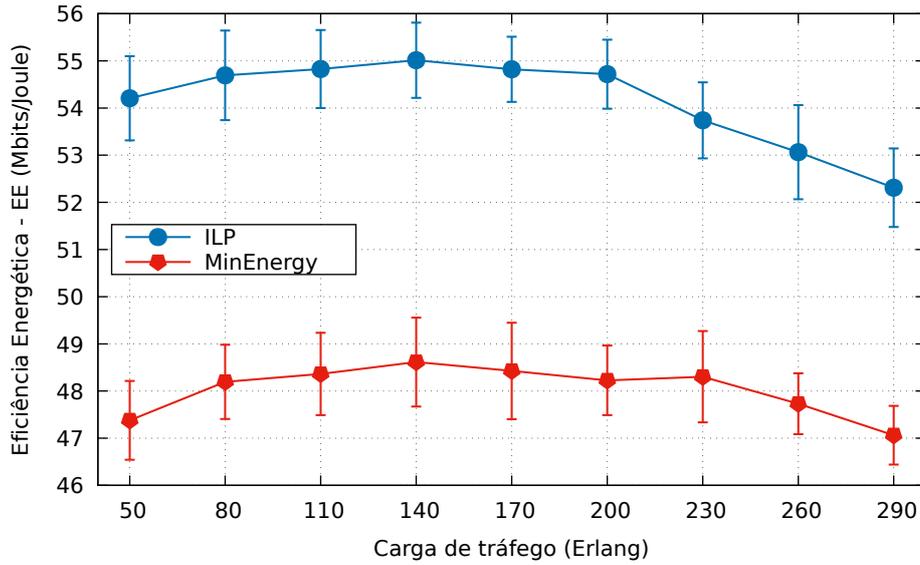


Figura 6.9: Avaliação de desempenho do modelo ILP e algoritmo heurístico AG para a Métrica EE na Topologia *6-nodes*.

A eficiência energética fornecida pelo modelo ILP é cerca de 12% maior do que a heurística *MinEnergy*, mostrando que o modelo ILP proposto na Seção 5.2.4 realmente traz benefícios significativos no gasto energético do rede.

6.5.3 Avaliação entre os Algoritmos da Literatura

Para esta avaliação, foram utilizadas as topologias USANet (Figura 4.6) e *Pacific Bell* (Figura 6.2). Foram comparados com a política *MinEnergy* proposta os algoritmos da literatura GGA+DASRA+MP [115], MBM [126], MAdap+SRNP-MVH e MAdap+SRLP-MVH [43, 63].

Taxa de bloqueio de banda (BBR)

As Figuras 6.10 e 6.11 mostram o BBR dos algoritmos considerados para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e *Pacific Bell*, respectivamente.

Observa-se que os algoritmos da literatura que obtiveram o melhor desempenho de BBR foram o MAdap+SRLP-MVH e o MAdap+SRNP-MVH em ambas as topologias. Ambos os algoritmos minimizam o número de saltos virtuais e, conseqüentemente, o número de SBVTs. No entanto, a estratégia de reserva de espectro fornecida por ambos tem um impacto significativo no desempenho. Diferentemente do que ocorre em um cenário com modulação fixa, como apresentado em [29], em um cenário com modulação adaptativa, as soluções que fazem reserva de espectro têm benefícios extraordinários no

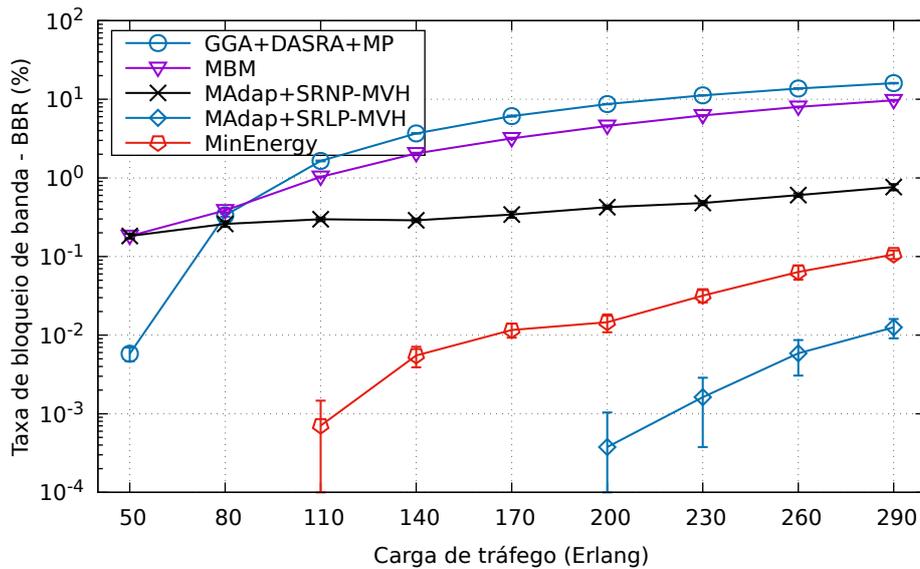


Figura 6.10: Taxa de bloqueio de banda (BBR) para Topologia USANet.

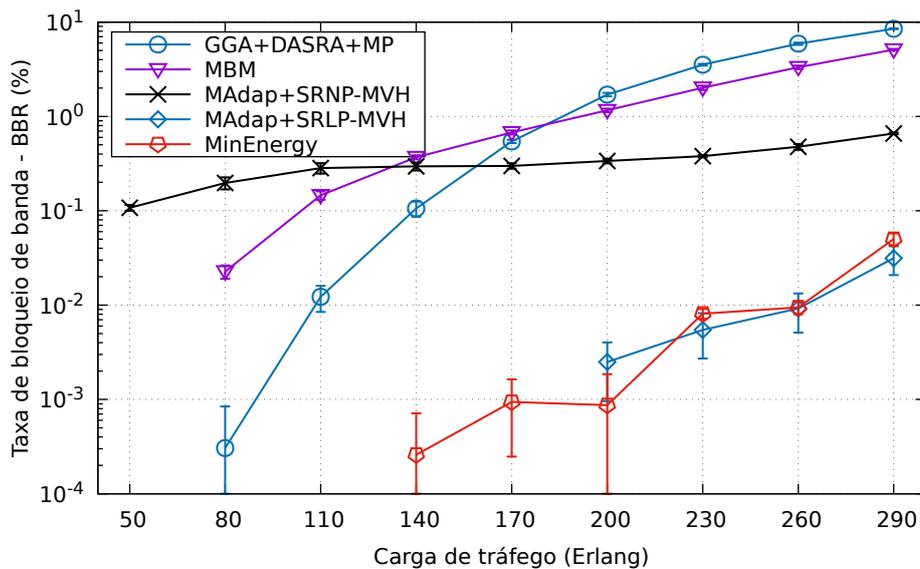


Figura 6.11: Taxa de bloqueio de banda (BBR) para Topologia *Pacific Bell*.

reuso de recursos e na preparação de tráfego, visto que há um maior aproveitamento das melhores modulações utilizando menos *slots*. Porém, como apresentado em [29], esses algoritmos subutilizam as capacidades dos transmissores, utilizando mais SBVTs, o que impacta diretamente na eficiência energética.

A política do *MinEnergy*, utilizando o modelo AG proposto, traz o equilíbrio nesse *trade-off*. A reserva de espectro não é apropriada quando o objetivo principal é a eficiência energética. Além disso, esse tipo de abordagem fornece um aumento na latência da rede,

mostrado na métrica a seguir. Pode-se observar que o MAdap+SRLP-MVH fornece a melhor taxa de bloqueio entre os algoritmos relacionados, até uma ordem de magnitude do *MinEnergy* na topologia USANet. Por outro lado, para os demais algoritmos da literatura, o *MinEnergy* traz ganhos de até duas ordens de grandeza. No caso específico do MAdap+SRNP-MVH, seu desempenho é pior porque sua política de reserva é mais restrita que o SRLP. Na topologia *Pacific Bell*, o desempenho entre os algoritmos *MinEnergy* e MAdap+SRLP-MVH foi equivalente. Isso ocorre porque a topologia é mais restrita e bloqueia as solicitações por falta de transmissores em alguns nós.

Média de saltos na topologia virtual por requisição

O número de saltos na topologia virtual indica o número de conversões OEO e processamento elétrico que são utilizados na rede. Também ajuda a ver quais soluções contribuem para redução na latência da rede, uma vez que muitos OEOs não são desejáveis. As Figuras 6.12 e 6.13 mostram o BBR dos algoritmos considerados para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e *Pacific Bell*, respectivamente.

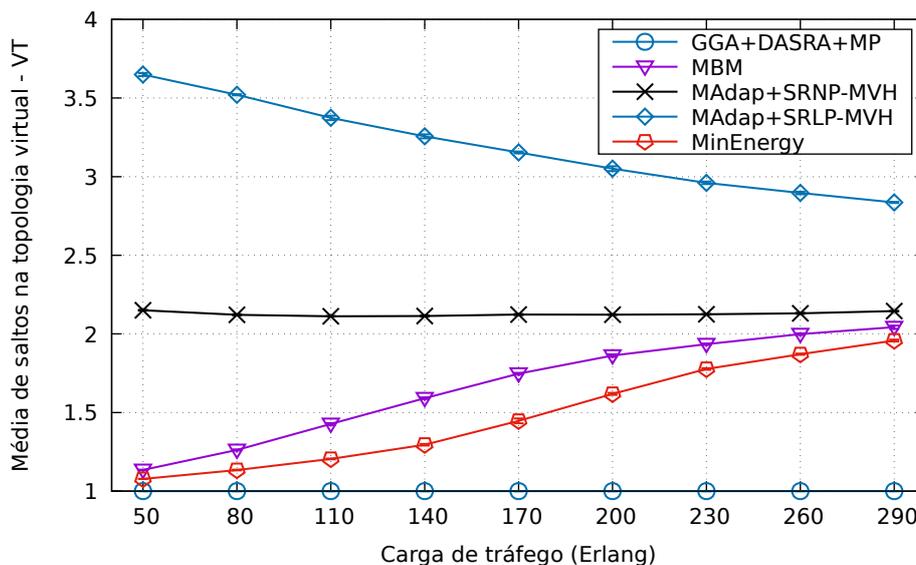


Figura 6.12: Média de saltos na topologia virtual por requisição para Topologia USANet.

Pode-se observar que as soluções que realizam reservas de espectro apresentam o maior número de saltos virtuais por solicitação. A média de saltos virtuais do MAdap+SRLP-MVH e do MAdap+SRNP-MVH permanece entre 2,2 a 3,5 saltos por solicitação, em ambas as topologias. Isso demonstra que a maioria das solicitações foi atendida com mais de um SBVT. Isso prejudica o desempenho da latência devido ao alto número de conversões OEO [126]. Para os algoritmos MBM e *MinEnergy*, os saltos médios são sempre

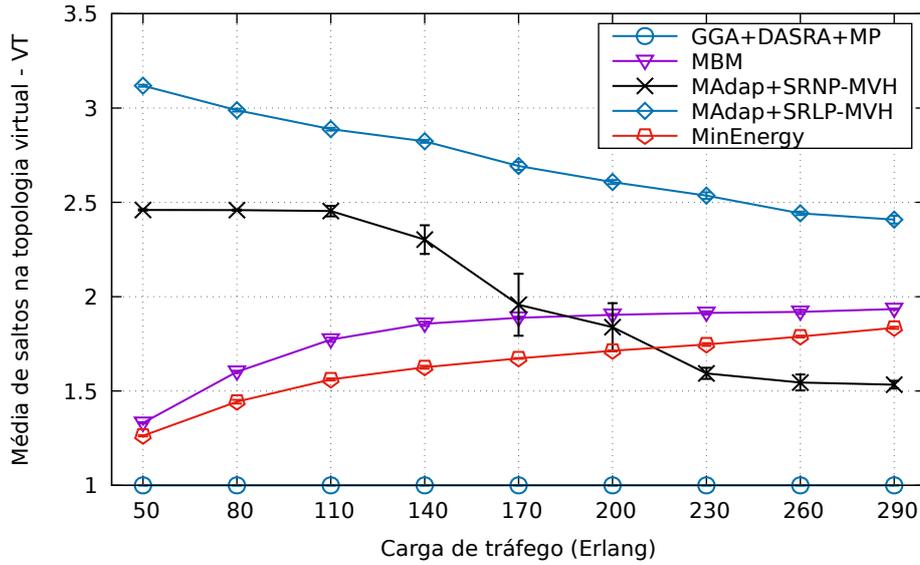


Figura 6.13: Média de saltos na topologia virtual por requisição para Topologia *Pacific Bell*.

inferiores a 2, um ganho de até 53% em comparação com os algoritmos que utilizam esquemas de reserva. O *MinEnergy* ainda fornece um ganho de até 17% em comparação com o MBM. Para o algoritmo GGA+DASRA+MP, os valores apresentados nesta métrica fixam em 1, pois o algoritmo implementa um roteamento transparente, neste caso, a solução utilizará apenas um caminho óptico fim-a-fim.

Eficiência Energética Efetiva

Por fim, a métrica de eficiência energética efetiva da rede, mencionada na Seção 2.7.8, representa o *trade-off* entre a eficiência energética (Equação 2.14) e a eficiência da rede em termos de bloqueio de banda (BBR). Valores mais altos significam abordagens mais eficientes. As Figuras 6.14 e 6.15 mostram o BBR dos algoritmos considerados para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e *Pacific Bell*, respectivamente.

Observa-se que com exceção do algoritmo GGA+DASRA+MP, o *MinEnergy* apresenta os melhores resultados em eficiência energética frente aos algoritmos comparados. O ganho em comparação com o algoritmo MAdap+SRLP-MVH é de até 51% para cargas mais baixas. O ganho médio sobre os demais algoritmos é de cerca de 10% na USANet e 17% na *Pacific Bell*.

Em comparação com o algoritmo GGA+DASRA+MP, o *MinEnergy* é cerca de 1% pior na USANet e 10% na *Pacific Bell*. Isso porque esse algoritmo possui um roteamento *single-hop*, que por sua vez, permite um baixo uso de transmissores e, conseqüentemente,

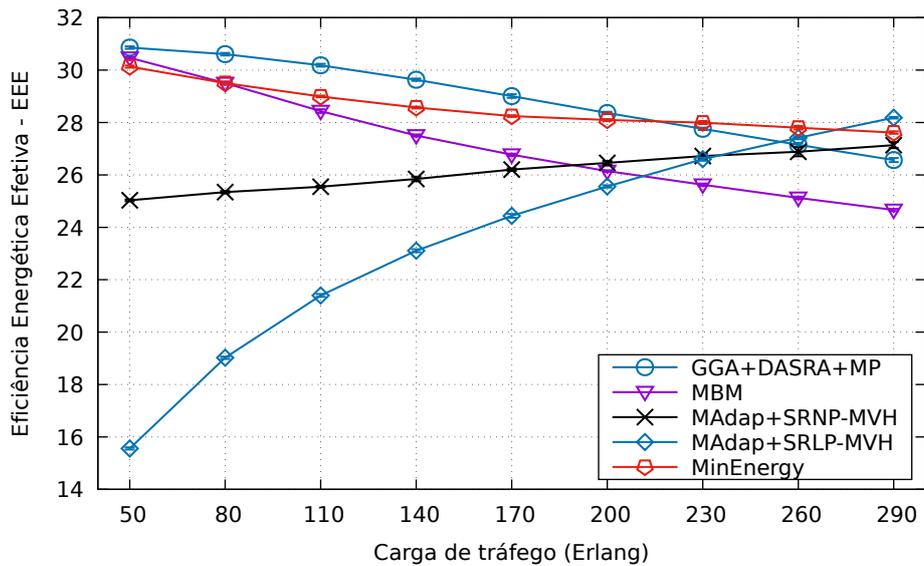


Figura 6.14: Eficiência Energética Efetiva para Topologia USANet.

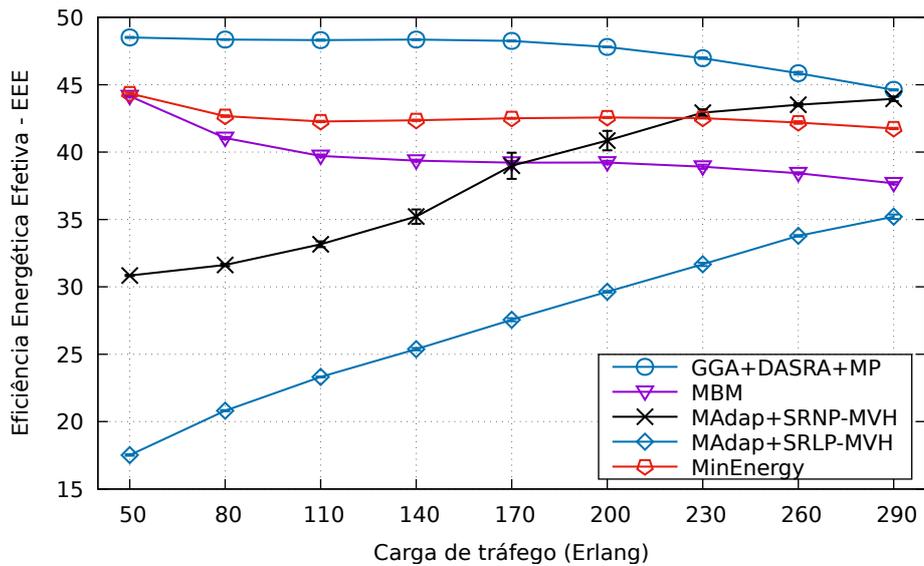


Figura 6.15: Eficiência Energética Efetiva para Topologia *Pacific Bell*.

baixo consumo de energia. Porém, seu desempenho BBR é um dos piores, o que torna inviável sua aplicação em redes reais.

6.6 Resumo Conclusivo

A eficiência energética nas EONs vem ganhando cada vez mais relevância na academia devido a sua grande flexibilidade nas operações de engenharia de tráfego. Contudo, ex-

plorar todas as características da arquitetura EON e suas possibilidades de engenharia de tráfego não é uma tarefa trivial. Promover uma eficiência energética eficiente sem sacrificar o desempenho da rede é complexo e envolve uma série de compensações entre os recursos disponíveis na resolução do problema RMLSA.

Para resolver esse problema, este capítulo investigou o problema RMLSA translúcido dinâmico com técnicas de agregação de tráfego elétrico e óptico (EG e OG). Para isso, foi proposto um modelo de grafo auxiliar inovador para resolver o problema RMLSA e fornecer uma eficiência energética sem sacrificar o desempenho da EON.

A proposta amplia os recentes trabalhos da literatura utilizando técnicas de EG e OG com modulação adaptativa (AMLA) em um cenário translúcido. De acordo com o conhecimento deste autor, este é o primeiro trabalho a propor um algoritmo heurístico com todas essas características. O grafo auxiliar proposto permite a utilização de diferentes políticas de engenharia de tráfego através da ponderação de suas arestas.

Também foram propostas e avaliadas três políticas de engenharia de tráfego, baseadas na eficiência energética, para utilização no grafo auxiliar proposto. A primeira política baseia-se na redução do número de SBVTs na rede, a segunda baseia-se na maximização da agregação de tráfego e a última foca no balanceamento dos recursos disponíveis para a minimização do gasto energético da rede.

Para avaliar o gráfico auxiliar proposto, foram comparadas quatro soluções da literatura, considerando várias métricas, em duas topologias de rede. Comparações abrangentes também foram realizadas entre o modelo ILP proposto no Capítulo 5 e a melhor política de eficiência energética proposta (*MinEnergy*).

As avaliações numéricas mostraram que a política *MinEnergy* encontra a compensação apropriada em termos de eficiência energética e desempenho de bloqueio da rede. Os resultados de simulação mostraram que seu uso é capaz de atingir um ganho médio de até duas ordens de grandeza na relação de bloqueio de largura de banda, alcançando ganhos de até 51% na eficiência energética da rede. Isso demonstra que a utilização do modelo de gráfico auxiliar proposto, com o ajuste adequado dos pesos das arestas, em conformidade com as abordagens *Sleep Mode*, reduz o gasto de energia na rede sem sacrificar o desempenho do bloqueio.

Capítulo 7

Considerações Finais

As tecnologias de rede óptica vem sendo estudadas há bastante tempo pela academia e a indústria, diferentes abordagens têm sido propostas para a melhoria do seu desempenho. Devido ao rápido crescimento do tráfego da Internet, novas estratégias de roteamento e protocolos vem sendo constantemente exploradas para tornar a rede óptica mais eficiente [19]. A literatura vem investigando novas tecnologias de atribuição de comprimento de onda e agregação de tráfego para aumentar a capacidade da rede [20]. Embora as tecnologias das redes ópticas sejam exploradas há algum tempo, sua concepção acerca da eficiência energética é recente [22]. Pesquisas estão sendo desenvolvidas, principalmente impulsionadas pelo fator econômico e questões ambientais [29].

No contexto operacional das redes de núcleo óptico, a energia é principalmente consumida em equipamentos de transmissão e comutação da rede. Para reduzir o consumo energético destas redes é necessário propor abordagens que orquestrem adequadamente como estes equipamentos serão utilizados no seu projeto e operação [3, 22, 20, 27].

O novo paradigma de Redes Ópticas Elásticas (EON) trouxe novas perspectivas para o consumo eficiente destes recursos. O problema de roteamento e alocação de espectro com modulação adaptativa (RMLSA) é o principal problema estudado na literatura EON. Assim como acontece com as redes tradicionais WDM, as abordagens de agregação de tráfego elétrico em EON são aplicadas para reduzir o consumo de energia da rede, desligando dispositivos, e conseqüentemente, diminuindo o número de canais ativos dentro dos enlaces [1]. Nas EONs, um novo tipo de agregação de tráfego é considerado, a agregação óptica. Neste tipo de agregação, múltiplos fluxos ópticos de uma mesma fonte para destinos diferentes podem ser agregados em um mesmo transmissor [45, 43].

A agregação óptica, associado a agregação elétrica e à modulação adaptativa dos canais EON, oferece inúmeras possibilidades de alocação na engenharia de tráfego. Coordenar todos esses recursos e encontrar a melhor solução em termos de eficiência energética e desempenho de rede é o problema estudado nesta **Tese**. É importante explorar todo o

potencial da flexibilidade fornecida pelas EONs ao lidar com todos estas características mencionadas.

Neste contexto, esta **Tese** abordou o problema RMLSA no contexto da eficiência energética em EONs. Seu objetivo foi pesquisar e propor abordagens que proporcione eficiência energética para redes ópticas de núcleo no contexto operacional. Para isso, foram propostos três estudos que abordam diferentes aspectos do problema relativo à eficiência energética em EON.

No Capítulo 4 foi estudado o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA) para EONs sem técnicas de agregação. Foi desenvolvido um modelo para solucionar o problema RMLSA através do uso de um esquema de modulação adaptativa inovador que permite a utilização de qualquer abordagem RSA clássica para resolver o problema RMLSA. O esquema proposto, denominado *DMMAS*, amplia as propostas dos trabalhos de [59] e [119] adicionando uma atribuição dinâmica para o uso do roteamento *multihop* por meio do índice de fragmentação da rede. O estudo ainda propõe um mecanismo de *Energy-Aware* que utiliza níveis de modulação mais eficientes espectralmente com o intuito de utilizar menos espectro e economizar energia. Os resultados de simulação mostraram que o *DMMAS* alcança uma redução na taxa de bloqueio de banda (BBR) de até duas ordens de grandeza em um cenário de rede sub carregado e até 86% em cargas mais altas em relação às demais abordagens da literatura. Além disso, o *DMMAS* proporcionou um ganho de até 40% na eficiência energética.

No Capítulo 5 uma nova perspectiva para o problema RMLSA foi investigada no contexto das redes SBVT-EONs. Neste cenário, explorar todo o potencial flexível fornecido pelas EONs é um problema desafiador e complexo. Para isso, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira que leva em consideração todas as características da arquitetura SLICE e técnicas de engenharia de tráfego EON para resolver o problema RMLSA dinâmico com eficiência energética. Para oferecer uma compreensão mais didática, foi apresentada a evolução do modelo final em três etapas. Para isso, foram propostos três modelos ILP. O primeiro modela o problema RMLSA para redes transparentes, o segundo para redes translúcidas e o último para redes translúcidas com agregação de tráfego elétrico e óptico. Os resultados de simulação mostraram que os modelos ILP propostos moldam o problema RMLSA de modo adequado embora sua escalabilidade não seja aplicável em um cenário de rede mais complexo. Foram ainda avaliadas algumas métricas de desempenho em relação a algoritmos heurísticos da literatura. Os resultados apresentam uma excelente desempenho na taxa de bloqueio de banda com uma eficiência energética até 10% maior que as heurísticas da literatura.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta um algoritmo heurístico para resolução do problema RMLSA translúcido dinâmico com técnicas de agregação de tráfego elétrico e óptico (EG

e OG). A proposta baseia-se em um modelo de grafo auxiliar para resolver o problema RMLSA e fornecer eficiência energética sem sacrificar o desempenho da EON. A proposta amplia os recentes trabalhos da literatura utilizando técnicas de EG e OG com modulação adaptativa (AMLA) em um cenário translúcido. O estudo ainda propõe três políticas de engenharia de tráfego, baseadas na eficiência energética, para utilização no grafo auxiliar proposto. Os resultados de simulação mostraram que a proposta encontra uma compensação apropriada em termos de eficiência energética e desempenho da taxa de bloqueio de banda na rede em relação às soluções da literatura. Os ganhos médios apresentados alcançam até duas ordens de grandeza no BBR e até 51% na eficiência energética da rede.

O estudo apresentado no Capítulo 4 concluiu que deve-se levar em consideração o cenário de rede na relação custo benefício entre número de saltos virtuais e eficiência energética. No Capítulo 5 conclui-se que os modelos ILPs propostos apresentam um ajuste adequado no uso dos recursos da rede embora sua escalabilidade não seja adequada para a execução em cenários de rede mais complexos. Por fim, o Capítulo 6 concluiu que com o ajuste correto das políticas de eficiência energética pode-se alcançar um alto desempenho na taxa de bloqueio de banda sem sacrificar a eficiência energética da rede.

Todos os estudos apresentados nesta **Tese** tiveram como característica principal propor abordagens que proporcionem eficiência energética na resolução do problema RMLSA em EONs.

7.1 Trabalhos Futuros

São propostos uma série de trabalhos futuros para cada estudo apresentado nesta Tese. Como continuidade da pesquisa apresentada no Capítulo 4, propõe-se explorar os impactos da camada física em relação ao QoT das soluções RMLSAs. Resultados preliminares do autor desta Tese [64, 68] mostraram que as distâncias de alcance transparente dos níveis de modulação adotados pela literatura são superdimensionados. A exploração destes fatores podem contribuir para a elaboração de técnicas mais eficientes no desenvolvimento de soluções de engenharia de tráfego das redes de núcleo.

Em relação ao estudo apresentado no Capítulo 5, a continuidade da pesquisa envolverá a ampliação dos modelos propostos para o problema RMLSA, levando em consideração os impactos da camada física e seus efeitos não lineares. Além disso, os modelos ILPs desenvolvidos nesta Tese poderão servir como base para a implementação de outros modelos. Em relação ao estudo apresentado no Capítulo 6, pretende-se ampliar o modelo proposto para o problema de alocação de espectro e núcleo com modulação adaptativa (RMSCA) para redes SDM-EONs [141, 142, 143]. De forma geral, propõe-se explorar melhor os impactos da camada física em relação ao QoT das soluções RMSCAs, ampli-

ando os modelos ILPs e as heurísticas propostas por meio da contemplação dos efeitos não lineares da camada física, tais como, o cálculo do limiar de SNR na fibra óptica.

Referências

- [1] Dharmaweera, M. N., R. Parthiban e Y. A. Sekercioglu: *Toward a power-efficient backbone network: The state of research*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 17(1):198–227, 2015. 1, 2, 6, 141
- [2] bp: *BP Statistical Review of World Energy*. Relatório Técnico 68th Edition, bp Statistical Review of World Energy, June 2019. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. 1
- [3] Zhang, Y., P. Chowdhury, M. Tornatore e B. Mukherjee: *Energy efficiency in telecom optical networks*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 12(4):441–458, 2010. 1, 4, 5, 141
- [4] Adams, W.M.: *The future of sustainability re-thinking environment and development in the twenty-first century*. Relatório Técnico, Report of the IUCN Renowned Thinkers Meeting, May 2006. 1
- [5] The Climate Group: *SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*. Relatório Técnico, GeSI - Global e-Sustainability Initiative, 2008. <http://gesi.org/article/43>. 1, 2
- [6] Andrae, Anders: *New perspectives on internet electricity use in 2030*. Engineering and Applied Science Letters, 3:19–31, junho 2020. 1, 3, 5
- [7] Andrae, A.S.G. e T. Edler: *On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030*. Challenges 2015, 6:117–157, 2015. 2
- [8] Leisching, P. e P. Pickavet: *Energy footprint of ICTs: Forecasts and network solutions*. Em *Proc. of OFC/NFOEC, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions*, San Diego, USA, Mar 2009. 2
- [9] Andrae, Anders e Peter M Corcoran: *Emerging trends in electricity consumption for consumer ICT*. Relatório Técnico, ARAN - Access to Research at NUI Galway, 2013. <http://hdl.handle.net/10379/3563>. 2
- [10] Weldon, M. K.: *The future X network: a Bell Labs perspective*. CRC press, 2016. 2
- [11] Saleh, A A M e Jane M. Simmons: *Technology and architecture to enable the explosive growth of the internet*. IEEE Communications Magazine, 49(1):126–132, January 2011, ISSN 0163-6804. 3

- [12] Cisco: *The Zettabyte Era - Trends and Analysis*. Cisco Visual Networking Index (VNI) Forecast, June 2017. [OnLine] in <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>. 3
- [13] Cisco: *Cisco annual internet report (2018–2023) white paper*. Technica report, Cisco, March 2020. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>. 3
- [14] Vizcaíno, J. L., Y. Ye e I. T. Monroy: *Energy efficiency analysis for dynamic routing in optical transport networks*. Em *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 3009–3014, June 2012. 3, 5, 42, 44, 48, 53, 117
- [15] Lindstrom, Perry: *Eia projects global energy-related co2 emissions will increase through 2050*. Relatório Técnico, EIA - U.S. Energy Information Administration, 2019. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41493>. 4
- [16] Andrae, Anders: *Hypotheses for primary energy use, electricity use and co2 emissions of global computing and its shares of the total between 2020 and 2030*. WSEAS Transactions on Power Systems, 15:50–59, março 2020. 4
- [17] eia: *Short-term energy outlook*. Relatório Técnico, EIA - U.S. Energy Information Administration, November 2020. https://www.eia.gov/outlooks/steo/pdf/steo_full.pdf. 4
- [18] Mukherjee, B.: *Optical WDM Networks*. 1935-3839. Springer US, 2006, ISBN 978-1-4899-7883-7. 4
- [19] Chatterjee, B.C., N. Sarma e E. Oki: *Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 17(3):1776–1800, thirdquarter 2015, ISSN 1553-877X. 4, 6, 16, 40, 41, 42, 84, 89, 95, 141
- [20] Imran, M., P. M. Anandarajah, A. Kaszubowska-Anandarajah, N. Sambo e L. Potí: *A survey of optical carrier generation techniques for terabit capacity elastic optical networks*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 20(1):211–263, Firstquarter 2018, ISSN 1553-877X. 4, 5, 21, 141
- [21] Wu, J., Z. Ning e L. Guo: *Energy-efficient survivable grooming in software-defined elastic optical networks*. IEEE Access, 5:6454–6463, 2017. 4, 48, 55, 80, 82
- [22] Idzikowski, F., L. Chiaraviglio, A. Cianfrani, J. López Vizcaíno, M. Polverini e Y. Ye: *A survey on energy-aware design and operation of core networks*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 18(2):1453–1499, Secondquarter 2016, ISSN 1553-877X. 4, 5, 6, 20, 57, 77, 118, 141
- [23] Thyagaturu, A. S., A. Mercian, M. P. McGarry, M. Reisslein e W. Kellerer: *Software Defined Optical Networks (SDONs): A Comprehensive Survey*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 18(4):2738–2786, Fourthquarter 2016, ISSN 1553-877X. 5

- [24] Tanenbaum, Andrew S. e David J. Wetherall: *Computer Networks*. Prentice Hall Press, USA, 5th edição, 2010, ISBN 0132126958. 5
- [25] Ibrahimi, M., O. Ayoub, O. Karandin, F. Musumeci, A. Castoldi, R. Pastorelli e M. Tornatore: *Qot-aware optical amplifier placement in filterless metro networks*. IEEE Communications Letters, 25(3):931–935, 2021. 5
- [26] Zhang, Ya, Xu Zhou, Ning Deng, Sanjay K. Bose e Gangxiang Shen: *Exploiting efficiency of ultra-dense wavelength switched network for carrying metro network traffic*. Photonic Network Communications, 37, 2019, ISSN 1572-8188. 5
- [27] Vizcaíno, Jorge López, Yabin Ye e Idelfonso Tafur Monroy: *Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks*. Computer Networks, 56(10):2400 – 2419, 2012, ISSN 1389-1286. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128612001053>, Green communication networks. 5, 48, 53, 141
- [28] Nag, A., T. Wang e B. Mukherjee: *Robust design of spectrum-efficient green optical backbone networks*. Journal of Lightwave Technology, 31(7):1138–1144, April 2013, ISSN 0733-8724. 6, 48, 49, 79, 82, 117
- [29] Costa, Lucas e André C Drummond: *Achieving energy efficiency and performance with auxiliary graph model in elastic optical networks*. Em *2019 IEEE Global Communications Conference: Optical Networks and Systems (Globecom2019 ONS)*, Waikoloa, USA, dezembro 2019. 6, 22, 46, 108, 117, 120, 121, 124, 135, 136, 141
- [30] Khumalo, P. e B. Nleya: *Sleep-mode/traffic grooming versus device reliability overview*. Em *2018 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, páginas 1–5, 2018. 6
- [31] Elmirghani, J. M. H., T. Klein, K. Hinton, L. Nonde, A. Q. Lawey, T. E. H. El-Gorashi, M. O. I. Musa e X. Dong: *Greentouch greenmeter core network energy-efficiency improvement measures and optimization*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 10(2):A250–A269, 2018. 6
- [32] Heddeghem, W. Van, F. Idzikowski, E. Le Rouzic, J. Y. Mazeas, H. Poignant, S. Salaun, B. Lannoo e D. Colle: *Evaluation of power rating of core network equipment in practical deployments*. Em *2012 IEEE Online Conference on Green Communications (GreenCom)*, páginas 126–132, Sept 2012. 6
- [33] Tomkos, I, S. Azodolmolky, J. Sole-Pareta, D. Careglio e E. Palkopoulou: *A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges*. Proceedings of the IEEE, 102(9):1317–1337, Sept 2014, ISSN 0018-9219. 6, 7, 13, 37, 38, 117
- [34] Christodoulopoulos, K., I Tomkos e E.A Varvarigos: *Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks*. Journal of Lightwave Technology, 29(9):1354–1366, May 2011, ISSN 0733-8724. 7, 16, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 37, 57, 59, 78, 82

- [35] Wu, Ying, Weigang Hou, Lei Guo, Yejun Liu e Zhimin Sun: *Green grooming in elastic optical networks*. Em *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014*, páginas 1–3, March 2014. 7, 48, 51, 80, 82, 120
- [36] Sambo, N., A. D’Errico, C. Porzi, V. Vercesi, M. Imran, F. Cugini, A. Bogoni, Potì L. e P. Castoldi: *Sliceable transponder architecture including multiwavelength source*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 6(7):590–600, July 2014, ISSN 1943-0620. 7, 18
- [37] Jinno, M., H. Takara, B. Kozicki, Yukio Tsukishima, Y. Sone e S. Matsuoka: *Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies*. *IEEE Communications Magazine*, 47(11):66–73, November 2009, ISSN 0163-6804. 13, 15, 16, 18, 21, 24, 30
- [38] Gerstel, O., M. Jinno, A Lord e S. J. B. Yoo: *Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?* *IEEE Communications Magazine*, 50(2):s12–s20, February 2012, ISSN 0163-6804. 15, 21
- [39] Zhang, G., M. De Leenheer, A. Morea e B. Mukherjee: *A survey on OFDM-based elastic core optical networking*. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(1):65–87, First 2013, ISSN 1553-877X. 16, 18, 21, 22, 23, 38, 41, 42
- [40] Yonenaga, K., F. Inuzuka, Shuto Yamamoto, H. Takara, B. Kozicki, T. Yoshimatsu, Atsushi Takada e M. Jinno: *Bit-rate-flexible all-optical OFDM transceiver using variable multi-carrier source and dqpsk/dpsk mixed multiplexing*. Em *OFC 2009. Conference on Optical Fiber Communication - includes post deadline papers*, páginas 1–3, March 2009. 16
- [41] Jinno, M., H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga e A. Hirano: *Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking*. *IEEE Communications Magazine*, 50(5):56–65, May 2012, ISSN 0163-6804. 16
- [42] Lopez, V., O. Gonzalez de Dios, O. Gerstel, N. Amaya, G. Zervas, D. Simeonidou e J.P. Fernandez-Palacios: *Target cost for sliceable bandwidth variable transponders in a real core network*. Em *2013 Future Network and Mobile Summit (FutureNetworkSummit)*, páginas 1–9, July 2013. 16
- [43] Zhang, J., Y. Ji, M. Song, Y. Zhao, X. Yu, J. Zhang e B. Mukherjee: *Dynamic traffic grooming in sliceable bandwidth-variable transponder-enabled elastic optical networks*. *Journal of Lightwave Technology*, 33(1):183–191, Jan 2015, ISSN 0733-8724. 16, 29, 30, 114, 118, 119, 120, 121, 127, 128, 129, 135, 141
- [44] Zhu, M., Q. Sun, S. Zhang, P. Gao, B. Chen e J. Gu: *Energy-aware virtual optical network embedding in sliceable-transponder-enabled elastic optical networks*. *IEEE Access*, 7:41897–41912, 2019. 16, 48, 52, 81, 82
- [45] Zhang, G., M. De Leenheer e B. Mukherjee: *Optical traffic grooming in OFDM-based elastic optical networks [invited]*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(11):B17–B25, Nov 2012, ISSN 1943-0620. 16, 30, 31, 79, 82, 104, 123, 141

- [46] Lopez, V., B. de la Cruz, O. Gonzalez de Dios, O. Gerstel, N. Amaya, G. Zervas, D. Simeonidou e J.P. Fernandez-Palacios: *Finding the target cost for sliceable bandwidth variable transponders*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 6(5):476–485, May 2014, ISSN 1943-0620. 18
- [47] Zhang, Jiawei, Yongli Zhao, Xiaosong Yu, Jie Zhang, Mei Song, Yuefeng Ji e Biswanath Mukherjee: *Energy-efficient traffic grooming in sliceable-transponder-equipped ip-over-elastic optical networks invited*. J. Opt. Commun. Netw., 7(1):A142–A152, Jan 2015. <http://jocn.osa.org/abstract.cfm?URI=jocn-7-1-A142>. 18, 48, 51, 80, 82
- [48] Strasser, T.A. e J.L. Wagener: *Wavelength-selective switches for roadm applications*. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 16(5):1150–1157, Sept 2010, ISSN 1077-260X. 18
- [49] Amaya, N., I. Muhammad, G.S. Zervas, R. Nejabati, D. Simeonidou, Y.R. Zhou e A. Lord: *Experimental demonstration of a gridless multi-granular optical network supporting flexible spectrum switching*. Em 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), páginas 1–3, March 2011. 18
- [50] Gringeri, S., B. Basch, V. Shukla, R. Egorov e T.J. Xia: *Flexible architectures for optical transport nodes and networks*. IEEE Communications Magazine, 48(7):40–50, July 2010, ISSN 0163-6804. 19
- [51] Jinno, M., B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka e A. Hirano: *Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]*. IEEE Communications Magazine, 48(8):138–145, August 2010, ISSN 0163-6804. 20, 22, 23
- [52] Monteiro, Neclyeux S., Alexandre C. Fontinele, Divanilson R. Campelo e André Soares: *Provision of adaptive guard band in elastic optical networks*. Journal of Internet Services and Applications, 11, 2020. 20
- [53] Najji, A, Belal Hamida, Cheng San, Mohd Adzir Mahdi, Sulaiman Wadi Harun, S Khan, W Al-Khateeb, A. Zaidan, Bilal Bahaa e H. Ahmad: *Review of erbium-doped fiber amplifier*. International Journal of Physical Sciences, 6, setembro 2011. 20
- [54] Yucel, Murat e Zühal Aslan Akyol: *The noise figure and gain improvement of double-pass c-band edfa*. Microwave and Optical Technology Letters, 55, novembro 2013. 20
- [55] Shieh, W., H. Bao e Y. Tang: *Coherent optical OFDM: theory and design*. pt. Express, 16:841–859, 2008. 21
- [56] Shen, Gangxiang e Qi Yang: *From coarse grid to mini-grid to gridless: How much can gridless help contentionless?* Em 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), páginas 1–3, March 2011. 21

- [57] ITU-T: *Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid*. Recommendation G.694.1, International Telecommunication Union–Telecommunication Standardization Sector (ITU-T), February 2012. 21
- [58] Nag, A., M. Tornatore e B. Mukherjee: *Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats*. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4):466–475, Feb 2010, ISSN 0733-8724. 21, 22
- [59] Costa, L. R. e A. C. Drummond: *New distance-adaptive modulation scheme for elastic optical networks*. *IEEE Communications Letters*, 21(2):282–285, Feb 2017, ISSN 1089-7798. 22, 57, 58, 60, 61, 63, 64, 67, 71, 72, 76, 142
- [60] Bocoi, A., M. Schuster, Franz Rambach, M. Kiese, C. A. Bunge e B. Spinnler: *Reach-dependent capacity in optical networks enabled by ofdm*. Em *Conference on Optical Fiber Communication (OFC) - includes post deadline papers*, páginas 1–3, March 2009. 22, 23
- [61] Klekamp, A., O. Rival, A. Morea, Roman Dischler e F. Buchali: *Transparent wdm network with bitrate tunable optical OFDM transponders*. Em *Conference on Optical Fiber Communication (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, páginas 1–3, March 2010. 22
- [62] Liu, Xiang, S. Chandrasekhar, Benyuan Zhu, P.J. Winzer, A.H. Gnauck e D.W. Peckham: *448-gb/s reduced-guard-interval CO-OFDM transmission over 2000 km of ultra-large-area fiber and five 80-ghz-grid roadms*. *Journal of Lightwave Technology*, 29(4):483–490, Feb 2011, ISSN 0733-8724. 22
- [63] Wan, Xin, Lei Wang, Nan Hua, Hanyi Zhang e Xiaoping Zheng: *Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks*. Em *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, páginas 1–3, March 2011. 22, 37, 54, 58, 59, 107, 127, 135
- [64] Costa, Lucas, Ítalo Barbosa Brasileiro e André C Drummond: *Low margin qot-aware rmlsa with circuit invigoration in elastic optical networks*. Em *2020 IEEE Global Communications Conference: Optical Networks and Systems (Globecom2020 ONS)*, Taipei, Taiwan, dezembro 2020. 23, 34, 56, 143
- [65] Ding, Hui, Min Zhang, Byrav Ramamurthy, Zhuo Liu, Shanguo Huang e Xue Chen: *Routing, modulation level and spectrum allocation with dynamic modulation level conversion in elastic optical networks*. *Photonic Network Communications*, 28(3):295–305, 2014, ISSN 1387-974X. <http://dx.doi.org/10.1007/s11107-014-0453-3>. 23
- [66] Wan, Xin, Nan Hua e Xiaoping Zheng: *Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(8):603–613, Aug 2012, ISSN 1943-0620. 23, 59, 60, 61, 67, 76, 79, 82, 84, 89, 95

- [67] Fontinele, Alexandre, Iallen Santos, Juarez Nolêto Neto, Divanilson R. Campelo e André Soares: *An Efficient IA-RMLSA Algorithm for Transparent Elastic Optical Networks*. *Computer Networks*, 118:1–14, 2017, ISSN 13891286. 23, 34
- [68] Costa, Lucas, Ítalo Brasileiro e André Drummond: *Novo RMLSA com Tonificação de Circuito e ciente da Qualidade de Transmissão com Baixa Margem em Redes ópticas Elásticas*. Em *SBRC 2020*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, dec 2020. 23, 56, 143
- [69] Christodoulopoulos, K., I. Tomkos e E.A. Varvarigos: *Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation*. Em *2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, páginas 1–6, Dec 2010. 24
- [70] Zhang, Yongjun, Jingjie Xin, Xin Li e Shanguo Huang: *Overview on routing and resource allocation based machine learning in optical networks*. *Optical Fiber Technology*, 60:102355, 2020, ISSN 1068-5200. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S106852002030345X>. 26, 27
- [71] Cormen, Thomas H., Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest e Clifford Stein: *Introduction to Algorithms*. The MIT Press, 2^a edição, 2001. 26, 27
- [72] Wang, Y., X. Cao e Y. Pan: *A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks*. Em *2011 Proceedings IEEE INFOCOM*, páginas 1503–1511, April 2011. 27, 78, 82
- [73] Zheng, W., Y. Jin, W. Sun, W. Guo e W. Hu: *On the spectrum-efficiency of bandwidth-variable optical ofdm transport networks*. Em *2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference*, páginas 1–3, 2010. 28
- [74] Zhang, S., C. Martel e B. Mukherjee: *Dynamic traffic grooming in elastic optical networks*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(1):4–12, January 2013, ISSN 0733-8716. 28, 29, 118, 119, 120, 121
- [75] Zhang, Yi, Xiaoping Zheng, Qingshan Li, Nan Hua, Yanhe Li e Hanyi Zhang: *Traffic grooming in spectrum-elastic optical path networks*. Em *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, páginas 1–3, March 2011. 29
- [76] Gerstel, O. A.: *Flexible use of spectrum and photonic grooming*. Em *Silicon and Nanophotonics and Photonics in Switching Integrated Photonics Research*. OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America), paper PMD3, 2010. 30
- [77] Kozicki, B., H. Takara, T. Yoshimatsu, K. Yonenaga e M. Jinno: *Filtering characteristics of highly-spectrum efficient spectrum-sliced elastic optical path (slice) network*. Em *OFC 2009. Conference on Optical Fiber Communication - includes post deadline papers*, páginas 1–3, March 2009. 30

- [78] Dischler, Roman, F. Buchali e A. Klekamp: *Demonstration of bit rate variable roadm functionality on an optical OFDM superchannel*. Em *2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, páginas 1–3, March 2010. 30
- [79] Fan, Z., Y. Qiu e Chun Kit Calvin Chan: *Dynamic multipath routing with traffic grooming in OFDM-based elastic optical path networks*. *Journal of Lightwave Technology*, PP(99):1–1, 2015, ISSN 0733-8724. 30, 31, 35
- [80] Plander, Ivan e Michal Stepanovsky: *Mems optical switch: Switching time reduction*. *Open Computer Science*, 6(1):116 – 125, 01 Jan. 2016. <https://www.degruyter.com/view/journals/comp/6/1/article-p116.xml>. 33
- [81] Zhu, Keyao e B. Mukherjee: *Traffic grooming in an optical wdm mesh network*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(1):122–133, Jan 2002, ISSN 0733-8716. 34
- [82] Alvizu, R., J. Valencia e G. Maier: *Multipath optical routing with compact fiber delay line-based differential delay compensation*. Em *2016 21st European Conference on Networks and Optical Communications (NOC)*, páginas 58–63, June 2016. 35
- [83] Klinkowski, M. e K. Walkowiak: *Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network*. *IEEE Communications Letters*, 15(8):884–886, August 2011, ISSN 1089-7798. 37
- [84] Zhou, Bin, Mostafa A. Bassiouni e Guifang Li: *Routing and wavelength assignment in optical networks using logical link representation and efficient bitwise computation*. *Photonic Network Communications*, 10, 2005. 37
- [85] Chatterjee, B. C., S. Ba e E. Oki: *Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey*. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(1):183–210, 2018. 38
- [86] Rosa, A., C. Cavdar, S. Carvalho, J. Costa e L. Wosinska: *Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks*. Em *2012 9th International Conference on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET)*, páginas 242–246, Dec 2012. 39
- [87] Horota, André K., Gustavo B. Figueiredo e Nelson L. S. da Fonseca: *Algoritmo de roteamento e atribuição de espectro com minimização de fragmentação em redes Ópticas elásticas*. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 32:895–908, 2014. 39
- [88] Wright, P., M. C. Parker e A. Lord: *Minimum- and maximum-entropy routing and spectrum assignment for flexgrid elastic optical networking [invited]*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 7(1):A66–A72, Jan 2015, ISSN 1943-0620. 39, 64
- [89] Shannon, C.E.: *Communication in the presence of noise*. *Proceedings of the IEEE*, 86(2):447–457, Feb 1998, ISSN 0018-9219. 39

- [90] Bouillet, Eric, Georgios Ellinas, Jean Francois Labourdette e Ramu Ramamurthy: *Path Routing in Mesh Optical Networks*. Online Library Wiley, 2007. 41
- [91] Weston-Dawkes, J.: *Calculating availability bounds in complex systems and ip network topologies*. Em *OFC 2014*, páginas 1–3, 2014. 41
- [92] Sone, Y., A. Watanabe, Wataru Imajuku, Yukio Tsukishima, B. Kozicki, H. Takara e M. Jinno: *Highly survivable restoration scheme employing optical bandwidth squeezing in spectrum-sliced elastic optical path (slice) network*. Em *OFC 2009. Conference on Optical Fiber Communication - includes post deadline papers*, páginas 1–3, March 2009. 41, 42
- [93] Shen, Gangxiang, Hong Guo e Sanjay K. Bose: *Survivable elastic optical networks: survey and perspective (invited)*. *Photonic Network Communications*, 31, February 2016. 41, 42
- [94] Liu, Menglin, M. Tornatore e B. Mukherjee: *Survivable traffic grooming in elastic optical networks - shared protection*. *Journal of Lightwave Technology*, 31(6):903–909, March 2013, ISSN 0733-8724. 41
- [95] Ruan, Lu e Yanwei Zheng: *Dynamic survivable multipath routing and spectrum allocation in OFDM-based flexible optical networks*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 6(1):77–85, Jan 2014, ISSN 1943-0620. 42
- [96] Agrawal, Anuj, Upama Vyas, Vimal Bhatia e Shashi Prakash: *Sla-aware differentiated qos in elastic optical networks*. *Optical Fiber Technology*, 36:41 – 50, 2017, ISSN 1068-5200. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520017300536>. 42
- [97] Vizcaíno, J. López: *Energy efficiency in optical transport networks*. Tese de Mestrado, Technical University of Denmark (DTU), September 2011. 43
- [98] López, J., Y. Ye, V. López, F. Jimenez, R. Duque, P. M. Krummrich, F. Musumeci, M. Tornatore e A. Pattavina: *Traffic and power-aware protection scheme in elastic optical networks*. Em *15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS)*, páginas 1–6, Oct 2012. 43, 48, 55
- [99] Ren, Rongrong, Weigang Hou, Lei Guo, Yejun Liu, Jingjing Wu e Yitong Yang: *Spectrum and energy-efficient survivable routing algorithm in elastic optical network*. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127(20):8795 – 8806, 2016, ISSN 0030-4026. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402616307197>. 43, 44, 48, 55
- [100] Vizcaíno, Jorge López: *Energy-Efficient Design of Optical Transport Networks*. Tese de Doutorado, Technisch Universitat Dortmund, 2016. <http://hdl.handle.net/2003/35933>. 43
- [101] Costa, L. R. e A. C. Drummond: *Dynamic multi-modulation allocation scheme for elastic optical networks*. Em *2021 13th International Conference on Communication Systems Networks (COMSNETS)*, 2021. 46, 58, 63, 108

- [102] Papanikolaou, P., P. Soumplis, K. Manousakis, G. Papadimitriou, G. Ellinas, K. Christodoulopoulos e E. Varvarigos: *Minimizing energy and cost in fixed-grid and flex-grid networks*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 7(4):337–351, April 2015, ISSN 1943-0620. 48, 49
- [103] Vizcaíno, Jorge López, Yabin Ye e I. T. Monroy: *Energy efficiency in elastic-bandwidth optical networks*. Em *Network of the Future (NOF), 2011 International Conference on the*, páginas 107–111, Nov 2011. 48, 53
- [104] Lopez, J., Yabin Ye, V. Lopez, F. Jimenez, R. Duque e P.M. Krummrich: *On the energy efficiency of survivable optical transport networks with flexible-grid*. Em *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC)*, páginas 1–3, Sept 2012. 48, 54
- [105] Tan, Yanxia, Rentao Gu e Yuefeng Ji: *Energy-efficient routing, modulation and spectrum allocation in elastic optical networks*. Optical Fiber Technology, 36(Supplement C):297 – 305, 2017, ISSN 1068-5200. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S106852001730038X>. 48, 54
- [106] Halder, J., T. Acharya, M. Chatterjee e U. Bhattacharya: *Optimal design of energy efficient survivable routing spectrum allocation in eon*. Em *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, páginas 1–6, 2020. 48, 55
- [107] Wang, B., P. H. Ho e C. H. Lin: *A novel energy-efficient transmission scheme in CO-OFDM elastic optical networks*. Journal of Lightwave Technology, 32(21):3982–3990, Nov 2014, ISSN 0733-8724. 48, 49
- [108] Wang, B. e P. H. Ho: *Energy-efficient routing and bandwidth allocation in OFDM-based optical networks*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 8(2):71–84, Feb 2016, ISSN 1943-0620. 48, 49
- [109] Ju, M., F. Zhou, S. Xiao e Z. Zhu: *Energy-efficient protection with directed p-cycles for asymmetric traffic in elastic optical networks*. Em *2016 21st European Conference on Networks and Optical Communications (NOC)*, páginas 94–99, 2016. 48, 55, 80, 82
- [110] Dong, X., T. E. H. El-Gorashi e J. M. H. Elmirghani: *Energy efficiency of optical ofdm-based networks*. Em *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 4131–4136, 2013. 48, 53, 79, 82
- [111] El-Gorashi, T. E. H., X. Dong e J. M. H. Elmirghani: *Green optical orthogonal frequency-division multiplexing networks*. IET Optoelectronics, 8(3):137–148, June 2014, ISSN 1751-8768. 48, 53, 80, 82
- [112] Naas, N. e H. Mouftah: *Power-aware design of the optical interconnect for future data centers*. Em *2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, páginas 675–682, June 2016. 48, 53

- [113] Zhu, M., P. Gao, J. Zhang, X. Zeng e S. Zhang: *Energy efficient dynamic virtual optical network embedding in sliceable-transponder-equipped eons*. Em *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, páginas 1–6, 2017. 48, 52
- [114] Zhang, L., T. Han e N. Ansari: *Energy-aware virtual machine management in inter-datacenter networks over elastic optical infrastructure*. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2(1):305–315, 2018. 48, 50
- [115] Guo, Pengxing, W. Hou, J. Wu e Zhimin Sun: *Modulation adaptive grooming in green elastic optical networks*. Em *14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 2015*, páginas 1–3, July 2015. 48, 51, 127, 129, 135
- [116] Hadi, M. e M. R. Pakravan: *Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in ofdm-based elastic optical networks*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 10(2):90–103, 2018. 48, 52, 81, 82
- [117] Bandiri, S. Y. M., R. M. S. Braga, T. C. Pimenta e D. H. Spadoti: *Energy consumption improvement based on distance adaptive modulation in elastic optical network*. Em *2017 International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems (IC-CDCS)*, páginas 29–32, June 2017. 48, 54
- [118] Moura, P. M., R. A. Scaraficci e N. L. S. d. Fonseca: *Algorithm for energy efficient routing, modulation and spectrum assignment*. Em *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 5961–5966, June 2015. 48, 53
- [119] Liu, Y., H. Li, Y. Wang, Z. Duan e Y. Ji: *Energy-efficient modulation scheme for software-defined optical network*. *Electronics Letters*, 53(18):1266–1268, 2017, ISSN 0013-5194. 48, 54, 60, 76, 142
- [120] Zhang, Jiawei, Yongli Zhao, Jie Zhang e B. Mukherjee: *Energy efficiency of ip-over-elastic optical networks with sliceable optical transponder*. Em *OFC 2014*, páginas 1–3, March 2014. 48, 51, 80, 82
- [121] Liu, Huanlin, Yarui Yin e Yong Chen: *Energy-efficient multicast traffic grooming strategy based on light-tree splitting for elastic optical networks*. *Optical Fiber Technology*, 36(Supplement C):374 – 381, 2017, ISSN 1068-5200. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520016302693>. 48, 52
- [122] Durand, Fábio e Taufik Abrão: *Energy efficiency analysis in adaptive fec-based lightpath elastic optical networks*. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 24(09):1550133, 2015. <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218126615501339>. 48, 50
- [123] Zhang, S. e B. Mukherjee: *Energy-efficient dynamic provisioning for spectrum elastic optical networks*. Em *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 3031–3035, 2012. 48, 51

- [124] Biswas, P., S. K. Dey e A. Adhya: *Auxiliary graph based energy-efficient dynamic connection grooming for elastic optical networks*. Em *2016 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, páginas 1–3, Nov 2016. 48, 51
- [125] Fallahpour, A., H. Beyranvand, S. A. Nezamalhosseini e J. A. Salehi: *Energy efficient routing and spectrum assignment with regenerator placement in elastic optical networks*. *Journal of Lightwave Technology*, 32(10):2019–2027, May 2014, ISSN 0733-8724. 48, 49
- [126] Costa, Lucas R., Guilherme N. Ramos e André C. Drummond: *Leveraging adaptive modulation with multi-hop routing in elastic optical networks*. *Computer Networks*, 105:124 – 137, 2016, ISSN 1389-1286. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128616301785>. 57, 60, 61, 71, 85, 127, 129, 135, 137
- [127] Costa, Lucas e André Drummond: *Novo Algoritmo RMLSA com Roteamento Multihop em Redes ópticas Elásticas*. Em *SBRC 2016*, Salvador, Bahia, may 2016. <http://XXXXX/152171.pdf>. 57, 60
- [128] Costa, Lucas e André Drummond: *Novo Esquema para Provisão de Modulação Adaptativa em Redes ópticas Elásticas*. Em *SBRC 2017*, Belém, Pará, may 2017. <https://sbrc2017.ufpa.br/wp-content/uploads/2017/05/proceedingsSBRC2017.pdf>. 57, 58, 60, 61, 63, 67, 76
- [129] Yen, Jin Y.: *Finding the k shortest loopless paths in a network*. *Management Science*, 17(11):712–716, 1971. 58, 66, 124
- [130] Ye, Zilong, A.N. Patel, P.N. Ji e Chunming Qiao: *Distance-adaptive and fragmentation-aware optical traffic grooming in flexible grid optical networks*. Em *2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology*, páginas 355–356, July 2014. 60
- [131] Costa, Lucas R. e André C. Drummond: *ONS - optical network simulator*. <https://gitlab.com/get-unb/ons>, 2021. 67, 106, 127
- [132] Chen, X., A. Jukan e A. Gumaste: *Optimized parallel transmission in elastic optical networks to support high-speed ethernet*. *Journal of Lightwave Technology*, 32(2):228–238, 2014. 79, 82
- [133] Oliveira, Helder M.N.S. e Nelson L.S. da Fonseca: *Protection in elastic optical networks using failure-independent path protecting p-cycles*. *Optical Switching and Networking*, 35:100535, 2020, ISSN 1573-4277. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157342771730245X>. 80, 82
- [134] Costa, L. R., Í. B. Brasileiro e A. C. Drummond: *Energy efficiency in sliceable-transponder enabled elastic optical networks*. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, páginas 1–1, 2021. 81, 82, 117
- [135] Gurobi Optimization, LLC: *Gurobi optimizer reference manual*, 2020. <http://www.gurobi.com>. 106, 109, 132

- [136] Costa, Lucas e André Drummond: *Eficiência Energética com Modelo de Grafo Auxiliar para Redes ópticas Elásticas*. Em *SBRC 2018*, Campos do Jordão, São Paulo, may 2018. <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/2463/2427>. 117, 120, 121
- [137] Zhu, Hongyue, Hui Zang, Keyao Zhu e B. Mukherjee: *A novel generic graph model for traffic grooming in heterogeneous WDM mesh networks*. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(2):285–299, Apr 2003, ISSN 1063-6692. 118, 119, 120
- [138] Zhang, Jiawei, Yongli Zhao, Xiaosong Yu, Jie Zhang e B. Mukherjee: *Auxiliary graph model for dynamic traffic grooming in elastic optical networks with sliceable optical transponder*. Em *2014 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, páginas 1–3, Sept 2014. 119
- [139] Wang, Rui e B. Mukherjee: *Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks*. Em *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, páginas 2907–2911, Dec 2012. 123
- [140] Dijkstra, E. W.: *A note on two problems in connexion with graphs*. *Numerische Mathematik*, 1(1):269–271, Dec 1959, ISSN 0945-3245. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>. 125
- [141] Brasileiro Ítalo, Lucas Costa e André Drummond: *A survey on challenges of spatial division multiplexing enabled elastic optical networks*. *Optical Switching and Networking*, 38:100584, 2020, ISSN 1573-4277. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427720300461>. 143
- [142] Brasileiro, Í. B., L. R. Costa e A. C. Drummond: *Circuit allocation with strengthened medium core in spatially-multiplexed elastic optical networks*. Em *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4, 2020. 143
- [143] Brasileiro, Í. B., L. R. Costa, G. E. V. Silva e A. C. Drummond: *Empowering hitless spectral defragmentation in elastic optical networks with spatial multiplexing*. Em *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4, 2020. 143