



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Potencializando a Modulação Adaptativa com Roteamento em Múltiplos Saltos em Redes Ópticas Elásticas

Lucas Rodrigues Costa

Dissertação apresentada como requisito parcial para
conclusão do Mestrado em Informática

Orientador

Prof. Dr. André Costa Drummond

Brasília
2015

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

R837p Rodrigues Costa, Lucas
Potencializando a Modulação Adaptativa com
Roteamento em Múltiplos Saltos em Redes Ópticas
Elásticas / Lucas Rodrigues Costa; orientador André
Costa Drummond. -- Brasília, 2015.
122 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Informática) -
Universidade de Brasília, 2015.

1. Redes Ópticas. 2. Redes Ópticas Elásticas. 3.
Engenharia de Tráfego. 4. Roteamento Dinâmico. I.
Costa Drummond, André, orient. II. Título.

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, a minha família pelo apoio e ajuda. Agradeço em especial a minha noiva Adriana, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis, suportando a distância e a saudade. Agradeço aos meus professores da Universidade de Brasília, em especial ao professor André Costa Drummond, pelo apoio e disponibilidade contínua, sempre procurando extrair o meu melhor. Agradeço aos colegas de trabalho do Centro de Informática da UnB, Cláudio X., Cláudio G., Alex, Karam, Juvenal e Domingos. Agradeço aos colegas do laboratório, Leia, Paulo, Ulisses, Lucas A. e todos os demais. Agradeço ao professor Jacir, que sempre me incentivou e me apoiou a terminar o mestrado. E ao Google.

Resumo

A tecnologia de redes ópticas elásticas surge como uma solução promissora para o futuro da transmissão óptica de alta velocidade. Suas características proporcionam uma flexibilidade e escalabilidade superior na alocação de espectro para os diversos serviços emergentes acompanhando a crescente demanda do tráfego da Internet. Em redes ópticas elásticas as demandas de tráfego são transmitidas usando um número arbitrário de subportadoras OFDM, e um nível de modulação adequado, levando em conta a distância de transmissão. Esta dissertação descreve as principais características do paradigma de redes ópticas elásticas, apresenta as principais linhas de pesquisa encontradas na literatura e propõe soluções para o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation* - RMLSA) que visam potencializar o uso da modulação adaptativa com roteamento em múltiplos saltos para o cenário dinâmico de tráfego. Dentre as soluções propostas destacam-se (i) uma abordagem RMLSA que procura realizar a maior quantidade de agregação de tráfego possível usando os níveis de modulação mais altos da rede e (ii) a criação de um esquema de modulação adaptativa, acoplável a qualquer algoritmo RSA, que viabiliza o roteamento do tráfego através de múltiplos saltos na topologia virtual. Os resultados obtidos apresentam uma redução significativa na taxa de bloqueio para diversas soluções RSA da literatura sem comprometer a utilização dos recursos na rede.

Palavras-chave: Modulação Adaptativa, Agregação de tráfego, RSA, RMLSA, Redes ópticas elásticas

Abstract

The elastic optical networks technology emerges as a promising solution for the future of high-speed optical transmission. It provides flexibility and superior capability in spectrum allocation for the various emerging services along the increasing demand of Internet traffic. In Elastic Optical Networks the traffic demands are transmitted using an arbitrary number of OFDM sub carriers, and a suitable modulation level, taking into consideration the transmission distance. This dissertation describes the main characteristics of the Elastic Optical Network paradigm, presents the main areas of research in the literature and proposes solutions that solve the Routing, Level Modulation, and Spectrum Allocation (RMLSA) problem which seeks enhancing the use of adaptive modulation with multihop routing in the dynamic traffic scenario. Among the solutions developed stands out *(i)* an RMLSA approach that seeks to achieve the greatest possible amount of traffic grooming using the highest modulation levels in network and *(ii)* the creation of an adaptive modulation scheme, that work along with any RSA algorithm, that enables the multihop routing traffic. The results showed an important reduction in blocking rate for various RSA approaches from the literature without compromising the use of resources in the network.

Keywords: Adaptative Modulation, Traffic Grooming, RSA, RMLSA, Elastic Optical Network

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	4
1.2	Contribuições	5
1.3	Organização do Documento	6
2	Redes Ópticas Elásticas	7
2.1	Princípio OFDM	8
2.1.1	História do OFDM	8
2.1.2	Princípio da Ortogonalidade	9
2.1.3	Técnicas para interferência	12
2.1.4	Sistema OFDM	13
2.1.5	Vantagens e Desvantagens do OFDM	14
2.1.6	O-OFDM	14
2.2	Modelo de Rede	16
2.2.1	Arquitetura	17
2.2.2	BVT	17
2.2.3	BV-WXC	19
2.3	Representação do Espectro	21
2.4	Formato de Modulação e Distância Adaptativa	23
2.5	Benefícios das Redes EON	25
2.6	Algoritmo RSA	26
2.6.1	Complexidade do RSA	27
2.6.2	Complexidade do RMLSA	29
2.7	Tráfego Estático e Dinâmico	30
2.8	Fragmentação de Espectro	30
2.9	Agregação de Dados	34
2.10	Agregação de Espectro	34
2.11	Roteamento em Múltiplos Saltos	38
2.12	Análises OPEX e CAPEX	39

2.13	Estratégias de sobrevivência	40
2.14	Esquemas de gerenciamento e controle da rede	41
3	Estado da Arte	42
3.1	Mapeamento da literatura	42
3.1.1	Arquitetura e tecnologia de dispositivos	42
3.1.2	Algoritmos RSA	44
3.1.3	Fragmentação de espectro	46
3.1.4	Agregação de tráfego	47
3.1.5	Recuperação a falhas	50
3.1.6	Análises de custos	51
3.1.7	Tecnologia do plano de controle	52
3.2	Literatura de referência	53
4	Maximizando o Uso do Melhor Nível de Modulação	58
4.1	Proposta: Algoritmo MBM	59
4.2	Complexidade do Algoritmo MBM	62
4.3	Resultados de Simulação	63
4.3.1	Ambiente de Simulação	63
4.3.2	Exemplos Numéricos	65
4.3.3	Cenários Irrestritos	78
4.4	Resumo Conclusivo	81
5	Esquema de Modulação Adaptativa com Múltiplos Saltos	82
5.1	Esquema de modulação adaptativa AMMS	83
5.2	Complexidade do esquema AMMS	87
5.3	Análise da quantidade de zonas para o esquema AMMS	87
5.4	Resultados de Simulação	90
5.4.1	Ambiente de Simulação	90
5.4.2	Exemplos Numéricos	92
5.5	Resumo Conclusivo	108
6	Considerações Finais	110
6.1	Trabalhos Futuros	112
	Referências	113

Lista de Figuras

2.1	Comparação entre os canais ópticos de redes com grade fixa e flexível. . . .	8
2.2	Comparação entre as técnicas FDM e OFDM.	9
2.3	Domínio da frequência de espectro e do tempo de um sinal OFDM com 4 subportadoras: a) Domínio da frequência de espectro; b) Domínio do tempo.	10
2.4	Banda de Guarda e Prefixo Cíclico de um símbolo OFDM.	12
2.5	Diagrama de um sistema OFDM.	13
2.6	Tipos de O-OFDM.	15
2.7	Arquitetura das redes ópticas elásticas baseadas em OFDM.	17
2.8	Provisionamento de largura de banda no domínio do espectro.	18
2.9	Funcionamento do BVT e do SBVT.	19
2.10	Representação do BV-WSS.	20
2.11	Arquitetura de um BV-WXC: a) arquitetura de difusão e seleção; b) arquitetura de não difusão e seleção.	20
2.12	Granularidades da atual recomendação ITU-T para redes WDM.	21
2.13	Abordagens adotadas para redes EON: a) abordagem de <i>slot</i> único; b) abordagem de <i>slot</i> dividido.	22
2.14	Representação da alocação de espectro através de <i>slots</i>	22
2.15	Nível de modulação em função da distância de transmissão.	23
2.16	Benefícios EON: a) cinco demandas e suas necessidades de espectro em uma rede de grade fixa com modulação QPSK; b) as mesmas demandas, com modulação adaptativa otimizada pela distância; c) As mesmas demandas com espectro flexível.	26
2.17	Roteamento e alocação de espectro em uma rede EON com quatro nós. . .	27
2.18	Técnicas de desfragmentação de espectro: a) Reotimização; b) <i>Make-Before-Break</i> ; c) <i>Push-and-Pull</i> ; d) <i>Hop Tuning</i>	31
2.19	Taxa de fragmentação de espectro de acordo com as Equações 2.9 e 2.10. . .	33
2.20	Exemplo de agregação de dados nas redes ópticas elásticas.	35
2.21	Distinção entre a agregação de tráfego na arquitetura BVT e SBVT: a) funcionamento da arquitetura BVT ; b) funcionamento da arquitetura SBVT.	36

2.22	Agregação de espectro em redes EON.	37
2.23	Estrutura de um BV-WXC na abordagem de agregação de espectro EON.	38
2.24	Exemplificação de um roteamento em múltiplos saltos.	39
2.25	Estratégias de sobrevivência das redes EON.	41
3.1	Esquema de modulação adaptativa para o problema RSA <i>mAdap</i>	54
3.2	Problema de distância adaptativa com agregação de espectro.	56
4.1	Exemplificação do algoritmo MBM.	59
4.2	Topologia USANet.	64
4.3	Topologia PanEuro.	64
4.4	Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia USANet.	66
4.5	Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia PanEuro.	66
4.6	Taxa média de transmissores disponíveis para topologia USANet.	68
4.7	Taxa média de transmissores disponíveis para topologia PanEuro.	68
4.8	Média de transmissores por requisição para topologia USANet.	69
4.9	Média de transmissores por requisição para topologia PanEuro.	70
4.10	Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia USANet.	71
4.11	Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia PanEuro.	71
4.12	Média de saltos na topologia física por requisição para topologia USANet.	73
4.13	Média de saltos na topologia física por requisição para topologia PanEuro.	73
4.14	Taxa média de espectro disponível para topologia USANet.	74
4.15	Taxa média de espectro disponível para topologia PanEuro.	75
4.16	Taxa média do uso de modulação para topologia USANet.	76
4.17	Taxa média do uso de modulação para topologia PanEuro.	77
4.18	Taxa de bloqueio de banda (Transmissores Suficientes). Topologias USA- Net e PanEuro, respectivamente.	79
4.19	Taxa de bloqueio de banda (Sem Limitação de Espectro). Topologias USA- Net e PanEuro, respectivamente.	80
5.1	Exemplos de zonas de alcançabilidade para a Topologia USANet.	83
5.2	Esquema de modulação adaptativa AMMS.	86
5.3	Resultados de simulação do esquema <i>AMMS</i> para a carga de 350 Erlangs para quatro fatores de multiplicação de diâmetro.	88
5.4	Topologia USANet.	91
5.5	Topologia PanEuro.	91
5.6	Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia USANet.	93
5.7	Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia PanEuro.	93
5.8	Taxa média de transmissores disponíveis para topologia USANet.	95

5.9	Taxa média de transmissores disponíveis para topologia PanEuro.	95
5.10	Média de transmissores por requisição para topologia USANet.	96
5.11	Média de transmissores por requisição para topologia PanEuro.	97
5.12	Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia USANet.	98
5.13	Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia PanEuro.	98
5.14	Média de saltos na topologia física por requisição para topologia USANet. .	100
5.15	Média de saltos na topologia física por requisição para topologia PanEuro.	100
5.16	Taxa média de espectro disponível para topologia USANet.	101
5.17	Taxa média de espectro disponível para topologia PanEuro.	102
5.18	Taxa média do uso de modulação para topologia USANet, algoritmos FPA, KSP, MSP, SPV sob os esquemas <i>mAdap</i> e <i>AMMS</i>	104
5.19	Taxa média do uso de modulação para topologia USANet, algoritmos MBM, LB-SRLP, MPH-SRLP, MPH-SRNP sob os esquemas <i>mAdap</i> e <i>AMMS</i> . . .	105
5.20	Taxa média do uso de modulação para topologia PanEuro, algoritmos FPA, KSP, MSP, SPV sob os esquemas <i>mAdap</i> e <i>AMMS</i>	106
5.21	Taxa média do uso de modulação para topologia PanEuro, algoritmos MBM, LB-SRLP, MPH-SRLP, MPH-SRNP sob os esquemas <i>mAdap</i> e <i>AMMS</i>	107

Lista de Tabelas

1.1	Contexto histórico do tráfego da Internet e previsão para 2019.	1
2.1	Relação do tamanho do espectro, banda passante e alcance tolerável das subportadoras ODFM.	25
2.2	Técnicas de desfragmentação de espectro.	32
3.1	Principais propostas da literatura e suas características.	57

Lista de Abreviaturas e Siglas

16QAM *16 Quadrature Amplitude Modulation.*

8QAM *8 Quadrature Amplitude Modulation.*

BBR *Bandwidth Blocking Ratio.*

BPSK *Binary Phase Shift Keying.*

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

BV-WXC *Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects.*

BVT *Bandwidth-Variable Transponder.*

CAPEX *Capital Expenditure.*

CO-OFDM *Coherent Orthogonal frequency-division multiplexing.*

CoWDM *Coherent Wavelehgth-division Multiplexing.*

CP *Cyclic Prefix.*

CWDM *Coarse Wavelength Division Multiplexing.*

DDO-OFDM *Direct-Detection Optical OFDM.*

DFT *Discrete Fourier transform.*

DWDM *Dense Wavelength Division Multiplexing.*

EON *Elastic Optical Networking.*

FDM *Frequency Division Multiplexing.*

FFT *Fast Fourier Transform.*

GI *Guard Interval.*

GMPLS *Generalized Multi-Protocol Label Switching.*

ICI *Inter-Carrier Interference.*

IDFT *Inverse Discrete Fourier Transform.*

IFFT *Inverse Fast Fourier transform.*

IP *Internet Protocol.*

ISI *Inter-Symbol Interference.*

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

LPF *Low-Pass Filter.*

LTE *Long Term Evolution.*

MCM *Multi-Carrier Modulation.*

MPLS *Multi-Protocol Label Switching.*

MSP *Multiprocessor Scheduling Problem.*

N-WDM *Nyquist-WDM.*

NSFNet *National Science Foundation Network.*

O-OFDM *Optical-OFDM.*

OAWG *Optical Arbitrary Waveform Generation.*

OEO *Optical-Electrical-Optical.*

OFDM *Orthogonal frequency-division multiplexing.*

OPEX *Operational Expenditure.*

OSNR *Optical Signal-To-Noise Ratio.*

PanEuro *Pan European Networks.*

PAPR *Peak to Average Power Ratio.*

PLI *Programação Linear Inteira.*

PSK *Phase Shift Keying.*

QAM *Quadrature Amplitude Modulation.*

QoT *Quality of Transmission.*

QPSK *Quadrature Phase Shift Keying.*

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

RSA *Routing and Spectrum Allocation.*

RWA *Routing and Wavelength Assignment.*

SBVT *Sliceable Bandwidth-Variable Transponder.*

SDN *Software Defined Networking.*

SLA *Service Level Agreement.*

SLE *Static Lightpath Establishment.*

SLICE *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network.*

SNR *Signal-To-Noise Ratio.*

SRA *Static Spectrum Allocation.*

SRLP *Spectrum Reservation for each LightPath.*

SRNP *Spectrum Reservation for each Node-Pair.*

TDM *Time-Division Multiplexing.*

ULAF *Ultra-Large-Area Fiber.*

USANet *United States of America Network.*

WDM *Wavelength Division Multiplexing.*

WRN *Wavelength Routed Network.*

WSS *Wavelength-Selective Switch.*

WXC *Wavelength Cross-Connects.*

Capítulo 1

Introdução

O tráfego na Internet tem crescido exponencialmente nos últimos anos e as previsões indicam que este crescimento continuará devido às aplicações emergentes, tais como, aplicações multimídia, TV de alta definição, computação em nuvem e aplicações de rede em tempo real [1, 2]. A tabela 1.1 mostra o contexto histórico do tráfego global da Internet nos últimos anos e sua previsão para 2019, segundo [2].

Tabela 1.1: Contexto histórico do tráfego da Internet e previsão para 2019.

Ano	Tráfego Global da Internet
1992	100 GB por dia
1997	100 GB por hora
2002	100 GB por segundo
2007	2.000 GB por segundo
2014	16.144 GB por segundo
2019	51.794 GB por segundo

As redes ópticas atuais, baseadas no paradigma de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* (WDM)), oferecem a possibilidade de estabelecer conexões a uma taxa de *bits* fixa, tais como, 10Gb/s, 40Gb/s e 100Gb/s. O paradigma WDM, através das tecnologias *Coarse Wavelength Division Multiplexing* (CWDM) e *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM), oferece diversas configurações com diferentes espaçamentos de comprimentos de onda e número de canais, entretanto, os canais ainda são modulados em um formato único e espaçados por uma distância fixa [3].

O tráfego atual da Internet demanda, cada vez mais, diferentes níveis de granularidade com taxas de *bits* mais flexíveis e padrões geográficos de trânsito imprevisíveis [4]. A rigidez das redes WDM dificulta a transmissão em altas taxas por longas distâncias, impondo taxas de transmissão fixas em cada comprimento de onda e reduzindo a eficiência na utilização dos recursos devido às diferentes demandas das aplicações. A adaptação das

redes WDM para as novas demandas de tráfego é um dos desafios para a Internet do Futuro. Além disso, pesquisas demonstram que as redes WDM estão se aproximando do seu limite [5].

Tais desafios exigem uma infra-estrutura de redes ópticas escalável e práticas para aumentar a capacidade de transporte da rede, melhorando a eficiência de utilização de recursos e permitindo o transporte com diferentes granularidades de tráfego e taxas de *bits* flexíveis. Para tratar adequadamente esse desafio são necessárias redes flexíveis equipadas com elementos que possam se adaptar às demandas heterogêneas do tráfego.

O conceito de redes ópticas elásticas, ou flexíveis (*Elastic Optical Networking* (EON)) tem sido amplamente estudado na literatura [6]. O termo “flexibilidade” refere-se à capacidade da rede de ajustar dinamicamente seus recursos, tais como, a largura de banda óptica e o formato de modulação de acordo com os requisitos de cada demanda. Os termos “flexível”, “elástico”, e “*gridless*” são frequentemente utilizados na literatura como sinônimos.

Dentre as tecnologias que permitem a flexibilidade nas redes ópticas pode-se destacar a CoWDM (*Coherent Waveleghth-division Multiplexing*) [7], a CO-OFDM (*Coherent Orthogonal frequency-division multiplexing*) [8], a N-WDM (*Nyquist-WDM*) [6] e a OAWG (*Optical Arbitrary Waveform Generation*) [9]. Estas tecnologias permitem a formação de subportadoras ópticas de baixa velocidade que, combinadas ortogonalmente, podem gerar canais de transmissão de tamanho flexível [6].

Recentemente a tecnologia CO-OFDM tem sido considerada uma candidata promissora para a tecnologia de redes ópticas da Internet do Futuro. A OFDM é uma classe especial do esquema de modulação de portadoras múltiplas (*Multi-Carrier Modulation* (MCM)) que transmite dados a uma alta velocidade dividindo-os em canais ortogonais (subportadoras) de baixa velocidade de dados [10].

A OFDM surgiu como uma tecnologia para as comunicações em redes sem fio, pois oferece uma solução eficaz para o problema de interferência inter-símbolo (*Inter-Symbol Interference* (ISI)). Devido ao seu grande sucesso nas tecnologias de rede sem fio, tais como 802.11a/g *Wi-Fi*, 802.16 *WiMAX* e *LTE* (*Long Term Evolution*), a tecnologia OFDM foi amplamente adotada na literatura sobre EON [11].

O-OFDM (*Optical-OFDM*) [12] é a tecnologia que permite alcançar a eficiência dos recursos espectrais ópticos através da formação de supercanais, que consistem na união de subcanais, que oferecem taxa de *bits* adaptáveis para atender de forma ideal as requisições de banda. Esses supercanais possuem largura de banda variável e são determinados de acordo com as necessidades dos fluxos a serem transmitidos.

Dessa forma o espectro disponível na fibra é subdividido em subcanais, ou *slots*, que representam cada subportadora OFDM, com granularidades de espectro iguais. Essa

abordagem é chamada SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*) pela literatura. Um caminho óptico SLICE é uma combinação arbitrária de *slots* contíguos, que por sua vez, transmitem taxa de dados de acordo com o número de *slots* combinados tornando a largura de banda do caminho óptico variável [11]. Esta será a abordagem utilizada neste trabalho.

O O-OFDM é altamente eficiente em termos de formato de modulação de espectro fornecendo comprimentos de onda escaláveis e flexíveis através de sua granularidade. Em contraste com a rede fixa, o O-OFDM pode fornecer larguras de banda variável através da combinação de suas subportadoras. No entanto, este novo conceito traz novos desafios, uma vez que os algoritmos tradicionais de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (*Routing and Wavelength Assignment* (RWA)) já não são diretamente aplicáveis [12].

Demandas de tráfego que requeiram banda maior que a capacidade de banda de uma subportadora OFDM devem ser atribuídas a um número arbitrário de *slots* (subportadoras) contíguos para que se possa atender a requisição. A sobreposição das subportadoras OFDM aumenta a capacidade de banda do canal, obtendo uma melhor eficiência espectral. Nesse contexto, o conhecido problema RWA das redes tradicionais WDM, que tem como objetivo alocar a melhor combinação de rota e comprimento de onda para uma determinada demanda de tráfego, é transformado para uma restrição de continuidade de espectro, chamado RSA (*Routing and Spectrum Allocation*). O problema RSA tem como objetivo encontrar um caminho e atribuir ao mesmo uma quantidade contígua de *slots* espectrais [3].

Além disso, uma característica particular das subportadoras OFDM, que pode aumentar ainda mais a flexibilidade e a eficiência de uma rede EON, é a escolha do número de *bits* por símbolo modulados para cada subportadora. Dessa forma, o problema RSA evoluiu para o chamado RMLSA (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation*) [12] que adiciona o formato de modulação à atribuição do espectro na fibra.

Obviamente, as estratégias para alocação destes recursos às requisições determinam a eficiência dos recursos para o maior atendimento das demandas na rede. Ambos os problemas citados são problemas NP, o RSA é NP-Difícil [13] e o RMLSA é NP-Completo [12], e por sua vez, diversos algoritmos para a alocação de recursos em redes elásticas tem sido propostos na literatura. Tais estudos demonstram a eficácia do novo paradigma e sua viabilidade [3].

Nas redes ópticas WDM a agregação de dados é uma funcionalidade amplamente utilizada para transportar dados de mesma origem e destino na rede. A agregação de dados faz com que requisições de tráfego com baixa largura de banda possam ser agregadas em um mesmo caminho óptico levando a um melhor aproveitamento dos recursos da rede.

Semelhante à essa tecnologia das redes WDM, em redes elásticas também é possível

agregar fluxos a um caminho óptico já estabelecido [14]. Isso leva a uma maior eficiência espectral, pois permite a eliminação das bandas de guarda entre supercanais. O uso de agregação de dados nas redes ópticas elásticas também leva a uma redução significativa das despesas operacionais e de capital (*Operational Expenditure (OPEX)/Capital Expenditure (CAPEX)*), como por exemplo, um menor número de transmissores utilizados e consequentemente uma maior eficiência energética. [15].

Quando se é necessário transportar o tráfego para diferentes destinos é necessário estabelecer mais de um caminho óptico. Como consequência disso, são necessárias bandas de guarda entre os caminhos ópticos adjacentes levando a uma pior eficiência espectral e ao uso de um maior número de transmissores. Tudo isso resulta em uma sobrecarga significativa em termos da utilização de recursos na rede. Uma alternativa para resolver este problema é empregar o uso da comutação eletrônica entre sub-canais, como ocorre nas redes WDM tradicionais. No entanto, isso acarreta o uso de transmissores entre os nós de comutação, e por sua vez, um maior custo na rede em termos de OPEX/CAPEX [16].

Para resolver esse problema, técnicas de agregação de espectro foram recentemente propostas, permitindo que a agregação e a distribuição do tráfego possam ser executadas diretamente na camada óptica. Diferentemente do que ocorre na agregação de dados, onde as demandas agrupadas devem ter a mesma origem e destino, na agregação de espectro múltiplas demandas de baixa capacidade podem ser agrupadas em uma mesma origem e transmitidas para múltiplos destinos por um mesmo transmissor [16].

Isso leva a uma eficiência significativa no uso do espectro e de custos operacionais da rede, pois permite a realização de técnicas de agregação de tráfego para múltiplos destinos através do uso de um único transmissor.

1.1 Motivação

O rápido crescimento do tráfego da Internet e as aplicações emergentes são os motores fundamentais para os avanços das pesquisas da academia e da indústria. Tais necessidades exigem tecnologias de transmissão óptica mais rápidas, flexíveis e escaláveis que possam aproveitar de forma eficiente os recursos da fibra óptica levando em consideração a redução dos custos operacionais da rede.

Como uma nova tecnologia para a Internet do Futuro, as redes ópticas elásticas trouxeram novos desafios para a comunidade científica, levantando questões como: 1) tecnologia dos novos dispositivos de rede; 2) planejamento da rede; 3) engenharia de tráfego; 4) e as tecnologias do plano de controle.

Apesar do grande esforço que tem sido feito para resolver esses problemas, ainda existem muitas questões pendentes para serem exploradas, especialmente no que tange

ao roteamento dinâmico e algoritmos de alocação de espectro. Métricas como: (i) taxa de bloqueio; (ii) uso de espectro; (iii) eficiência energética; e (iv) redução de despesas operacionais (OPEX) e de capital (CAPEX) são constantemente exploradas nas recentes publicações científicas.

O trabalho apresentado nesta dissertação surge a partir da percepção de desafios existentes neste cenário de pesquisa. O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade dessa nova arquitetura de redes ópticas e proporcionar uma visão abrangente das diferentes peças que compõem as redes EON. Em seguida, numa visão mais detalhada, serão descritos cenários e algoritmos para roteamento e alocação de espectro levando em consideração as métricas já citadas.

Tendo em vista o cenário acadêmico e as questões envolvidas na otimização de redes ópticas elásticas, esta trabalho propõe soluções para o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA) que visam potencializar o uso da modulação adaptativa com roteamento em múltiplos saltos (*multihop*) no cenário dinâmico de redes. Dentre as soluções desenvolvidas destaca-se (*i*) uma abordagem RMLSA que procura realizar a maior quantidade de agregação de tráfego possível usando os níveis de modulação mais altos através de múltiplos saltos na topologia virtual e (*ii*) a criação de um esquema de modulação adaptativa que viabiliza o roteamento do tráfego através de múltiplos saltos na topologia virtual. Esta última, permite a utilização de qualquer abordagem RSA clássica para resolver o problema RMLSA ao mesmo tempo que ameniza as restrições de continuidade de espectro e distância de transmissão do problema.

Ambas as propostas baseiam-se nas abordagens apresentadas em [17] levando em consideração técnicas de agregação de dados e agregação de espectro até agora pouco exploradas em conjunto pela literatura. Os resultados mostraram uma grande redução na taxa de bloqueio para diversas abordagens RSA da literatura sem comprometer a utilização dos recursos na rede como uso de espectro e uso de transmissores.

1.2 Contribuições

A lista apresentada a seguir descreve as contribuições desta dissertação:

- Apresentação dos conceitos básicos e as principais características do paradigma de redes ópticas elásticas (EON);
- Apresentação do mapeamento geral do estado da arte da literatura EON;
- Descrição dos algoritmos que resolvem os problema RSA e RMLSA no cenário de tráfego de rede dinâmico e estático.

- Proposta e avaliação de um algoritmo RMLSA que procura maximizar o uso do maior nível de modulação fornecido pela rede a partir de uma esquema de modulação adaptativa da literatura.
- Proposta e avaliação de um esquema de modulação adaptativa inovador para resolução do problema de modulação adaptativa em redes ópticas elásticas baseado no roteamento do tráfego através de múltiplos saltos na topologia virtual.

1.3 Organização do Documento

O restante deste documento está organizado como segue. O Capítulo 2 descreve o funcionamento da arquitetura das redes ópticas elásticas apresentando os elementos necessários para seu funcionamento. O Capítulo 3 apresenta o estado da arte das redes ópticas elásticas, algoritmos e técnicas propostas na literatura. O Capítulo 4 apresenta uma abordagem RMLSA que procura realizar a maior quantidade de agregação de espectro possível usando os níveis de modulação mais altos através de múltiplos saltos. São apresentados resultados comparativos desta abordagem com demais abordagens da literatura. O Capítulo 5 apresenta o esquema de modulação adaptativa que viabiliza o roteamento do tráfego através de múltiplos saltos para resolver o problema RMLSA com qualquer abordagem RSA. Os resultados comparam o uso de diversas abordagens RSA/RMLSA sob os aspectos do esquema proposto e suas vantagens em relação a demais abordagens da literatura. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e indica os possíveis trabalhos a serem desenvolvidos no futuro.

Capítulo 2

Redes Ópticas Elásticas

Este Capítulo, apresenta os elementos básicos das redes ópticas elásticas baseadas em OFDM, que é a abordagem utilizada na proposta deste trabalho.

As redes ópticas elásticas baseada em OFDM possuem a característica de dividir os recursos espectrais em *slots* de frequência na forma de subportadoras, permitindo múltiplos formatos de modulação e taxas de dados e espectro de tamanhos variados. Nesse contexto, o objetivo de uma rede EON (*Elastic Optical Networking*) é alocar uma demanda a um determinado caminho óptico que possua uma largura de banda óptica com um tamanho apropriado a mesma. Assim, o caminho óptico é capaz de ser expandido ou contraído, quando necessário, de acordo com flutuações do tráfego ou novas demandas de conexão [18].

Nas redes ópticas com multiplexação por divisão de comprimentos de onda (WDM), os canais de transmissão utilizam grades de frequência de tamanho fixo conforme as especificações do padrão ITU-T (*International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector*) operando geralmente com granularidades de 50 GHz por comprimento de onda para a acomodação das conexões [3].

Para cada demanda de tráfego uma grade inteira precisa ser alocada para sua acomodação, 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 a capacidade de acomodação de um comprimento de onda, ele será utilizado por completo. Caso a demanda seja maior que a capacidade de um comprimento de onda, ela é separada e transmitida por comprimentos de ondas distintos, sendo visto pela rede óptica como conexões diferentes.

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 [6].

A Figura 2.1 apresenta as diferenças entre os caminhos ópticos com grade fixa e flexível. O canal com grade fixa opera em intervalos de frequência de 50 GHz e, de acordo com o formato de modulação, podem acomodar requisições de conexão com taxas de até 100 Gb/s. Pode-se observar o desperdício de recursos espectrais quando as demandas requisitadas são menores que o canal de acomodação, como, por exemplo, 10 Gb/s. Por outro lado, o canal com grade flexível, utilizado nas redes EON, oferece o recurso de adaptar sua capacidade de transmissão, permitindo a alocação de espectro conforme a demanda do tráfego.

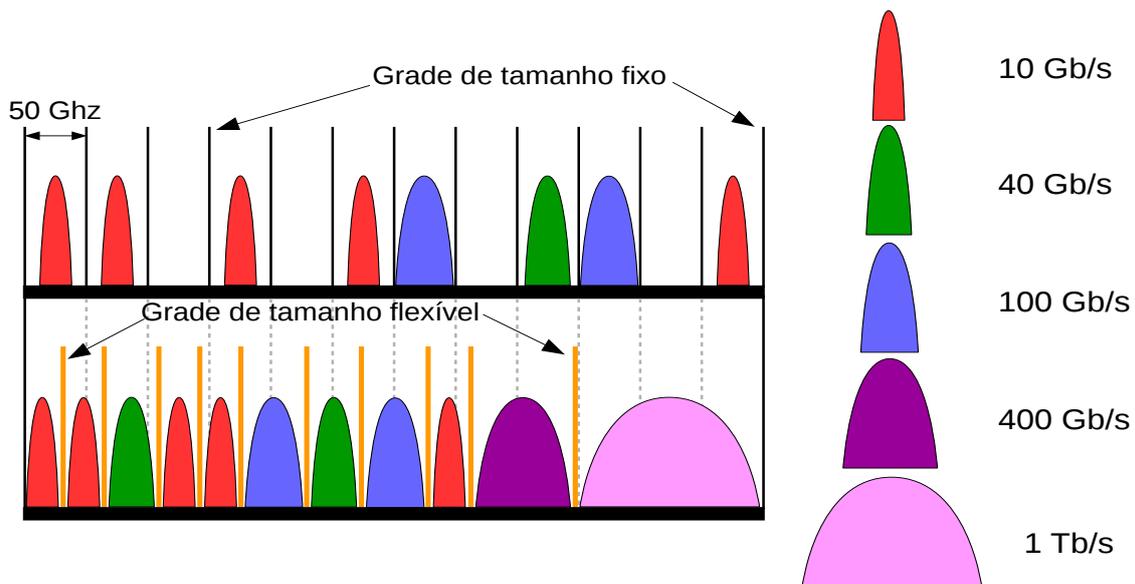


Figura 2.1: Comparação entre os canais ópticos de redes com grade fixa e flexível.

2.1 Princípio OFDM

A tecnologia que permite que os canais ópticos das redes EON tenham a capacidade de se ajustar conforme a demanda do tráfego requisitado é o OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*).

2.1.1 História do OFDM

O OFDM surgiu a partir de pesquisas para a utilização de frequências ortogonais para a transmissão sem fio [19]. A proposta para gerar os sinais ortogonais usando uma FFT (*Fast Fourier Transform*) surgiu em 1969 [20]. O prefixo cíclico (*Cyclic Prefix (CP)*), que é um aspecto importante de todas as implementações práticas do OFDM, foi proposto

em 1980 [21]. Estes são os três aspectos principais que formam a base da maioria dos sistemas OFDM [10].

Contudo, o OFDM só começou a ser aplicado em meados da década de 1980 para comunicações móveis [22]. Desde então, esta técnica vem sendo considerada para ser empregada em radiodifusão, em transmissão digital sobre linhas de telefone e em redes locais sem fio.

2.1.2 Princípio da Ortogonalidade

A técnica de transmissão OFDM surgiu como uma evolução da convencional técnica de Multiplexação por divisão de frequência, ou do inglês FDM, na qual, ao invés de se utilizar bandas de guarda para a separação das subportadoras na recepção do sinal, trabalha-se com uma particular sobreposição espectral de subportadoras, como pode ser observado na Figura 2.2 [23]. Pode-se observar o ganho de espectro em relação a técnica FDM convencional.

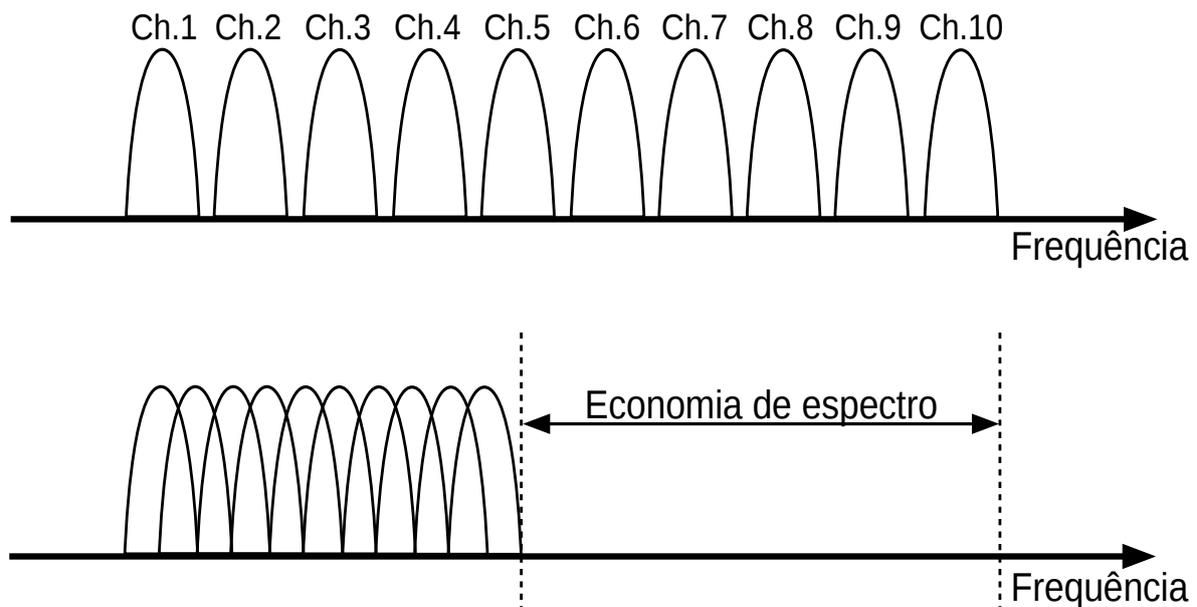


Figura 2.2: Comparação entre as técnicas FDM e OFDM.

Do ponto de vista do espectro, a sobreposição das subportadoras ocorre devido a condição ortogonal entre as mesmas. Essa condição é satisfeita quando o espaçamento entre as subportadoras é cuidadosamente selecionado de forma que o ponto de pico de uma subportadora corresponde ao ponto zero das demais subportadoras do canal e, portanto, não interfira na comunicação como pode ser observado na Figura 2.3(a). Esta ortogonalidade

leva a um uso mais eficiente dos recursos espectrais, que é limitado para a maioria dos meios de comunicação.

O sinal no domínio do tempo é uma síntese de múltiplas formas de onda de subportadoras, e consiste de um fluxo contínuo de símbolos OFDM que têm um período de símbolo normal, como pode ser observado na Figura 2.3(b) [11].

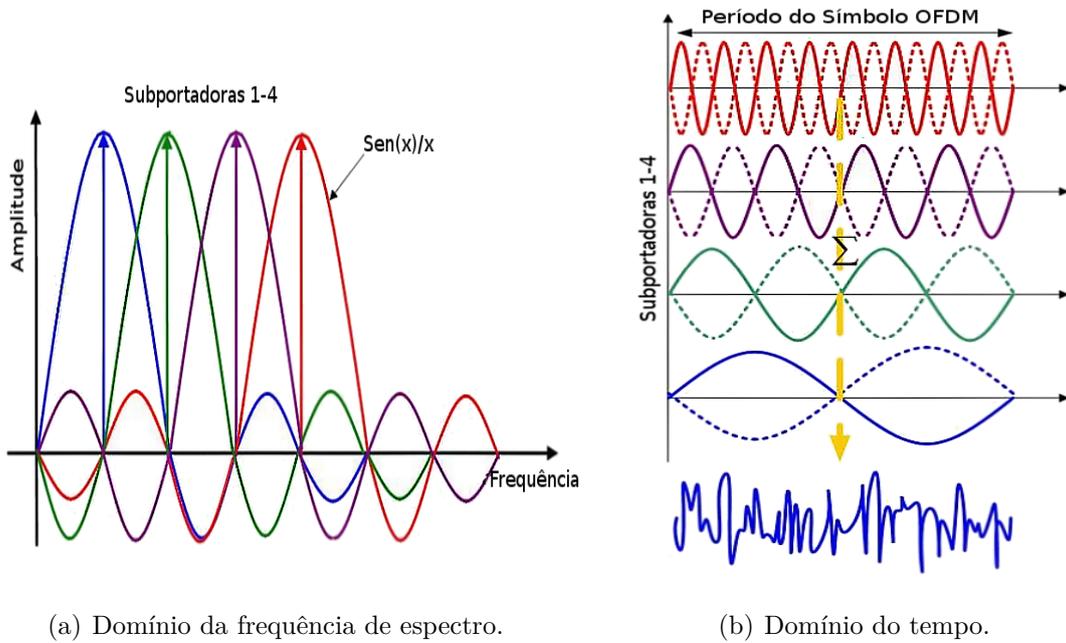


Figura 2.3: Domínio da frequência de espectro e do tempo de um sinal OFDM com 4 subportadoras: a) Domínio da frequência de espectro; b) Domínio do tempo.

Como já mencionando, o OFDM é uma classe especial do esquema de modulação de portadoras múltiplas (*Multi-Carrier Modulation* (MCM)) com ortogonalidade entre cada subportadora. Um sinal geral de modulação de portadoras múltiplas $s(t)$ está representado como [10, 8, 11]:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_{sc}} c_{ki} s_k(t - iT_s) \quad (2.1)$$

$$s_k(t) = \Pi(t) e^{j2\pi f_k t} \quad (2.2)$$

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & (0 \leq t \leq T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases} \quad (2.3)$$

onde c_{ki} é o i -ésimo símbolo na k -ésima subportadora, s_k é o formato de onda para a k -ésima subportadora, N_{sc} é o número de subportadoras, f_k é a frequência da k -ésima subportadora, T_s é o período do símbolo e $\Pi(t)$ é a função que forma o sinal. O detector de cada subportadora utiliza um filtro que corresponde ao seu formato de onda no qual o símbolo detectado c'_{ki} é representado por:

$$c'_{ki} = \int_0^{T_s} r(t - iT_s) s_k^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) e^{-j2\pi f_k t} dt \quad (2.4)$$

na qual $r(t)$ é o sinal recebido no domínio do tempo. A abordagem OFDM tem sua ortogonalidade originada da correlação direta entre duas subportadoras, representada por:

$$\delta_{kl} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_k s_l^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{j2\pi(f_k - f_l)t} dt = e^{j\pi(f_k - f_l)T_s} \frac{\text{sen}(\pi((f_k - f_l)T_s))}{\pi((f_k - f_l)T_s)} \quad (2.5)$$

Se a condição a seguir for satisfeita:

$$f_k - f_l = m \frac{1}{T_s} \quad (2.6)$$

então as duas subportadoras são ortogonais entre si. Isso significa que esse conjunto de subportadoras ortogonais, com frequências espaçada em múltiplos do inverso do período de símbolos, podem ser recuperadas através de filtros da Equação 2.4 sem interferência, apesar da forte sobreposição espectral [11].

A modulação e a demodulação podem ser implementadas usando uma transformada de Fourier discreta inversa (*Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT)) e a transformada de Fourier discreta (*Discrete Fourier transform* (DFT)), respectivamente [24]. O valor discreto do sinal OFDM transmitido por $s(t)$ é uma IDFT de N pontos de símbolo de informação $c(k)$, e o símbolo de informação recebida $c'(k)$ é uma DFT de N pontos de amostragem recebido o sinal $r(T)$. As transformadas rápidas de Fourier (IFFT/FFT) são comumente utilizadas na modulação e demodulação de sinal OFDM para a redução de complexidades [11].

2.1.3 Técnicas para interferência

Em redes ópticas, a velocidade da fase de um impulso óptico depende da sua frequência. Frequências diferentes impõem pulsos ópticos com velocidades diferentes e à medida que o pulso óptico é percorrido pela fibra ocorre o fenômeno de dispersão, em outras palavras, um atraso de propagação.

Devido a este fenômeno, um símbolo OFDM com grande atraso, depois de percorrer uma longa distância na fibra, poderá cruzar o limite de outro símbolo OFDM vizinho causando uma interferência. Essa interferência é chamada pela literatura de interferência entre símbolos (ISI). Além disso, devido ao atraso de propagação e a interferência entre símbolos OFDM, a ortogonalidade das subportadoras não será garantida, resultando em uma penalidade de uma interferência entre subportadoras, denominada *Inter-Carrier Interference* (ICI) [25].

Um das técnicas que permite contornar estes problemas é a inserção de uma banda de guarda (*Guard Interval* (GI)) e um prefixo cíclico (CP) [8] como mostra a Figura 2.4. Para lidar com a ISI o intervalo de guarda é projetado de tal forma que os componentes multipercurso de um símbolo OFDM não possam interferir na recepção do símbolo OFDM vizinho. Se o intervalo máximo de atraso do canal de transmissão for menor que o intervalo de guarda então a ISI pode ser completamente eliminada.

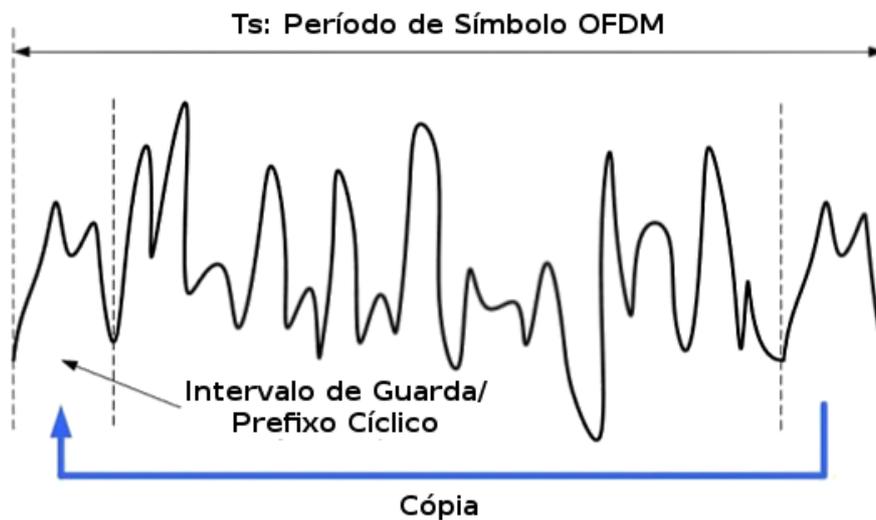


Figura 2.4: Banda de Guarda e Prefixo Cíclico de um símbolo OFDM.

A ICI pode ser reduzida através da inserção de um prefixo cíclico (CP) para a banda de guarda. O CP é uma cópia do início de cada símbolo corrente no final. Isso assegura

que o símbolo OFDM possa ser completamente demodulado embora haja as imperfeições e atrasos no canal de transmissão.

O comprimento GI/CP é determinado pela difusão do atraso máximo induzido pela dispersão do canal. Uma vez que o GI/CP é usado, introduz-se uma sobrecarga adicional ao espectro. Uma abordagem convencional para minimizar essa sobrecarga é usar muitas subportadoras em um mesmo conjunto de transmissão [26].

2.1.4 Sistema OFDM

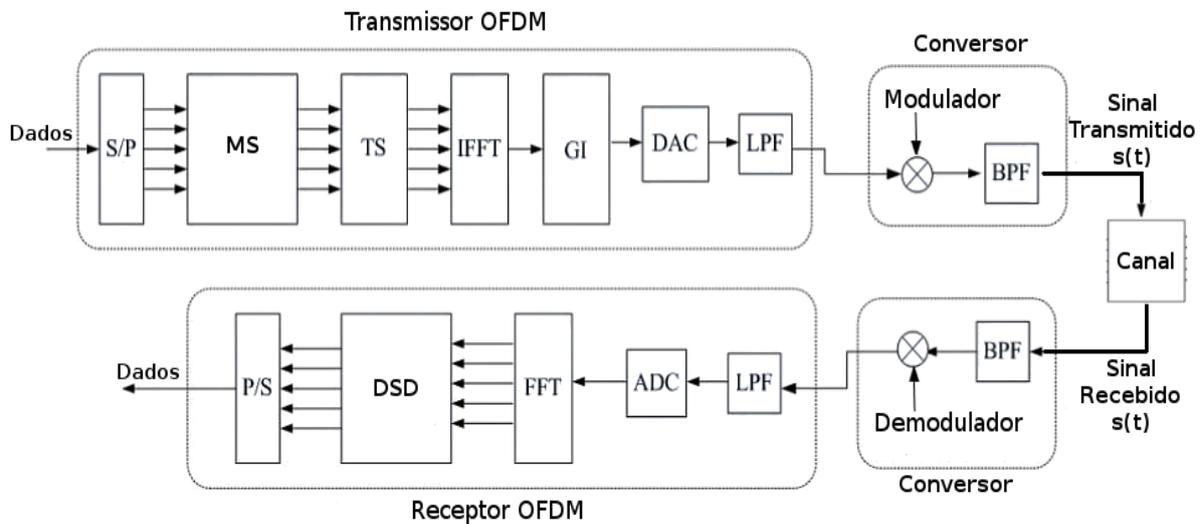


Figura 2.5: Diagrama de um sistema OFDM.

O diagrama da Figura 2.5 exemplifica o funcionamento de sistema OFDM. No transmissor, os dados são convertidos de serial para paralelo pelo conversor S/P, onde cada sinal é mapeado em símbolos (MS) de informação para as subportadoras OFDM. Em seguida, os símbolos são inseridos para a estimativa do canal (TS) e posteriormente são inseridos paralelamente em subportadoras ortogonais e convertidos no sinal OFDM no domínio do tempo através de um IFFT.

Um intervalo de guarda (GI) e um prefixo cíclico (CP) é adicionado para evitar dispersão do canal, então o sinal é convertido de digital para analógico (DAC) e um filtro *anti-aliasing* (*Low-Pass Filter* (LPF)) é aplicado produzindo o sinal OFDM de banda base. O sinal de banda base pode ser convertido para uma banda passante de frequência de rádio (RF) com alguma modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ou PSK (*Phase Shift Keying*) e novamente um filtro de banda passante é aplicado (BPF) para o uso no canal.

No receptor o sinal OFDM é convertido de banda passante para banda base através de um demodulador, depois convertido de analógico para digital (ADC) e em seguida o sinal é demodulado por uma FFT. Os sinais demodulados passam por um módulo de decisão (DSD) para obter o símbolo e, finalmente, os canais múltiplos de dados são convertidos de volta para um único fluxo de dados paralelo para serial através do P/S.

2.1.5 Vantagens e Desvantagens do OFDM

As vantagens que a tecnologia OFDM oferece são essenciais para os sistemas de transmissão da Internet do Futuro, são elas [11]:

1. Solução efetiva para casos de interferência entre símbolos causada por um canal dispersivo com alta robustez frente ao ISI.
2. OFDM é altamente flexível para a migração de novas abordagens de transmissão de dados devido às características intrínsecas das subportadoras OFDM.
3. Aumento da capacidade de transmissão devido à sobreposição de espectro.
4. Eficiência no uso do espectro devido à sobreposição de subportadoras e modulação adaptativa QAM ou PSK.
5. Eficiência energética através do melhor uso de recursos da rede.

A principal desvantagem do OFDM é o alto *Peak to Average Power Ratio* (PAPR), que causa distorção no sinal transmitido. O PAPR é definido como a razão entre a potência máxima instantânea e a potência média do sinal transmitido. Os picos do sinal transmitido ficam distorcidos devido a uma combinação construtiva entre as subportadoras tornando o processo de equalização complexo. Outro problema é a restrição de ortogonalidade, que por sua vez, é mais sensível a ruídos do canal de transmissão. Estes problemas, apresentam dificuldades na concepção do sistema OFDM, e são, conseqüentemente, temas de intensa investigação [11].

2.1.6 O-OFDM

O-OFDM (*Optical-OFDM*) [12] é a tecnologia que permite alcançar a eficiência dos recursos espectrais ópticos através do uso da tecnologia OFDM em meio óptico. As subportadoras são combinadas arbitrariamente tornando a largura de banda do caminho óptico variável [11]. O OFDM óptico é altamente eficiente em termos de formato de modulação de espectro fornecendo comprimentos de ondas escaláveis e flexíveis através da granularidade da subportadora.

Existem diversas formas de implementação do O-OFDM [27]. Diferentes classificações para descrever os esquemas O-OFDM foram especificados. A Figura 2.6 apresenta uma classificação em duas dimensões: Mecanismo de Síntese de Sinal (abordagem elétrica e óptica) e Mecanismo de Detecção de Sinal (detecção direta e coerente), respectivamente [11]. Cada esquema é dividido em duas abordagens e cada abordagem é descrita a seguir:

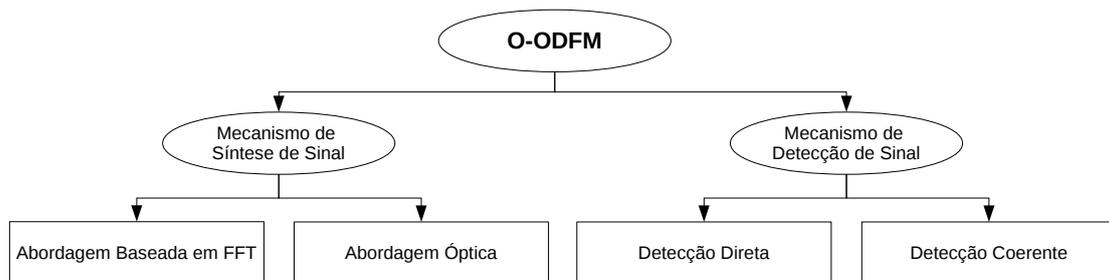


Figura 2.6: Tipos de O-OFDM.

Abordagem Baseada em FFT As subportadoras são geradas no domínio digital usando uma IFFT. O transmissor O-OFDM converte o sinal elétrico para o sinal óptico e o receptor converte o sinal óptico para o sinal elétrico usando uma FFT. Esta abordagem tem a vantagem ser simples, no entanto bandas de guarda introduzem sobrecarga ao sistema [28].

Abordagem Óptica O sinal O-OFDM é gerado diretamente no domínio óptico por meio da modulação de várias subportadoras OFDM, sem o processamento elétrico IFFT. A principal vantagem dessa abordagem é que os componentes eletrônicos ADC/DAC são eliminados [29].

Detecção Direta No *Direct-Detection Optical OFDM* (DDO-OFDM) a amplitude do sinal OFDM é transformada em intensidade óptica e a portadora é transmitida juntamente com a banda base para que a detecção no transmissor seja realizada utilizando um fotodiodo, passando o sinal para o domínio elétrico e tornando sua implementação mais simples [10].

Detecção Coerente Semelhante a abordagem baseada em FFT, o *Coherent Orthogonal frequency-division multiplexing* (CO-OFDM) mistura uma interferência, gerada por um oscilador, com o sinal recebido para que os sinais ópticos analógicos contêm toda a informação de amplitude, fase e polarização antes que sejam recebidos

pelo fotodetector. Essa abordagem torna a implementação bem complexa, no entanto melhora a performance na sensibilidade do receptor, aumentando o alcance, a eficiência espectral e a robustez contra dispersão [8].

O desempenho superior do CO-OFDM o torna um excelente candidato para os sistemas de transmissão de longa distância, enquanto DDO-OFDM é mais adequado para aplicações de curto alcance de baixo custo. O CO-OFDM é a abordagem utilizada do decorrer deste trabalho.

2.2 Modelo de Rede

Devido ao rápido crescimento dos serviços e aplicações emergentes da Internet espera-se que as diversas demandas de tráfego das redes ópticas variem de Gb/s até Tb/s. Além disso, o tráfego atual de aplicações multimídia, TV de alta definição, computação em nuvem e aplicações de rede em tempo real estão exigindo cada vez mais diferentes granularidades de tráfego com taxas de *bits* flexíveis e padrões geográficos de trânsito imprevisíveis [4].

Apesar das arquiteturas de redes ópticas atuais baseadas em WDM oferecerem alta capacidade de transmissão e comutação de comprimento de onda reconfigurável, elas também apresentam desvantagens de largura de banda rígida e baixa granularidade. Estas desvantagens podem levar ao uso ineficiente dos recursos espectrais da fibra óptica, pois cada demanda ocupará um canal de transmissão mesmo que esta seja menor que a capacidade do canal. Estes problemas devem se tornar ainda mais significativos com o passar dos anos e a evolução das aplicações de rede.

Por outro lado, o aumento da taxa de transmissão para além de 100 Gb/s, por exemplo, 400 Gb/s e 1 Tb/s, não é viável para redes WDM tradicionais, pois a mesma adota um espaçamento de canal de 50 GHz para transmissão de dados e este não é capaz de adotar transmissões com alta taxa de *bits* por longas distâncias [30]. Por esses motivos, a rede de fibra óptica deve suportar o provisionamento de largura de banda flexível, a fim de acomodar o tráfego no futuro.

Para atender às necessidades futuras de tráfego da Internet e tratar adequadamente esse desafio 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 [6]. As redes ópticas elásticas (EON) devem possuir taxa de dados flexíveis com alta eficiência no uso dos recursos.

2.2.1 Arquitetura

O objetivo de uma rede EON é prover o transporte eficiente de dados através do uso de um algoritmo de roteamento e alocação de espectro RSA [18]. Nesta rede, os recursos espectrais necessários para uma dada rota são divididos do total disponível e alocados adaptativamente ao caminho óptico. Para a implementação desta nova arquitetura, novos dispositivos deverão ser desenvolvidos. Também será um desafio o controle e o gerenciamento da rede, incluindo o estabelecimento de caminhos ópticos elásticos.

A arquitetura EON baseada em OFDM é composta por transmissores de largura de banda variável (*Bandwidth-Variable Transponder* (BVT)) e por comutadores WXC (*Wavelength Cross-Connects*) de banda variável, denominados BV-WXC (*Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects*), que permitem o estabelecimento de caminhos ópticos com grade flexível [18]. Sua arquitetura pode ser observada na Figura 2.7.

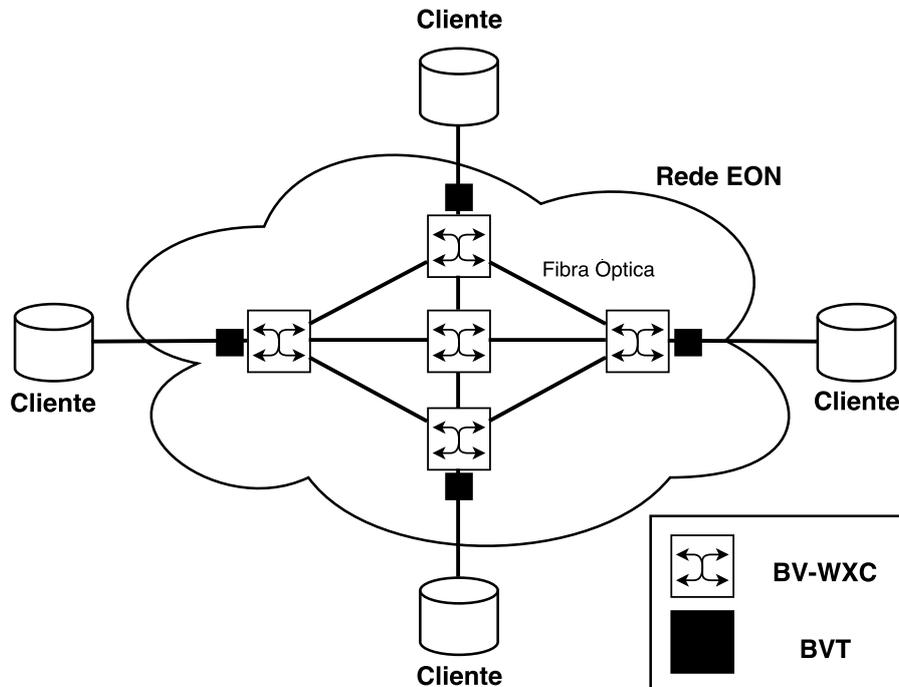


Figura 2.7: Arquitetura das redes ópticas elásticas baseadas em OFDM.

2.2.2 BVT

Os BVTs são responsáveis por alocar espectro suficiente para acomodar cada demanda. Um número arbitrário de subportadoras OFDM podem ser fundidas para formar um super-canal, denominado caminho óptico, transportando os dados sem bandas de guarda

no espectro. Dessa forma, os BVTs criam caminhos ópticos com largura de banda flexível permitindo o ajuste dos recursos ópticos de acordo com a demanda necessária [11].

Um caminho óptico elástico pode transmitir múltiplas taxas de dados, pois seu tamanho é alocado de acordo com a demanda requisitada mediante o ajuste do número de subportadoras utilizadas. Através do ajuste da luz com diferentes frequências de oscilação é possível controlar o número de subportadoras utilizadas em cada caminho óptico. A Figura 2.8 apresenta um exemplo de provisionamento de largura de banda elástica no domínio do espectro através do controle do número de subportadoras usadas, a taxa de transmissão aumenta à medida que mais subportadoras são utilizadas. [18, 31, 12].

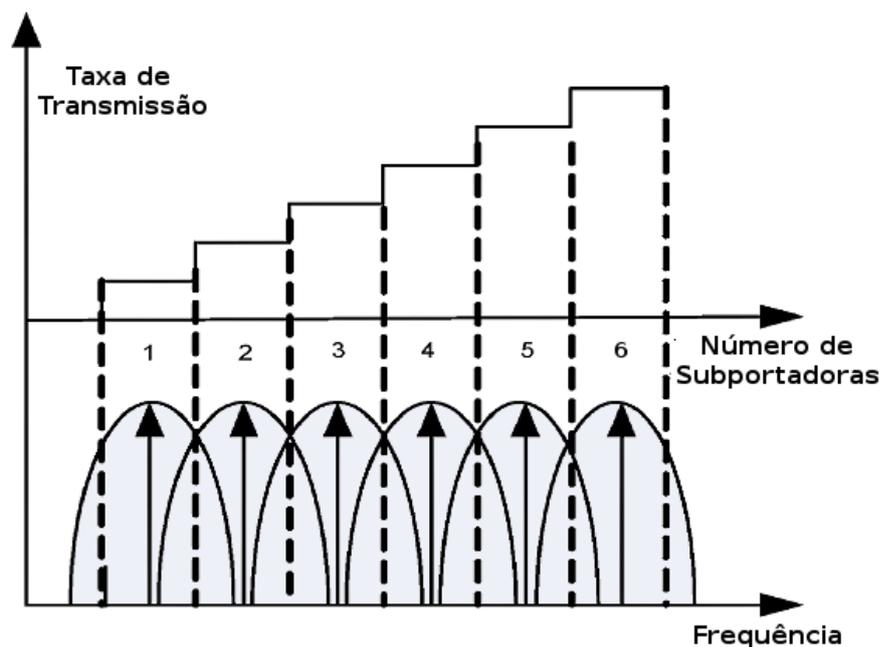


Figura 2.8: Provisionamento de largura de banda no domínio do espectro.

Os BVTs possuem uma capacidade máxima de utilização de subportadoras, todavia, quando um BVT opera com um número de subportadoras menor que sua capacidade máxima seus recursos são desperdiçados [32]. Com o propósito de solucionar este problema os SBVTs (*Sliceable Bandwidth-Variable Transponder*) foram apresentados e são vistos como uma tecnologia promissora para os transmissores EON [33, 34].

A Figura 2.9 mostra a distinção das funcionalidades do BVT e do SBVT. Um SBVT é capaz de alocar sua capacidade em um ou vários fluxos ópticos que são transmitidos a um ou vários destinos. Portanto, quando um SBVT é usado para gerar um caminho óptico de baixa taxa de bits, a sua capacidade não utilizada pode ser explorada para a transmissão de outros fluxos de dados independentes. Um SBVT gera múltiplos fluxos ópticos que

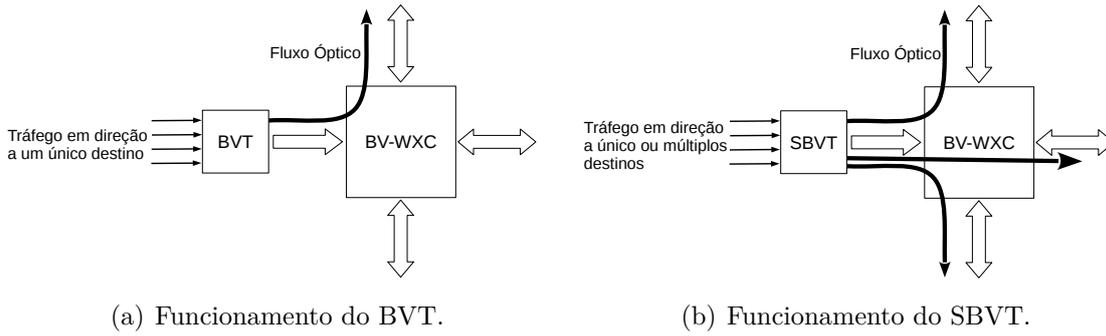


Figura 2.9: Funcionamento do BVT e do SBVT.

podem ser flexivelmente associados com o tráfego que vem a partir das camadas superiores de acordo com a exigências do tráfego. Desse modo, os fluxos ópticos podem ser agregados ou podem ser divididos em função das necessidades de tráfego apoiando o uso de múltiplas taxas de bits, múltiplos formatos de modulação, e taxas de código adaptativos [35].

2.2.3 BV-WXC

Os BV-WXC 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. Quando os BVTs aumentam a taxa do tráfego, cada BV-WXC na rota deve expandir sua janela de comutação, permitindo assim uma taxa de dados variável em cada caminho óptico [11]. A Figura 2.7 mostra a arquitetura das redes ópticas elásticas baseadas em OFDM. Pode-se observar que os BVTs, responsáveis por estabelecer os caminhos ópticos de acordo com a demanda requisitada, localizam-se nas bordas da rede e os BV-WXC, responsáveis por estabelecer o caminho óptico fim-a-fim, localizam-se no núcleo da rede [18].

O tradicional filtro seletivo de comprimento de onda (*Wavelength-Selective Switch* (WSS)) utilizados nas redes WDM não poderá mais atender as exigências da rede EON, pois o WSS foi projetado para um espaçamento de canal fixo [36]. O *Bandwidth-Variable Spectrum-Selective Switch* (BV-SSS) é o filtro que pode atender as exigências da rede EON. Sua tecnologia permite agrupar granularidades de comutação próximas, acomodando a largura do canal de maneira flexível, como pode ser visto na Figura 2.10 [18].

Através dos BV-SSSs, um BV-WXC pode ser construído, como mostra a Figura 2.11. O BV-WXC pode assumir dois tipos de arquitetura: (i) difusão e seleção (*broadcast-and-select*) [18] ou (ii) não difusão e seleção (*non-broadcast-and-select*) [37]. A estrutura do BV-WXC precisa suportar as seguintes características [38]:

1. Retirada e inclusão para todos os comprimentos de onda (*colorless*);

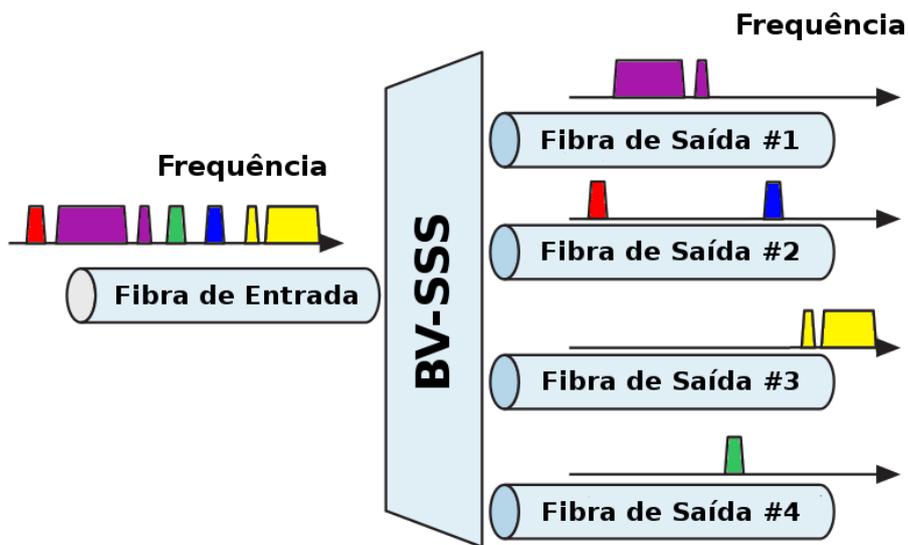
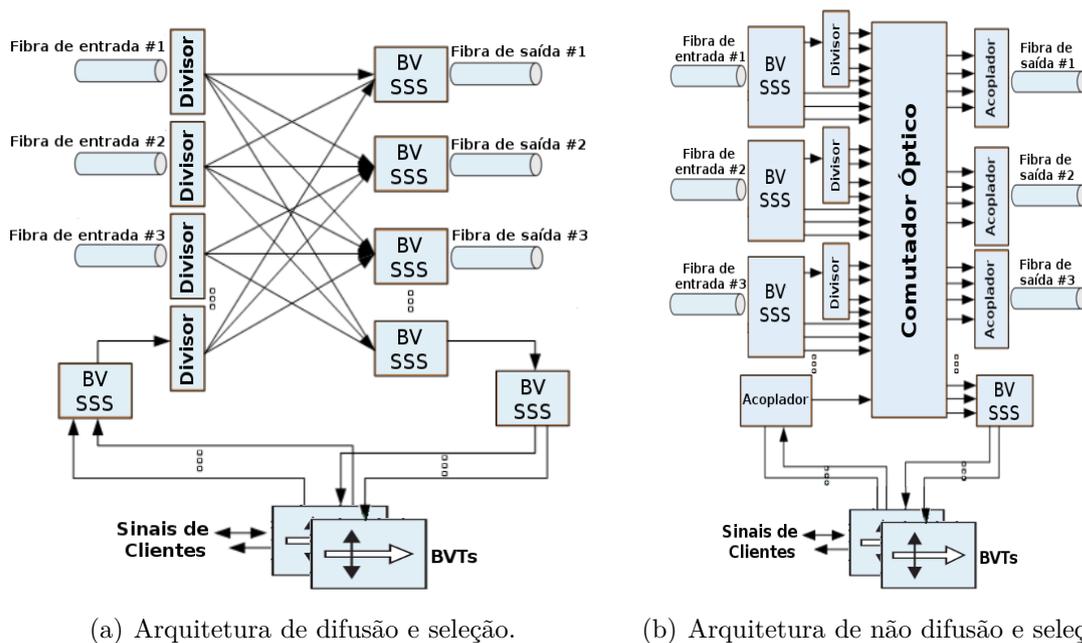


Figura 2.10: Representação do BV-WSS.



(a) Arquitetura de difusão e seleção.

(b) Arquitetura de não difusão e seleção.

Figura 2.11: Arquitetura de um BV-WXC: a) arquitetura de difusão e seleção; b) arquitetura de não difusão e seleção.

2. Retirada e inclusão para qualquer comprimento de onda para qualquer direção (*directionless*);
3. Retirada e inclusão de um mesmo comprimento de onda para diferentes direções (*contentionless*)

Na arquitetura de difusão e seleção (Figura 2.11(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 2.11(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.

2.3 Representação do Espectro

Os canais das redes ópticas de grade fixa WDM seguem a recomendação do padrão G.694.1 da ITU-T [39]. A Figura 2.12 apresenta as granularidades atualmente utilizadas e especificadas pela recomendação. A rigidez desta grade aliada a sua granularidade esparsa não é conveniente para abordagem flexível, pois diminui o número de arranjos que se pode formar de subportadoras OFDM.

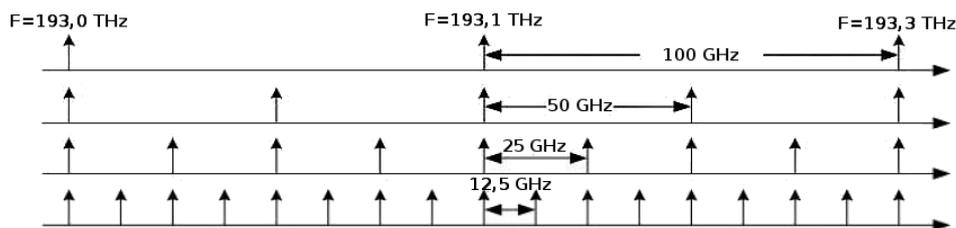


Figura 2.12: Granularidades da atual recomendação ITU-T para redes WDM.

A abordagem flexível necessita de uma especificação de espectro com ranhura (tamanho de *slot*) flexível para acomodar de forma eficiente o volume de tráfego heterogêneo das aplicações emergentes, obtendo uma maior flexibilidade na alocação destes recursos. Foi proposta uma especificação que eleva o potencial espectral do padrão G.694.1 da ITU-T dividindo o espectro óptico em uma ranhura ainda menor [40]. Essa especificação propõe dividir a granularidade de 12,5 GHz para 6,25 GHz aumentando ainda mais a granularidade do espectro. Neste contexto, atualmente existem dois candidatos para a especificação flexível (i) a abordagem de *slot* único (*single slot on the grid approach*) e (ii) a *slot* dividido (*double-sided half slot approach*). A Figura 2.13 apresenta as duas abordagens.

A abordagem de *slot* único (Figura 2.13(a)) atribui uma frequência central e granularidade de 12,5 GHz para um *slot*. Essa abordagem utiliza o mesmo padrão de frequência da ITU-T e assim é totalmente compatível com a especificação da grade de espectro atual. A abordagem de *slot* dividido (Figura 2.13(b)) atribui uma granularidade de 6,25 GHz por

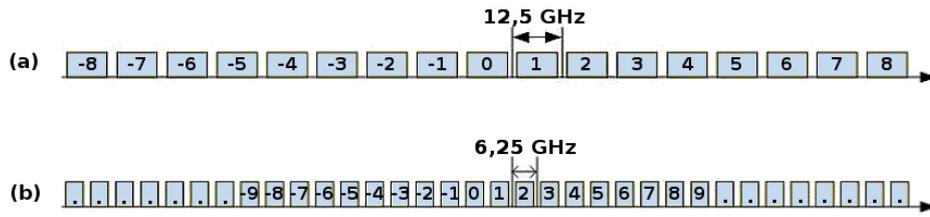


Figura 2.13: Abordagens adotadas para redes EON: a) abordagem de *slot* único; b) abordagem de *slot* dividido.

slot, que por sua vez, não é compatível com a especificação ITU-T. Essa abordagem prevê uma maior flexibilidade para a alocação de banda, pois aumenta o número de arranjos de subportadoras OFDM [40]. Com o propósito de manter a compatibilidade do padrão ITU-T, a abordagem de *slot* único foi adotada neste trabalho.

Uma representação gráfica do uso do espectro através de *slots* de frequência pode ser vista na Figura 2.14. Pode-se observar que os sinais de diferentes caminhos ópticos (denotados como “1”, “2”, “3”) são multiplexados no domínio da frequência. Nesta representação, o espectro é dividido em um número de *slots* com tamanho igual ao número de subportadoras OFDM, dessa forma, cada *slot* representa uma subportadora OFDM e sua ranhura representa o tamanho espectral respectivo da subportadora.

Como já mencionado, um caminho óptico utiliza um número arbitrário de subportadoras (*slots*) contíguas, tendo em vista que subportadoras adjacentes sobrepõem-se no domínio do espectro e por sua vez são ortogonalmente moduladas de modo a aumentar a eficiência do espectro. Uma banda de guarda com G *slots* deve separar os caminhos ópticos no domínio do espectro para atender as limitações da tecnologia OFDM apresentadas na Seção 2.1.3.

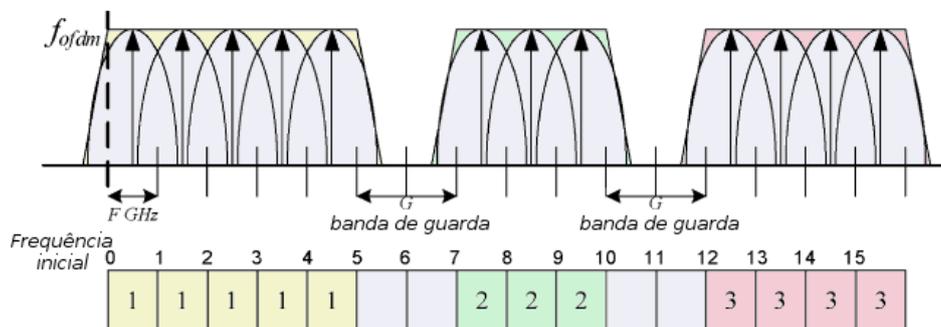


Figura 2.14: Representação da alocação de espectro através de *slots*.

2.4 Formato de Modulação e Distância Adaptativa

Nas redes ópticas elásticas, o formato de modulação também permite o ajuste flexível da largura de banda. O conceito de distância adaptativa em redes EON advém do formato de modulação utilizado em cada subportadora OFDM. Em particular, cada subportadora OFDM pode ser modulada individualmente utilizando um modulador diferente e consequentemente um BVT diferente para cada transmissão [30], por exemplo, um *bit* por símbolo (*Binary Phase Shift Keying* (BPSK)), dois *bits* por símbolo (*Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK)), três *bits* por símbolo (*8 Quadrature Amplitude Modulation* (8QAM)) ou quatro *bits* por símbolo (*16 Quadrature Amplitude Modulation* (16QAM)).

Em outras palavras, cada caminho óptico deve ser modulado por um BVT diferente. Dessa forma, o número de subportadoras e o formato de modulação utilizado é ajustável de acordo com a quantidade de tráfego e o alcance óptico requisitado [11].

A escolha do nível de modulação deve levar em consideração a qualidade necessária de transmissão (*Quality of Transmission* (QoT)), e, consequentemente, a tolerância de relação sinal-ruído óptico (*Optical Signal-To-Noise Ratio* (OSNR)) [11, 12]. Uma suposição comum utilizada pela literatura O-OFDM é que a distância de transmissão do caminho óptico é o fator mais relevante na definição da QoT [40, 41, 42], embora a qualidade do canal de transmissão também influencie [43, 44].

Assim, dado o tamanho do caminho óptico pode-se encontrar o nível de modulação mais adequado para obter a melhor eficiência de espectro sem afetar a qualidade de transmissão, como pode ser visto na Figura 2.15. Portanto, transmissões através de caminhos ópticos mais curtos são capazes de utilizar níveis de modulação mais altos e consequentemente carregam mais *bits* por símbolo por subportadora [12].

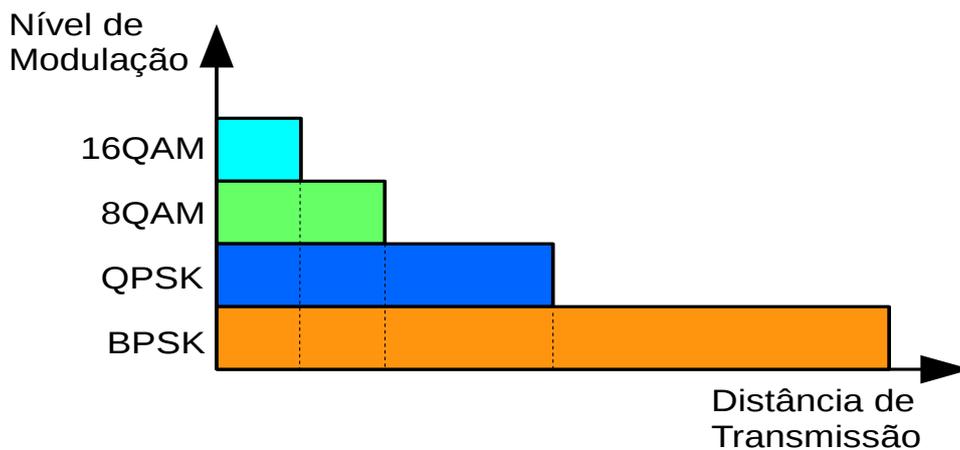


Figura 2.15: Nível de modulação em função da distância de transmissão.

Segundo a Lei de Shannon [45], é possível determinar um limite superior teórico sobre a taxa de informações transmitidas em um meio, levando em consideração todas as possíveis técnicas de codificação (multi-fase ou multi-nível), dada uma potência média de sinal e um canal de comunicação sujeito a um ruído. Segundo Shannon, a capacidade de um canal em bits por segundo C é dado de acordo com a Equação 2.7:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.7)$$

onde, B é a largura de banda do canal em hertz (Hz), S é a potência média do sinal recebido e N é o ruído médio. A relação S/N representa a relação sinal-ruído (*Signal-To-Noise Ratio* (SNR)).

Dessa maneira, a banda passante de um canal está, portanto, intimamente relacionada ao tamanho do espectro de cada subportadora OFDM (ranhura do *slot*) e sua modulação adotada. Dessa forma, de acordo com a Equação 2.7, pode-se obter a Equação 2.8 [46]:

$$B = \frac{C}{\log_2 M} \quad (2.8)$$

onde, B é a largura do espectro da subportadora OFDM em GHz, C é a taxa de dados em Gbps e M é o nível de modulação M-QAM ou M-PSK, tendo em vista a relação SNR do nível de modulação adotado. Em outras palavras, M é o número de fases/níveis usados para codificar um determinado número de *bits* por símbolo. Portanto, quanto maior o nível de modulação, maior será a banda passante da subportadora OFDM e menor será seu alcance de acordo com a tolerância OSNR e o fator QoT. A Tabela 2.1 mostra as relações de tamanho de espectro da subportadora, banda passante e alcance tolerável para os diferentes níveis de modulação adotados pela literatura EON segundo [40, 12, 47]. É necessário destacar que o alcance tolerável de cada tipo de modulação diverge bastante na literatura e eventuais regeneradores de sinal ampliam ainda mais o alcance tolerável.

Pode-se observar que para a mesma taxa de dados a modulação 16QAM transporta duas vezes o número de *bits* por símbolo da modulação QPSK, e, conseqüentemente, requer a metade da largura de banda de espectro, no entanto, seu alcance é um quarto do alcance da modulação QPSK.

O regime de atribuição de espectro com distância adaptativa permite a eficiência no uso do espectro aumentando o número de *bits* modulados por símbolo. Dessa forma, na arquitetura BVT, um dado caminho óptico deve utilizar o mesmo nível de modulação para todas as suas subportadoras, independentemente do seu número, ao longo de todo o seu percurso [30]. No entanto, na arquitetura SBVT esta restrição já não é mais aplicável,

Tabela 2.1: Relação do tamanho do espectro, banda passante e alcance tolerável das subportadoras ODFM.

Espectro	25GHz	12,5GHz	10GHz	6,25GHz	5GHz	
Modulação	Banda passante					Alcance
BPSK	25Gbps	12,5Gbps	10Gbps	6,25Gbps	5Gbps	>3000 km
QPSK	50Gbps	25Gbps	20Gbps	12,5Gbps	10Gbps	até 3000 km
8QAM	75Gbps	37,5Gbps	30Gbps	18,75Gbps	15Gbps	até 1500 km
16QAM	100Gbps	50Gbps	40Gbps	25Gbps	20Gbps	até 750 km
32QAM	125Gbps	62,5Gbps	50Gbps	31,25Gbps	25Gbps	até 375 km
64QAM	150Gbps	75Gbps	60Gbps	37,5Gbps	30Gbps	até 187,5 km

um caminho óptico pode utilizar diferentes níveis de modulação para cada subportadora pertencente ao mesmo, de acordo com as limitações físicas do SBVT [35, 33, 32]. Observa-se que este e outros parâmetros relacionados com as características físicas do transmissor e do receptor, tais como interferência e limitações da camada física, também podem afetar a QoT e, assim, a escolha do nível de modulação adequado.

2.5 Benefícios das Redes EON

As redes ópticas elásticas baseadas em OFDM podem trazer diversos benefícios tais como:

1. Suporte a várias acomodações de tráfego, ex.: Gb/s a Tb/s;
2. Provê a eficiência de espectro através da alocação de caminhos ópticos flexíveis de acordo com a demanda;
3. Suporte a uma taxa de banda variável com expansão e contração de espectro através da quantidade de subportadoras ou formato de modulação;
4. Provê eficiência energética através do desligamento de algumas subportadores OFDM quando não há tráfego suficiente para a transmissão;
5. Permite a restauração adaptativa em caso de falhas na rede através da alocação adaptativa de espectro e otimizações de formato de modulação e banda na rede.

A Figura 2.16 mostra os benefícios no uso do espectro das redes ópticas elásticas em comparação a um canal com grade fixa. Observa-se, claramente, o ganho de espectro obtido com o uso das redes ópticas elásticas.

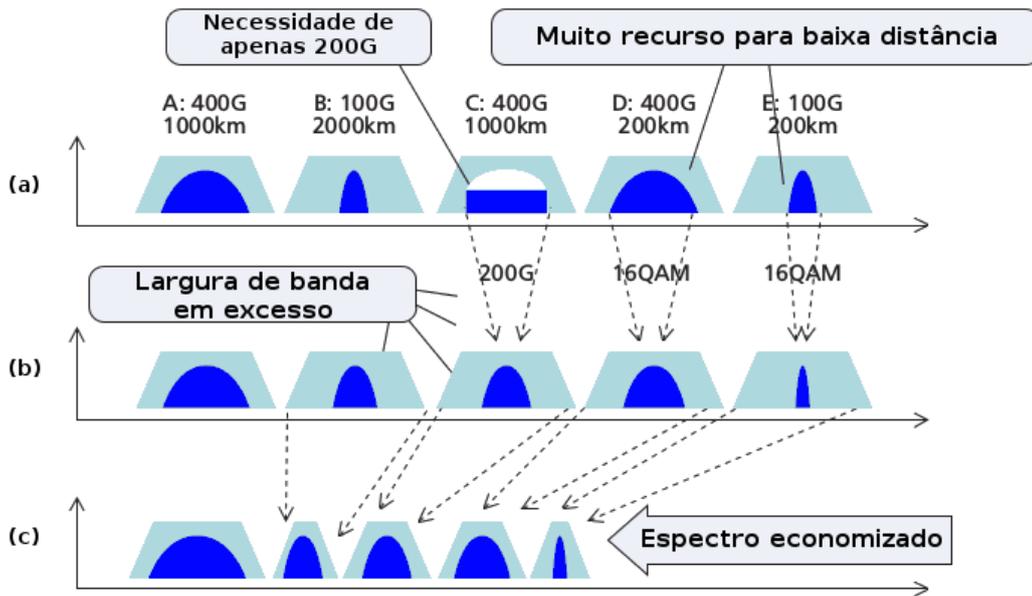


Figura 2.16: Benefícios EON: a) cinco demandas e suas necessidades de espectro em uma rede de grade fixa com modulação QPSK; b) as mesmas demandas, com modulação adaptativa otimizada pela distância; c) As mesmas demandas com espectro flexível.

2.6 Algoritmo RSA

Para estabelecer um caminho óptico com largura de espectro flexível os tradicionais algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de ondas (*Routing and Wavelength Assignment* (RWA)), utilizados nas redes WDM não são mais diretamente aplicáveis. São necessários novos mecanismos para o roteamento e alocação de espectro (*Routing and Spectrum Allocation* (RSA)) [18, 48].

Nos algoritmos RSA, a tradicional restrição de continuidade de comprimento de onda é transformada na restrição de continuidade de espectro. O problema de roteamento e alocação de espectro exige que as subportadoras, pertencentes ao caminho óptico, sejam roteadas de forma contígua utilizando a mesma faixa de espectro ao longo de toda a rota. Caminhos ópticos distintos devem ser separados por uma banda de guarda G para atender as necessidades da tecnologia OFDM, descritas na Seção 2.1.3. A Figura 2.17 apresenta um exemplo de roteamento e alocação de espectro em uma rede EON com quatro nós. No exemplo, o caminho óptico “1” é roteado pelos nós 1,2,4, e está utilizando a mesma faixa de espectro durante toda a rota. Os caminhos ópticos adjacentes são separados por uma banda de guarda G com tamanho de dois *slots*.

Além disso, o formato de modulação e a distância adaptativa fornecida pela tecnologia O-OFDM dá a flexibilidade de escolher formatos de modulação que melhor se adaptam no

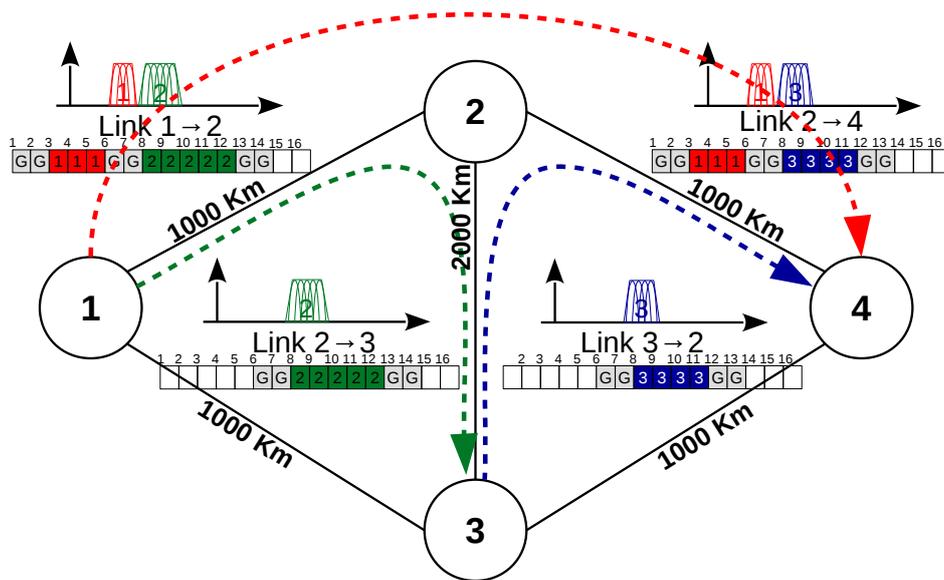


Figura 2.17: Roteamento e alocação de espectro em uma rede EON com quatro nós.

espectro de acordo com a distância de transmissão. Nesse sentido, ainda tomando como exemplo a Figura 2.17 e um tamanho de *slot* igual a 12,5 GHz, considere que o caminho óptico “1” formado por 3 *slots* seja modulado com o nível de modulação QPSK, logo de acordo com a Equação 2.8 sua capacidade é de 75 Gbps. Por outro lado, considerando o caminho óptico “2”, formado por 5 *slots*, sendo modulado com o nível de modulação BPSK, por percorrer uma distância maior na fibra, de acordo com a Equação 2.8 sua capacidade será de 62,5 Gbps. Logo, embora o caminho óptico “2” tenha mais *slots* que o caminho óptico “1”, sua capacidade de banda é inferior. Este é o chamado problema RMLSA (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation*) [12] que leva em consideração os aspectos do formato de modulação de cada subportadora e a distância percorrida na fibra.

2.6.1 Complexidade do RSA

Para analisar a complexidade do problema RSA é necessário analisar tanto a decisão de roteamento quanto a alocação de subportadoras contíguas no espectro. Se o roteamento já é conhecido, ou pré determinado, o RSA se transforma no problema de alocação de espectro estático (*Static Spectrum Allocation (SRA)*).

O problema RSA é NP-Difícil [13]. Para comprovar isto é necessário provar que todos os problemas da classe NP se reduz a ele em tempo polinomial [49]. Em outras palavras, se ao menos um problema NP-Completo se reduzir ao problema RSA, então ele é NP-Difícil.

Para isso, utiliza-se o problema SRA. O objetivo é provar que o o problema SRA é NP-Completo através da sua ligação com o problema tradicional de estabelecimento de caminhos ópticos estático (*Static Lightpath Establishment (SLE)*) em WRNs (*Wavelength Routed Network*), que é NP-Completo [50].

Dado o grafo $G(V, E, P)$, onde V representa o número de nós, E o número de enlaces direcionais entre os nós $\in V$ e P o conjunto de subportadoras em cada fibra tal que $|P| = \phi$.

Definição do problema SRA: - Dado um grafo $G(V, E, P)$, e um conjunto predefinido de caminhos de espectro $SP = \{ \langle p_i, t_i \rangle \}$, onde p_i é o caminho da demanda i e t_i é o tamanho (em número de subportadoras) do espectro da demanda i , é possível alocar cada caminho do conjunto SP usando subportadoras contíguas e bandas de guarda entre cada demanda?

Teorema 1: O problema SRA é NP-Completo.

Para provar o Teorema 1 basta provar que **(i)** SRA é NP e **(ii)** que SLE é redutível a SRA.

(i) SRA \in NP:

Dado um conjunto $C = \{ \langle b_i, e_i \rangle \}$ para cada p_i , representando as combinações possíveis que atendem t_i , onde b_i e e_i são , respectivamente, o início é o término do índice das subportadoras pertencentes ao caminho p_i . Utiliza-se o verificador V para cada entrada de C tal que:

1. Verifica se cada entrada $\langle b_i, e_i \rangle$ satisfaz a demanda t_i de tráfego e o índice não é maior que ϕ .
2. Verifica se cada p_i é separado por bandas de guarda entre qualquer outro p_j que partilha o mesmo canal.
3. Se os itens 1 e 2 forem aceites, então aceita a demanda p_i , caso contrário rejeita.

Dessa forma, o verificador V é executado em tempo $O(|SP| + |SP|^2)$ que é polinomial ao tamanho do problema e, por sua vez, SRA \in NP

(ii) O problema SLE é redutível ao problema SRA:

Dado um problema SLE [50] com grafo $G(V, E, W)$, onde W é o número de comprimentos de onda por fibra, tal que $|W| = \omega$ e um conjunto LS representando os caminhos ópticos já definidos. Pode-se reduzi-lo a um problema SRA com a seguinte construção:

1. Dado o problema SRA com $G(V, E, P)$, tal que $|W| = |P|$ e um conjunto de caminhos de espectro SP, então para qualquer demanda $\in LS$ ao longo do caminho p_i tem-se uma demanda $\in SP$. Dessa forma, cada comprimento de onda é representado no problema SRA por uma subportadora.

Assumindo que a banda de guarda no problema SRA tenha tamanho igual a 0, é fácil ver que o problema SLE é tão difícil quanto o problema SRA. Logo o problema SLE tem solução se somente se o problema SRA construído também tenha.

Portanto o Teorema 1 está provado e o problema SRA é NP-Completo [13]. Através das provas (i) e (ii), pode-se observar que por si só o problema de alocação de espectro é difícil. O problema RSA é ainda mais desafiador uma vez que a decisão de roteamento também deve ser considerada em conjunto. Para provar que o problema RSA é NP-Difícil, basta reduzir um problema NP-Completo para ele, neste caso o problema SRA. Como o problema SRA é visivelmente redutível ao problema RSA quando a rota já é definida, então conclui-se que o problema RSA é NP-Difícil [13].

2.6.2 Complexidade do RMLSA

Um problema é NP-Completo se ele pertence a classe NP e se ele é NP-Difícil [49]. O problema RMLSA é um problema NP uma vez que ele deriva do problema de decisão de roteamento em um grafo [12, 13]. Para provar que o problema RMLSA é NP-Difícil basta reduzi o problema MSP (*Multiprocessor Scheduling Problem*) ao problema RMLSA [12]. O problema MSP é um problema NP-Difícil conhecido. Uma instância do problema MSP inclui um conjunto de tarefas $t_i \in T, i = 1, 2, \dots, n$, um conjunto de processos $m_i \in M, j = 1, 2, \dots, k$, e a função $w(t_i, m_j) \in \mathbb{Z}^+$ para cada tarefa t_i quando executada no processo m_j .

A solução do problema MSP é um agendamento das tarefas $t_i \in T$, isto é, uma função $f : T \rightarrow M$ que mapeia 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 $t_i \in T, i = 1, 2, \dots, n$, um conjunto de subportadoras $m_i \in M, j = 1, 2, \dots, k$ e uma função $w(t_i, m_j, m_l) \in \mathbb{Z}^+$, tal que j e l representam os índices da primeira e ultima subportadora da demanda t_i , que mapeia uma conexão em subportadoras contíguas da rede.

- (ii) A solução para este problema é dada por uma função $f : T \rightarrow M$ que mapeia conexões t_i em subportadoras m_j . 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 de encaminhamento RMLSA é uma solução para o correspondente MSP. Dessa forma, como o problema MSP foi reduzido para o problema RMLSA, conclui-se que o problema RMLSA é NP-Difícil. Como o problema RMLSA também é um problema NP, então conclui-se que o problema RMLSA é NP-Completo [12].

2.7 Tráfego Estático e Dinâmico

As abordagens de tráfego utilizadas pelos algoritmos de alocação de espectro podem ser classificadas com base no seu âmbito de aplicação. A abordagem de tráfego estático lida com o roteamento e alocação de recursos durante a fase de planejamento da rede, onde uma matriz de tráfego é dada e as operações de roteamento e atribuição de espectro são realizadas de maneira *off-line* [12, 51].

Por outro lado, a abordagem de tráfego dinâmico lida com o roteamento e alocação das demandas de tráfego dinamicamente à medida em que as solicitações de tráfego chegam na rede, realizando as operações de roteamento e atribuição de espectro de forma *on-line* [44].

Métodos de otimização com o uso de programação linear inteira (PLI) são geralmente aplicados para encontrar soluções para o problema RSA. A vantagem desses métodos é que eles oferecem uma medida da otimização das soluções propostas, no entanto, eles podem levar a uma maior complexidade computacional.

Heurísticas oferecem uma alternativa para reduzir a complexidade computacional das soluções ao custo de não se obter uma solução ótima [3]. Em geral, heurísticas são mais utilizadas no planejamento dinâmico devido a sua menor complexidade computacional.

2.8 Fragmentação de Espectro

Em um cenário de rede dinâmico, o processo de estabelecimento e encerramento de conexões aleatórias inevitavelmente cria pequenos fragmentos de espectro não-contíguos o que conduz ao chamado problema de fragmentação de espectro [11].

Este problema é muito parecido com o problema de fragmentação de memória em arquitetura de computadores [3], no qual ao longo do tempo, com a alocação e liberação de dados, a memória torna-se fragmentada em pequenas áreas contíguas e dados maiores não podem ser alocados em memória, mesmo que a memória livre total tenha um tamanho disponível suficiente.

Como a fragmentação de memória, a fragmentação de espectro também causa a utilização ineficiente de recursos, pois grande parte das futuras requisições acabam não sendo atendidas por falta de espectro contíguo disponível, proporcionando uma degradação do desempenho da rede. Dessa forma, a fragmentação de espectro está intimamente ligada ao aumento da probabilidade de bloqueio em cenários de redes dinâmicos. O algoritmo RSA dinâmico deve levar em consideração essas questões para que seu desempenho seja satisfatório.

É importante atentar que a fragmentação de espectro não está diretamente relacionada com a utilização do espectro, que é definida como uma proporção de espectro utilizado pela quantidade total de recursos espectrais [52]. Dessa forma, o problema de fragmentação de espectro é visto quando os recursos espectrais estão divididos em várias partes pequenas.

Mecanismos de desfragmentação de espectro começaram a ser investigados pela literatura. O objetivo é reorganizar os caminhos ópticos existentes com o intuito de liberar espaço para futuras demandas de tráfego. Em geral, o rearranjo de espectro envolve interrupções de tráfego, por isso, um dos requisitos operacionais mais importantes investigados pela literatura EON é a não interrupção dos serviços durante a fase de reconfiguração [3]. A Figura 2.18 mostra as quatro principais técnicas de desfragmentação de espectro propostas pela literatura, suas descrições estão a seguir:

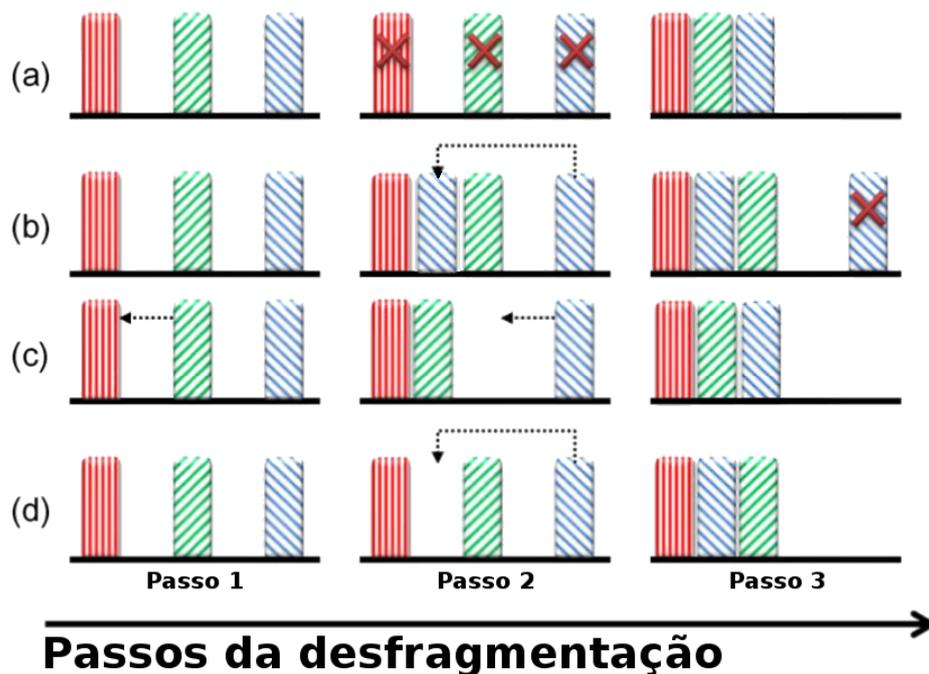


Figura 2.18: Técnicas de desfragmentação de espectro: a) Reotimização; b) *Make-Before-Break*; c) *Push-and-Pull*; d) *Hop Tuning*.

Reotimização - A técnica visa agrupar ao máximo os *slots*, desfragmentando de forma significativa o espectro do canal aumentando ao máximo a possibilidade de atribuir novas conexões ao preço de interromper os serviços [53].

Make-Before-Break - Para cada demanda de conexão que está estabelecida e será realocada são alocados os mesmos recursos de banda em uma rota (ou espectro) alternativa e em seguida são liberados os velhos recursos. Esse procedimento evita a interrupção do serviço, visto que o serviço é alocado antes de ser liberado [54].

Push-and-Pull - A técnica visa deslocar o espectro que será realocado até o espectro adjacente de maneira que sua rota não seja alterada. Do ponto de vista da tecnologia, o deslocamento é realizado por uma remodulação do espectro pelo BVT ao longo do tempo [55, 56].

Hop Tuning - A técnica é uma evolução da técnica *Push-and-Pull*. A diferença, como ilustrado na Figura 2.18(d), é que o *Hop Tuning* promove um deslocamento oportunista, evitando o deslocamento de todas as conexões do canal usando os recursos da tecnologia *Make-Before-Break* [57].

As técnicas de desfragmentação podem ser classificadas como reativas e proativas. Técnicas reativas são usadas quando a taxa de bloqueio começa a aumentar na rede. Por outro lado, as técnicas proativas realizam a alocação de espectro preservando faixas de espectro para usos futuros seguindo alguma métrica de fragmentação ou realizando técnicas de desfragmentação periodicamente.

A Tabela 2.2 resume as quatro técnicas descritas e seus principais indicadores de desempenho:

Tabela 2.2: Técnicas de desfragmentação de espectro.

Técnica	Reotimização	Make-Before-Break	Push-and-Pull	Hop Tuning
BVT Extra	não	sim	não	não
Interrupção do Tráfego	sim	não	não	não
Reativo/Proativo	ambos	reativo	ambos	ambos
Velocidade de Desfragmentação	muito lento	lento	lento	rápido
Complexidade	baixa	moderado	moderado	alta

Para medir o nível de fragmentação do canal existem diversas métricas. Uma delas é o cálculo da fragmentação externa, comumente utilizado em arquitetura de computadores, e denotada pela Equação 2.9 [52, 58]:

$$F_{ext} = 1 - \frac{\text{maiorBlocoLivre}}{\text{totalLivre}} \quad (2.9)$$

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 todo dividido em pedaços pequenos. Esta equação é válida dentro da hipótese que sempre existirá um *slot* disponível no canal.

Outra maneira de medir o nível de fragmentação do canal leva em consideração a quantidade de *slots* requeridos pela requisição de tráfego no canal. Nesse sentido, a taxa de fragmentação é uma função que leva em consideração o número de *slots* requeridos para atender a demanda de tráfego. Esta função é expressada pela Equação 2.10 [52, 58]:

$$F(c) = 1 - \frac{c \times \text{Livre}(c)}{\text{totalLivre}} \quad (2.10)$$

onde c é número de *slots* requisitados, *Livre*(c) é a função que retorna o número de requisições simultâneas de tamanho “ c ” que podem ser satisfeitas. Dessa forma, cada demanda de tráfego possui a sua própria taxa de fragmentação. Assim como a Equação 2.9, a Equação 2.10 também é válida dentro da hipótese que sempre existirá um *slot* disponível no canal. A Figura 2.19 mostra um exemplo da utilização das Equações 2.9 e 2.10 para dois canais. Ambas as formulações das Equações 2.9 e 2.10 apesar de simples, calculam de maneira satisfatória a taxa de fragmentação de espectro do canal.

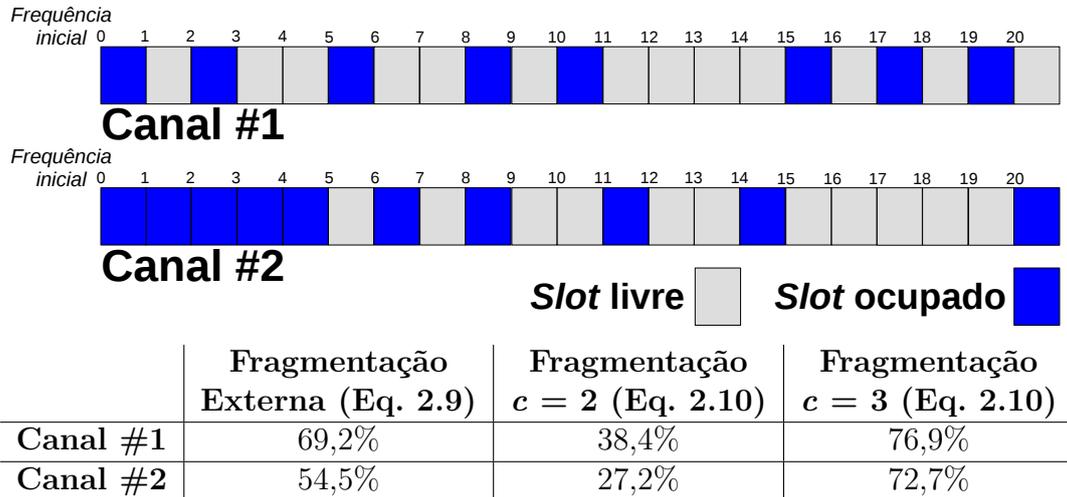


Figura 2.19: Taxa de fragmentação de espectro de acordo com as Equações 2.9 e 2.10.

2.9 Agregação de Dados

Nas redes ópticas WDM o uso de agregação de dados, ou agregação elétrica, é uma funcionalidade comum e amplamente utilizada para transportar múltiplas requisições de tráfego com a mesma origem e destino na rede. A tecnologia permite que requisições de tráfego com baixa largura de banda possam ser agregadas em um mesmo caminho óptico de alta capacidade proporcionando um melhor aproveitamento dos recursos da rede.

A agregação de dados é feita no meio eletrônico através de técnicas de multiplexação por divisão de tempo (*Time-Division Multiplexing* (TDM)), em que, 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.

Nas redes ópticas elásticas, requisições de tráfego com baixa largura de banda podem ser ajustadas diretamente pelos BVTs através do número de subportadoras utilizadas. No entanto, caso a requisição de tráfego tenha largura de banda menor que a capacidade de banda de uma subportadora OFDM, ocorrerá um desperdício de espectro no canal. Além disso, múltiplas requisições pequenas de tráfego podem levar a uma quantidade significativa de bandas de guarda proporcionando um mau uso do espectro.

Para resolver esses problemas, semelhante à tecnologia de agregação de dados das redes WDM, em redes elásticas também é possível agregar fluxos a um caminho óptico já estabelecido. Os fluxos agregados ao caminho óptico são agregados no meio eletrônico e tornam-se transparentes no meio óptico. Dessa forma, um caminho óptico pode transportar inúmeros fluxos de mesma origem para o mesmo destino. Isso leva a uma maior eficiência espectral, pois permite a eliminação das bandas de guarda entre supercanais [14].

A Figura 2.20 mostra um exemplo de agregação de dados. Demandas com mesmo BVT de origem e destino são agregadas evitando o uso de bandas de guardas e BVTs adicionais.

2.10 Agregação de Espectro

A agregação de dados exige que os fluxos de tráfego agregados tenham em comum o mesmo BVT de origem e destino. Como consequência disso, são necessárias bandas de guarda entre os caminhos ópticos adjacentes e um BVT para cada caminho óptico. Embora essa tecnologia permita aproveitar melhor o uso do espectro, a flexibilidade proporcionada pelo BV-WXC permite ir além disso [18].

A ideia básica da agregação de espectro é aproveitar a flexibilidade proporcionada pelo BV-WXC agregando múltiplos caminhos ópticos em um único BVT e comutá-los em conjunto [16]. Esse agrupamento é realizado para suportar agregação de modo transparente,

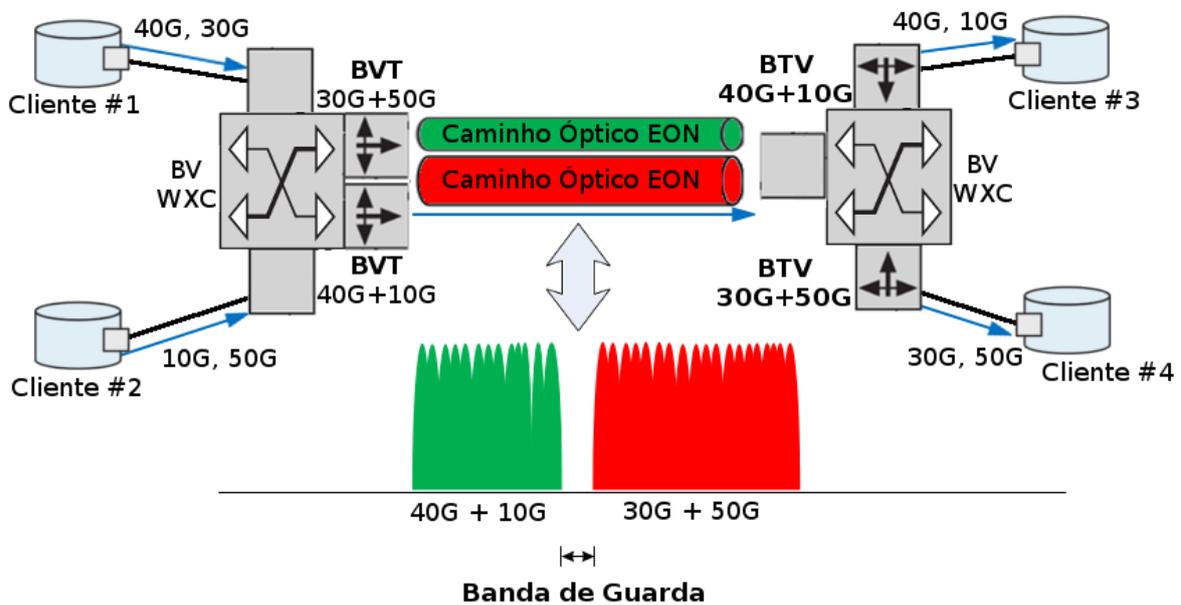


Figura 2.20: Exemplo de agregação de dados nas redes ópticas elásticas.

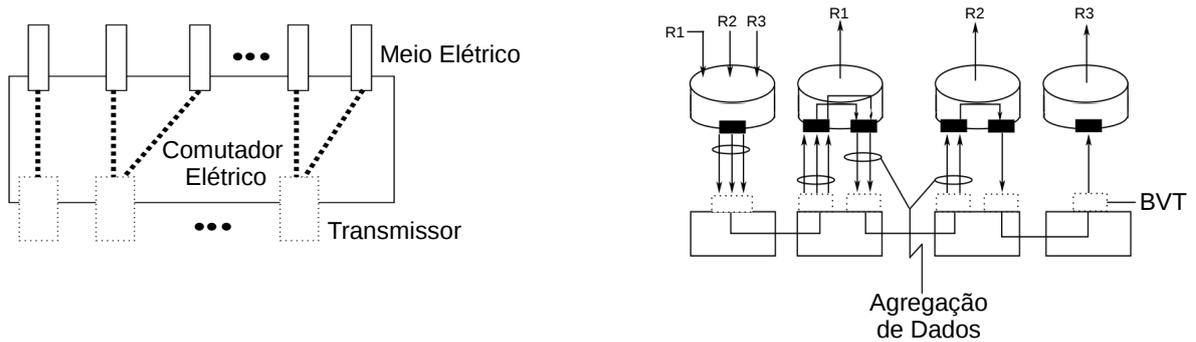
sem conversão do sinal do domínio óptico para elétrico. Esse grupo de caminhos ópticos pode ser chamado de túnel óptico.

Os problemas descritos na Seção 2.1.3 podem ser aliviados com o uso de bandas de guarda entre os caminhos ópticos. No entanto, a ideia da agregação de espectro é justamente remover essas bandas de guarda entre caminhos ópticos aumentando a eficiência espectral. Teoricamente, um sinal de espectro contínuo baseado em OFDM não exige bandas de guarda entre os respectivos canais OFDM. Entretanto, quando um sinal OFDM viaja através de múltiplos BV-WXCs, as subportadoras na borda do espectro sofrem penalidades por causa da forma imperfeita dos filtros de comprimento de onda seletivo (BV-SSS) [59]. Além disso, ao realizar a adição/remoção de fluxos, os BV-WXCs deixam sinais residuais de caminhos ópticos no espectro, prejudicando caminhos adjacentes [60].

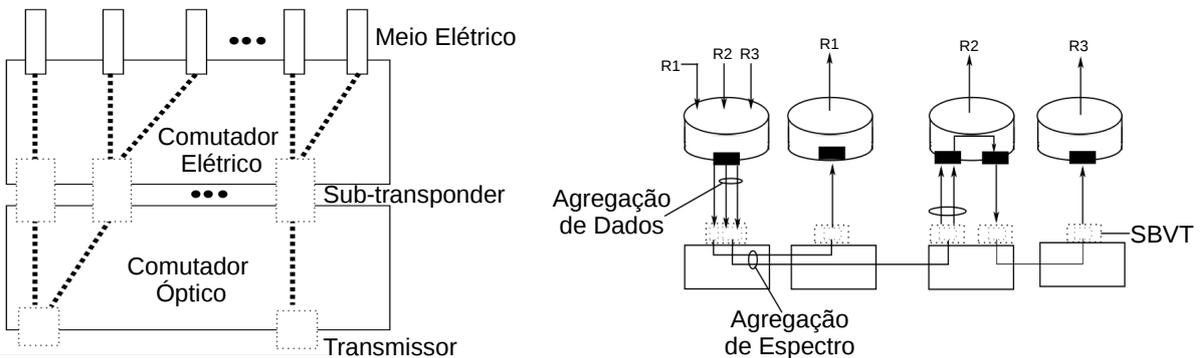
Todos esses problemas são aliviados através do uso de bandas de guarda entre caminhos ópticos adjacentes ao custo de reduzir a eficiência espectral do canal. Com base na característica ortogonal dos sinais OFDM [61], o fluxo originado de uma mesma fonte pode ser agrupado sem o uso de bandas de guarda entre os caminhos ópticos. O uso destas se dá apenas entre túneis ópticos para fins de comutação. Para fluxos com a mesma origem e destino a abordagem utilizada é a mesma da agregação de dados. Para fluxos com mesma origem mas destinos diferentes, a flexibilidade do BV-WXC é utilizada para agregar os fluxos no transmissor de origem e comutá-los diretamente na camada

óptica ao longo do percurso.

A arquitetura dos BVTs não é capaz de lidar dinamicamente com esse recurso. Para isso foi desenvolvido a arquitetura SBVT, mencionando na Seção 2.2.2. No SBVT, a agregação de tráfego pode ser feita tanto na camada elétrica quanto na camada óptica [62, 63]. A Figura 2.21 mostra a distinção entre a agregação de tráfego na arquitetura BVT e SBVT.



(a) Arquitetura e funcionamento da agregação de tráfego BVT.



(b) Arquitetura e funcionamento da agregação de tráfego SBVT.

Figura 2.21: Distinção entre a agregação de tráfego na arquitetura BVT e SBVT: a) funcionamento da arquitetura BVT ; b) funcionamento da arquitetura SBVT.

Na arquitetura BVT, múltiplos canais elétricos são agregados eletronicamente para um transmissor, realizando a agregação de dados. Na arquitetura SBVT múltiplos canais elétricos são agregados eletronicamente para um sub-transmissor (*sub-transponder*), usando um comutador elétrico. Em seguida, múltiplos canais ópticos são agregados opticamente usando um comutador óptico. Essa abordagem é chamada agregação de espectro, ou agregação óptica [32]. Nota-se que múltiplos sub-transmissores estão associados a um

transmissor óptico, portanto a quantidade de canais ópticos agregáveis opticamente está relacionado ao número de sub-transmissores que o SBVT possui [64].

Um exemplo do uso da agregação de espectro pode ser observado na Figura 2.22, em que um caminho óptico precisa ser retirado no “nó *b*”. Deve-se notar que assim que o caminho óptico é retirado, bandas de guarda são adicionadas ao túnel remanescente e ao que foi retirado, possibilitando as demais comutações.

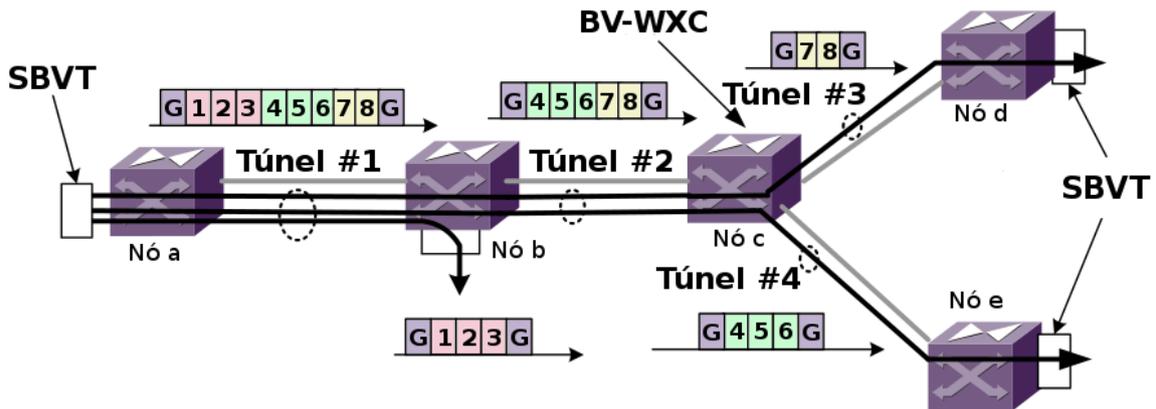


Figura 2.22: Agregação de espectro em redes EON.

Para que a agregação óptica seja possível é necessário BV-WXCs que possuam a arquitetura de difusão e seleção descritas na Seção 2.2.3 [18]. A Figura 2.23 apresenta o procedimento ocorrido no “nó *c*” da Figura 2.22. O espectro é difundido para todas as portas de saída e com o uso do BV-SSS, os *túneis*#3 e #4 são formados a partir de filtragens realizadas no espectro do *túnel*#2.

Para o fluxo proveniente de diferentes nós de origem (que utilizam diferentes moduladores), a ortogonalidade não pode ser garantida entre eles, logo, eles não podem ser agregados opticamente e devem ser recebidos por receptores distintos no BV-WXC [16].

Pode-se observar que o uso de agregação de espectro proporciona uma eficiência significativa no uso do espectro, pois elimina bandas de guarda desnecessárias entre caminhos ópticos. Além disso, melhora os custos operacionais da rede, possibilitando um menor uso de transmissores. Entretanto, é necessário destacar que a agregação de espectro não diminui o número de receptores, apenas de transmissores, pois fluxos com origem distintas não podem aproveitar os recursos da agregação de espectro devido a característica ortogonal da subportadora OFDM [16].

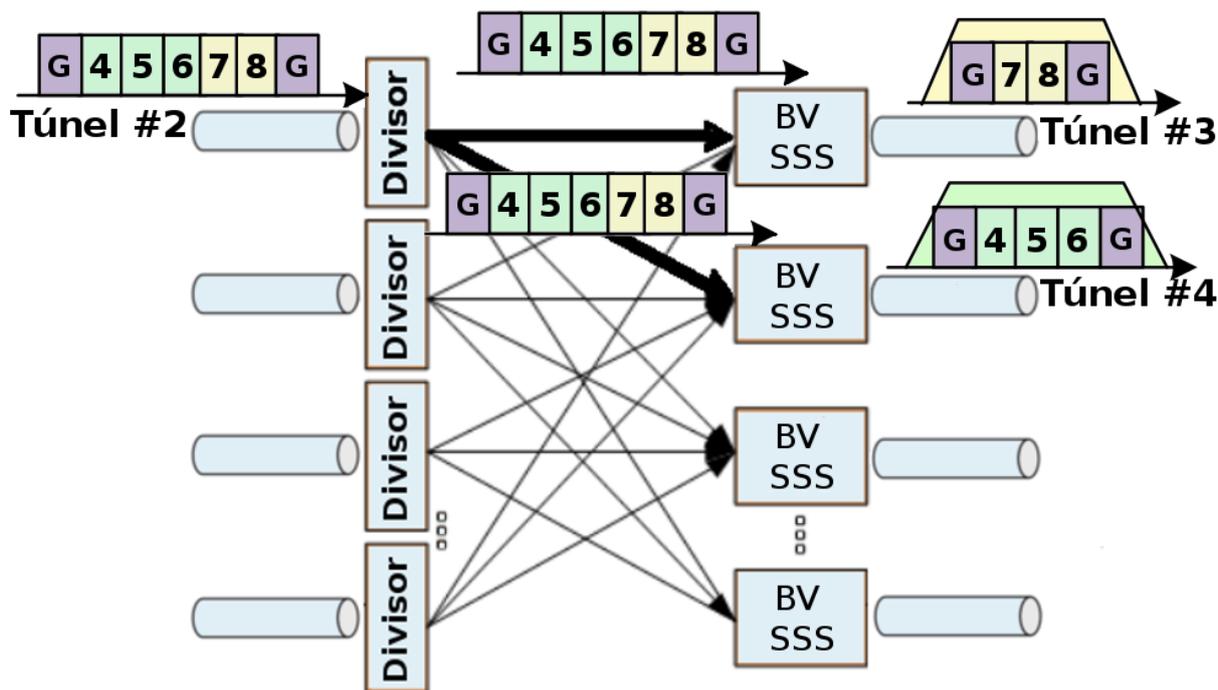


Figura 2.23: Estrutura de um BV-WXC na abordagem de agregação de espectro EON.

2.11 Roteamento em Múltiplos Saltos

O roteamento de uma conexão pode ser classificado em um único salto (*singlehop*) ou em múltiplos saltos (*multihop*). O roteamento *singlehop* acontece quando uma conexão é atendida por apenas um caminho óptico. Por outro lado, o roteamento *multihop* é dado quando uma conexão passa por vários caminhos ópticos, tendo em vista que cada caminho óptico pode passar por vários enlaces. Ao final de cada caminho óptico, será realizada uma conversão OEO (*Optical-Electrical-Optical*) o que resultará em um salto na topologia virtual.

Os caminhos ópticos da conexão podem ser novos ou existentes. Novos quando os caminhos ópticos foram criados para atender uma nova conexão, existentes quando os caminhos ópticos forem usados através da agregação de tráfego [65]. A Figura 2.24 mostra a exemplificação de um roteamento em múltiplos saltos. O tráfego tem origem no nó 1 e destino ao nó 4. O caminho óptico #1, já estabelecido na rede, transporta essa conexão até o nó 3 por meio da agregação de dados, atravessando os enlaces #1 e #2. Em seguida, é realizada uma conversão OEO e estabelecido um novo caminho óptico #2 para transportar o tráfego até ao nó 4 utilizando o enlace #3. No total são realizados dois saltos na topologia virtual e 3 saltos na topologia física.

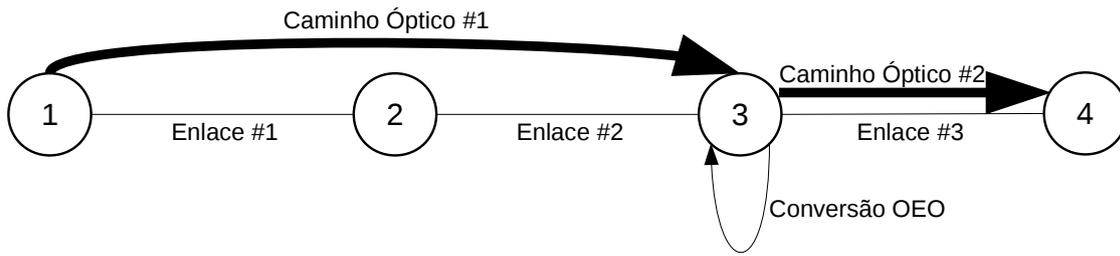


Figura 2.24: Exemplificação de um roteamento em múltiplos saltos.

Esse tipo de roteamento, permite a suavização das restrições de continuidade de espectro, pois o novo caminho óptico não precisa ter o mesmo segmento de espectro do anterior ao mesmo tempo que minimiza as restrições de distância de transmissão, já que a transmissão é dividida em vários caminhos ópticos e o sinal é regenerado. Entretanto, o uso dessa técnica eleva o número de transmissores necessários, uma vez que, cada caminho óptico deve ser estabelecido por um transmissor diferente.

2.12 Análises OPEX e CAPEX

Enquanto a maioria dos estudos relacionados a tecnologia de redes ópticas elásticas (EON) são voltados para a otimização e uso eficiente do espectro, o critério de seleção final para a implantação de uma nova tecnologia é o custo. Em geral, o custo está relacionado a implementação (*Capital Expenditure* (CAPEX)) e manutenção (*Operational Expenditure* (OPEX)) da nova tecnologia.

As redes EON podem trazer vários benefícios em termos de poupança de custo CAPEX e OPEX [66, 67, 64]. Essas economias dependem em grande parte da granularidade da rede, da carga de tráfego e do modelo de custo assumido [3]. Estudos demonstram que considerando as topologias atuais e perfis de tráfego esperados a curto e médio prazo, investimentos em infraestrutura nos dispositivos e tecnologias EON são rentáveis em todos os cenários devido à utilização de espectro ser minimizada [68].

Diversos trabalhos na literatura concentram-se em comparar o custo benefício da implementação das redes EON no cenário atual de redes, focando seus estudos na utilização eficiente do espectro e dos recursos. De toda forma, embora a implementação da tecnologia EON possa custar duas a três vezes mais que a tecnologia WDM tradicional, a simplificação da camada IP/MPLS, bem como uma melhor utilização da capacidade das fibras já instaladas, motiva a implantação das redes ópticas elásticas [68, 69].

Além disso, a eficiência energética das redes EON recentemente começou a ser investigada e, cada vez mais, vêm ganhando atenção devido sustentabilidade. As redes EON

possuem a característica de oferecerem granularidades de tráfego menores aproveitando melhor o uso do espectro e obtendo uma eficiência energética superior as redes tradicionais [70, 71]. Todos esses motivos justificam a implantação dessa nova tecnologia nas redes ópticas atuais.

2.13 Estratégias de sobrevivência

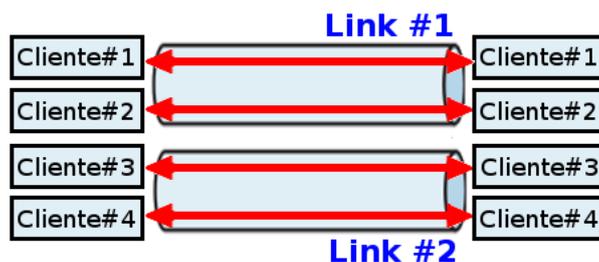
Estratégias de sobrevivência à falhas na rede é um aspecto importante em redes ópticas. Como já mencionado, as redes EON tem a capacidade de suportar taxas de até 1 Tb/s, portanto, falhas em componentes de rede, como por exemplo, fibras ópticas ou comutadores ópticos podem interromper a comunicação para milhões de usuários, causando prejuízos elevados [32]. Estratégias de sobrevivência a falhas tornou-se um requisito importante em redes EON. Em [72] recuperação a falha é definido como: “*O processo de restabelecer a continuidade do tráfego por re-roteamento dos sinais em diversas instalações após a falha*”.

Com a introdução do caminho óptico elástico, esquemas de recuperação a falha podem ser melhores explorados. Assim, taxas de transmissão podem ser comprimidas até o limite definido para os casos de falha na rede [73]. As estratégias de sobrevivência destacadas na literatura EON são divididas em duas grandes categorias descritas a seguir:

Proteção Em geral 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 reconfiguradas posteriormente [74, 32].

Restauração Nesta estratégia, 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 [75, 32].

Estudos demonstram que a restauração de falhas em redes ópticas elásticas proporciona maiores oportunidades à conectividade que os esquemas utilizados em redes ópticas tradicionais de grade fixa [73]. A Figura 2.25 mostra um exemplo de falha comparando a tecnologia EON com a tecnologia de grade fixa tradicional. No caso de falha do *Link #1* as demandas podem ser espremidas, atendendo os limites impostos pela política SLA (*Service Level Agreement*), e chegarem ao seu destino pelo *Link #2* (Figura 2.25(b)). Estratégias de sobrevivência possuem impacto significativo em grandes redes ópticas de *backbone* e diversas questões ainda precisam ser exploradas na tecnologia EON.



(a) Operação normal sem falha.



(b) Compressão de banda dos caminhos ópticos afetados pela falha.

(c) Falha na rede de grade fixa.

Figura 2.25: Estratégias de sobrevivência das redes EON.

2.14 Esquemas de gerenciamento e controle da rede

O novo paradigma de redes ópticas elásticas proporciona uma grande flexibilidade no provisionamento da largura de banda óptica. Mecanismos avançados de controle e gerenciamento de rede são essenciais para suportar o provisionamento de conexões através do ajuste da largura de banda e as operações de recuperação deste novo paradigma de redes [11].

Protocolos de sinalização e roteamento do plano de controle devem ser estendidos para suportar as novas características da arquitetura EON. Com o objetivo de oferecer uma capacidade de banda flexível, as intervenções manuais nos processos operacionais do plano de controle devem ser eliminadas. Isso requer automação nos processos de manutenção e gerência, frente à tamanha flexibilidade da rede.

Ainda são necessários padrões para definir uma interface entre o plano de controle e o plano de dados da rede. Duas principais abordagens estão sendo consideradas: (i) a que estende o protocolo GMPLS (*Generalized Multi-Protocol Label Switching*); e (ii) a que adota a nova abordagem de redes definidas por *software* (*Software Defined Networking* (SDN)) e o paradigma *OpenFlow* [3]. Dessa forma, mais estudos devem ser realizados, pois ainda não foram definidos protocolos de controle e diversos mecanismos ainda devem ser aprimorados. Além disso, será necessário a padronização das tecnologias.

Capítulo 3

Estado da Arte

Considerado um paradigma promissor para a Internet do Futuro, as redes ópticas elásticas ainda possuem uma série de questões que precisam ser exploradas, tais como: tecnologia dos novos dispositivos de rede; planejamento da rede; engenharia de tráfego; e as tecnologias do plano de controle [11].

Este Capítulo faz um mapeamento geral da literatura EON apresentando as principais propostas e soluções encontradas para a resolução dessas questões. Em seguida é exibida a literatura de referência da proposta deste trabalho e sua análise científica.

3.1 Mapeamento da literatura

3.1.1 Arquitetura e tecnologia de dispositivos

Diversos trabalhos concentram seus esforços em pesquisas para o aprimoramento e desenvolvimento de novas tecnologias de rede. Neste novo paradigma de rede, pesquisas para o aperfeiçoamento dos dispositivos EON são de grande valia para o desenvolvimento de novas abordagens e algoritmos para o plano de controle.

Em [76], os autores propõem uma política para alocar subportadoras a um caminho óptico com variação de tráfego no tempo. Os autores comparam o desempenho do uso dessa política em redes WDM tradicionais e em redes ópticas elásticas.

Em [77] é realizada uma agregação de sete caminhos ópticos em um único caminho óptico de espectro contínuo produzindo uma largura de banda de 1 Tb/s com baixa penalidade OSNR. Em [78], os autores demonstraram o uso de um super canal com 420 Gb/s com uso da modulação 8QAM.

Do mesmo modo, em [79] os autores demonstraram a possibilidade de produzir granularidades de tráfego, através dos BVTs, com larguras de banda entre 40 Gb/s e 400 Gb/s. Em [37], foi demonstrado o uso de um BV-SSS suportando a granularidade de 1 GHz de

espectro. Da mesma maneira, em [80, 81] foram realizadas experiências que mostraram a viabilidade do uso de filtros BV-SSS com granularidades de tráfego de 2,5 Gb/s a 160 Gb/s e granularidades de espectro de 13,2 GHz.

A relação entre o tamanho da banda de guarda e o número de filtros BV-SSS que o espectro ultrapassa foi estudada em [59]. Os resultados mostram que, para o caso de transmissão ao longo de 10 etapas de filtragem em cascata, a banda de guarda ideal para canais OFDM com 10 subportadoras é de 30 GHz.

Em [47] os autores propõem um novo dispositivo de rede para conversão do nível de modulação de forma dinâmica por enlace e/ou caminho óptico. Algoritmos são formulados baseados nessa premissa e seus resultados garantem uma relativa baixa da taxa de bloqueio e eficiência energética considerável.

Em relação à capacidade do canal, em [43] os autores propõem uma redução da banda de guarda e uso da modulação 16QAM com alcance de 2000 km, por meio da utilização de fibras ULAF (*Ultra-Large-Area Fiber*). Essa abordagem provoca um melhor desempenho na rede produzindo caminhos ópticos de até 448 Gb/s.

A maioria dos trabalhos da literatura EON emprega o método SLICE, onde o espectro do canal é dividido em mini-grades, ou *slots*. No entanto, alguns trabalhos abordam o método *gridless*, no qual não há grades no espectro e os transmissores podem alocar exatamente o tamanho do espectro necessário na demanda [17]. Nesse sentido, o uso de grades no espectro ainda limita a eficiência de uma rede EON. No entanto, em [82] os autores provaram que o uso de grades relativamente pequenas (3 GHz) atinge o mesmo desempenho de uma rede EON *gridless*. Em [83] os autores sugerem uma largura ideal do tamanho de grade de espectro (10 GHz), visto que grades pequenas aumentam o número de *slots* no canal, que por sua vez, aumentam a complexidade de soluções RSA e prejudica o desempenho dos dispositivos EON.

Taxa de dados com ajuste dinâmico de acordo com a qualidade do canal foi demonstrado experimentalmente em [84]. Os autores variam a taxa de *bits* através da variação da potência de transmissão das subportadoras OFDM. O alcance e a capacidade da transmissão contra a variação da taxa de dados transmitida foram estudadas em [42], onde os autores provam uma redução de até 44% no uso de transmissores em comparação a uma abordagem de grade fixa. Em [40], os autores propõem um esquema para alocação de recursos, que aloca o mínimo de espectro necessário de acordo com a condição física do caminho óptico. O esquema leva em consideração o formato de modulação e a distância como parâmetros.

3.1.2 Algoritmos RSA

Recentemente, há um número crescente de trabalhos de pesquisa que investigam soluções para o problema de roteamento e atribuição de espectro para redes ópticas elásticas. Os problemas RSA são investigados sob ambos os cenários de tráfego, estático e dinâmico, incluindo ainda considerações sobre a tecnologia de modulação e a distância adaptativa do canal.

Em [13] o problema de roteamento e atribuição de espectro (RSA) em redes SLICE foi provado ser NP-Difícil. Os autores ainda desenvolveram um modelo utilizando formulações de programação linear inteira (PLI) para minimizar o uso de subportadoras em redes EON com topologia em anel e malha. Dois algoritmos heurísticos foram propostos, um que equilibra a carga dentro da rede, potencializando ao máximo o uso da fibra (*balanced load spectrum allocation* - BLSA), outro que combina o caminho mais curto de roteamento com a maior demanda da rede (*shortest path with maximum spectrum reuse* - SPSR). As heurísticas tiveram bons resultados em comparação com a PLI proposta, demonstrando uso eficiente dos recursos de uma rede EON na abordagem estática.

Em [51] os autores propõem uma PLI para o problema RSA estático que calcula a colisão de demandas que podem utilizar a mesma faixa de espectro e estimam esta métrica para propor melhores soluções de uso eficiente de espectro de maneira *off-line*. Uma heurística é proposta (AFA-CA) e seus resultados são bastante efetivos em relação aos algoritmos da literatura.

Em [44], os autores propuseram três heurísticas para solucionar o problema RSA em um cenário dinâmico. A primeira heurística (KSP) é um algoritmo dividido em dois passos, em que é utilizado o algoritmo Yen's KSP [85] para encontrar as k -menores rotas da origem e 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 através de um algoritmo de busca em largura constrói uma árvore para representar os caminhos candidatos e encontra o menor caminho com espectro disponível para atender a demanda. Os resultados apresentados demonstram uma redução significativa na taxa de bloqueio em relação a algoritmos de RWA tradicionais em redes WDM.

Em [12] os autores introduzem o conceito de RMLSA, que adiciona o formato de modulação à atribuição do espectro (RSA). O problema foi formulado através de uma PLI e vários algoritmos para resolver o problema foram apresentados. Os autores propõem um algoritmo heurístico que divide o problema RMLSA em dois, o problema de roteamento e formato de modulação (RML), e o problema de atribuição de espectro (SA), resolvendo-os

de forma sequencial. As heurísticas tiveram resultados próximos de soluções ótimas com tempo de execução rápidos. Os resultados mostraram que as redes EON tem benefícios de espectro significativos em comparação com redes WDM indicando que o novo paradigma oferece uma solução promissora para as redes de transporte de alta capacidade do futuro.

Os autores em [86] desenvolveram um algoritmo genético adaptável para resolver o problema RMLSA em um cenário de rede dinâmico. O algoritmo oferece uma maneira eficiente para atender as requisições de tráfego com um nível de modulação adequado baseado em uma otimização para múltiplos objetivos. O desempenho do algoritmo é avaliado em duas topologias de rede e seus resultados mostraram-se melhores que os demais algoritmos da literatura. Especificamente, quando a carga de tráfego é baixa, o algoritmo atinge uma redução de até uma ordem de grandeza na probabilidade de bloqueio.

Em [87] foram propostos dois algoritmos RMLSA que reduzem o número de *slots* utilizados em toda a rede e diminuem a complexidade de execução. Os resultados da avaliação mostraram que os algoritmos propostos reduzem o número de *slots* ocupados classificando as demandas pela distância sobre várias rotas.

Os autores em [88] propõem um algoritmo de roteamento dinâmico com atribuição de espectro que empregam modulação adaptativa através da distância. Simulações provam que o algoritmo proposto melhora a eficiência da utilização do espectro quando a taxa de bloqueio é menor que 1%.

Em [89] foi proposto um algoritmo que se adapta a distância do caminho óptico para resolver o problema RMLSA. O algoritmo desenvolvido é baseado em múltiplos estágios, incluindo a otimização de rotas através de uma PLI para atender as restrições de distância de transmissão. Os experimentos numéricos mostraram uma redução de até 30% em recursos de espectro para redes em anel e em malha.

Em [90] os autores melhoram suas propostas realizadas em [51] e focam no problema RMLSA propondo uma PLI e um algoritmo (AFA-DCA) que resolvem o problema RSA *off-line* de forma ótima. Simulações são realizadas e comparações são feitas com a PLI proposta e algoritmos da literatura.

Em [17], os autores levam em consideração o formato de modulação e a distância do caminho óptico fornecidos pelos algoritmos por eles propostos em [44] em um cenário dinâmico. Os algoritmos procuram uma rota com a maior modulação possível e caso não encontre, ou esta rota seja longa demais para o formato de modulação escolhido, sua modulação é diminuída e o algoritmo é executado novamente. Os resultados dessa nova abordagem são comparados com uma PLI proposta e apresentam uma redução significativa na taxa de bloqueio e no uso do espectro.

Em [91] é proposto um esquema para realizar o roteamento dinâmico baseando-se no

QoT, denominado *QoT-aware RSA*. A proposta é baseada em três estágios: (i) escolha do caminho baseado em um QoT aceitável (nível de modulação adequado); (ii) seleção da rota; e (iii) atribuição do espectro. Técnicas são desenvolvidas para estimar o nível de modulação adequado para cada requisição baseado em métricas relacionadas ao OSNR. O esquema proposto é avaliado através de simulações baseadas em modelos de tráfego aleatórios e determinísticos. Os resultados mostram que a escolha do caminho e os métodos de atribuição de espectro afetam significativamente o desempenho médio OSNR.

3.1.3 Fragmentação de espectro

Em um cenário de rede dinâmico, o processo de estabelecimento e encerramento de conexões aleatórias inevitavelmente cria pequenos fragmentos não-contíguos de espectro que raramente serão utilizados. O problema de fragmentação de espectro é bastante estudado na literatura, visto que ele está diretamente ligado ao uso eficiente do espectro [11].

Em [53] os autores introduzem o problema de desfragmentação para redes flexíveis e propõem heurísticas. Os algoritmos propostos garantem um desempenho próximo, dentro de 5% a 18%, de soluções PLI ideais. O processo de desfragmentação da rede consolida o espectro disponível de forma significativa, minimizando o número de conexões interrompidas.

Em [92], o processo de desfragmentação é abordado e uma métrica para medir a taxa de fragmentação do espectro é desenvolvida. Os autores propõem um esquema de desfragmentação e mostram sua rentabilidade através da baixa taxa de bloqueio proporcionada pela técnica. O resultado também indica que a escolha da região de espectro realocado é importante para o desempenho da técnica.

Os autores em [54] propõem um método de desfragmentação (*make-before-break*) com interrupção minimizada para redes EON com modulação adaptativa a distância. Experimentos numéricos provam que com o número de caminhos ópticos acomodados, a taxa de fragmentação é melhorada em até 10% com o uso do método.

Em [93] os autores apresentam um método para auto-desfragmentação da rede EON sem interrupção do serviço. A técnica identifica os caminhos ópticos candidatos para a desfragmentação e os realoca de forma dinâmica. Os resultados das simulações mostram até 76% de redução na taxa de bloqueio e 38% no aproveitamento de *slots* ociosos.

A técnica de desfragmentação *push-pull* foi proposta em [55, 56]. A técnica baseia-se na remodelação do caminho óptico sobre recursos de espectro adjacentes sem o uso de transmissores adicionais e sem interrupção do tráfego. As limitações tecnológicas que possam afetar a aplicabilidade da técnica são discutidas no contexto de redes EON. Os resultados demonstram a realocação de caminhos ópticos com até 100 Gb/s de banda sem sofrer qualquer interrupção de tráfego.

Os autores em [57] melhoram consideravelmente a velocidade da técnica *push-pull* ao custo de uma mínima interrupção no tráfego na realocação do caminho óptico da rede. No entanto, os autores garantem a usabilidade de técnica, visto que esta interrupção é abaixo de 400ns, ou seja, é quase irrelevante para a conexão.

Em [52] os autores desenvolvem um modelo analítico baseado em cadeias de Markov sob um cenário de tráfego dinâmico EON. Usando esse modelo, diversas políticas de alocação de espectro existentes são comparadas com a política de alocação proposta. Os resultados mostram que a solução proposta tem melhores resultados em relação à taxa de bloqueio e fragmentação.

Em [58] os autores propõem um novo algoritmo para minimizar o problema de fragmentação de espectro para redes EON através de algoritmos de RSA. Os resultados obtidos através de simulações superam em até quatro vezes a taxa de probabilidade de bloqueio e de fragmentação do espectro em comparação os demais algoritmos da literatura.

Políticas de alocação de espectro para minimizar a fragmentação foram propostos [88] e seus resultados tiveram baixa taxa de bloqueio em comparação os algoritmos da literatura para redes com roteamento dinâmico. Em [94] os autores apresentam uma proposta que evita a fragmentação do espectro sem a realização de alterações na rota da conexão. A proposta adota um esquema de controle de admissão preventiva com base no particionamento do espectro da demanda com o intuito de alcançar uma maior alocação de espectro.

Em [95] os autores apresentam um esquema de partição de espectro para resolver o problema RSA. Nesta abordagem, os autores definem grupos de conexão cujas rotas são iguais. Assim, quando duas conexões de grupos diferentes compartilham um enlace, são atribuídos diferentes conjuntos de espectro de maneira que essas conexões não permaneçam contíguas no espectro (em grupos de *slots* separados). Dessa maneira, conexões disjuntas, cujas rotas não compartilham qualquer enlace, são atribuídas à mesma partição, enquanto as conexões não-disjuntas são atribuídas a partições diferentes. Essa abordagem diminui a fragmentação do espectro e, portanto, reduz a probabilidade de bloqueio na rede.

3.1.4 Agregação de tráfego

Nas redes ópticas WDM tradicionais o uso de agregação de tráfego (*traffic grooming*) é comumente utilizado para elevar a usabilidade da rede óptica. Em redes EON as tecnologias de agregação de tráfego foram recentemente exploradas e a literatura ainda difunde pouco estas técnicas.

Em [14], o conceito de agregação de dados em redes ópticas elásticas foi proposto pela primeira vez para aumentar a eficiência do espectro através da eliminação das bandas

de guarda entre demandas menores que a largura de banda de uma sub-portadora. Uma formulação PLI foi proposta e seus resultados garantiram uma economia de espectro entre 8% e 24%, dependendo da largura da banda de guarda, em um cenário estático de redes EON.

Os autores em [96] abordam o problema de roteamento e formato de modulação de espectro para topologias em anel através do uso de técnicas de agregação de dados. Uma nova formulação PLI é proposta para resolver este caso e algoritmos heurísticos são propostos para fornecer soluções para ambientes maiores. Com base nos resultados numéricos, o uso da tecnologia EON com distância adaptativa obtêm resultados expressivos, uma vez que a dimensão geográfica limitada da rede permite a utilização de formatos de modulação avançados, com alta eficiência espectral. Os autores concluem que o uso da tecnologia EON tem fortes aplicações em redes metropolitanas, melhorando a compatibilidade com as redes de núcleo.

Em [15], os autores investigam o problema de agregação de dados dinâmico para redes ópticas elásticas. Os autores propõem 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, denominado 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 de dados utilizando os transmissores 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. Os resultados da proposta levaram a uma redução significativa das despesas OPEX e CAPEX, como por exemplo, um menor número de transmissores utilizados.

Algumas propostas de agregação óptica de espectro aparecem em trabalhos recentes [97, 6, 16]. O conceito de agregação fotônica para redes DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) é apresentado em [97]. A proposta consiste em combinar serviços de sub-comprimento de onda através de um único BVT. O conceito de túnel óptico é então introduzido e consiste em comutar vários serviços em conjunto através de um mesmo túnel óptico em um mesmo BVT, no entanto, os serviços ainda são separados por bandas de guarda.

Em [6], os autores propõem que conexões com mesma origem, mas destino diferentes possam ser fornecidas através de um único túnel óptico para redes ópticas elásticas. Entretanto, a proposta ainda exige que os BVTs suportem múltiplas fontes de luz, que por sua vez, aumenta muito o custo da rede. Em [16], os autores propõem uma nova abordagem de agregação óptica com comutação dos serviços de forma óptica. A proposta não exige bandas de guarda entre os serviços ou múltiplas fontes de luz nos BVTs.

Os autores em [16] também propõem uma formulação PLI para a agregação óptica de espectro em um cenário estático. São desenvolvidos dois algoritmos heurísticos para resolver o problema RSA no contexto da agregação de espectro. Os algoritmos são validados com a PLI e comparados com abordagens sem agregação de espectro. Os resultados demonstram que a agregação óptica de espectro atinge uma economia entre 25% a 80% no uso de BVTs e uma eficiência entre 5% a 15% no uso do espectro em comparação com uma abordagem sem agregação óptica de espectro.

Em [98] é proposto um algoritmo de distância adaptativa com agregação de espectro e fragmentação consciente para redes EON. Os resultados apresentados reduzem em até 14% o uso do espectro e até 13% a economia de BVTs em comparação com algoritmos existentes.

Os autores em [99] propõem um novo conceito de engenharia de espectro, que visa à otimização da utilização de recursos espectrais em redes EON no contexto de tráfego dinâmico. Um algoritmo baseado neste conceito e na abordagem de agregação de espectro é desenvolvido (OG-SE). As simulações numéricas mostram que o algoritmo proposto pode alcançar um alto desempenho na taxa de bloqueio.

Os autores em [100] propõem o algoritmo FPA (*First-Possible Aggregating*) que também realiza agregação de espectro no cenário de rede dinâmico. O algoritmo FPA maximiza a utilização da capacidade do transmissor, agregando múltiplos caminhos ópticos no mesmo transmissor. Além disso, o algoritmo FPA melhora a utilização do espectro através da redução do número de bandas de guarda entre os caminhos ópticos que compartilham a mesma rota. Esses recursos podem ser facilmente transformados para mais conexões estabelecidas através da rede e um menor número de transmissores exigidos por nó. Os resultados demonstraram que o uso da agregação de espectro traz benefícios significativos na taxa de bloqueio de requisições em relação a algoritmos que não utilizam a técnica.

Recentemente, os trabalhos em [62, 63] também investigam o problema da agregação de dados e de espectro em redes EON no contexto de tráfego dinâmico. Em [62], baseado nas propostas desenvolvidas em [15, 16], os autores propõem a utilização de um grafo auxiliar para resolver o problema RSA com utilização de agregação de tráfego (dados e espectro) em redes EON baseadas em SBVTs. Os autores propõem três políticas de tráfego baseado no ajuste das arestas do grafo auxiliar.

A primeira política baseia-se na minimização do número de caminhos ópticos estabelecidos. Essa política tem consequência direta em um menor uso de transmissores para atender as demandas de tráfego, que por sua vez, reduzirá os custos da rede. Essa política tem como prioridade estabelecer o máximo de agregações (dados e espectro) 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 de dados e espectro, 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-SSS utilizados na rede.

Em [63] os mesmos autores propõem um novo esquema de reserva de espectro, semelhante ao esquema proposto por [15], e aplicam esta técnica nas mesmas soluções propostas em [62]. 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 [15], 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 [15] 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.

3.1.5 Recuperação a falhas

Estratégias de recuperação a falhas é um assunto bastante estudado no contexto de redes WDM tradicionais. No contexto de redes EON o assunto ainda foi pouco explorado, mas é bastante promissor.

Com a introdução da taxa de dados flexível, os autores em [73] propuseram uma esquema para a restauração a falhas em redes EON. O esquema proposto atinge um alto nível de capacidade de sobrevivência a falhas para o tráfego que está sujeito a políticas SLA. O esquema faz a compressão da largura de banda dos caminhos ópticos, restaurando a conectividade em caso de falhas. Além disso, os autores implementam uma arquitetura de plano de controle para o problema. Os resultados da implementação recuperam a falha em aproximadamente 100 ms.

Em [74] os autores investigam o problema de agregação de tráfego de sobrevivência para redes ópticas elásticas. Com base na elasticidade do tráfego EON, os autores propõem um esquema de proteção disjunto que explora o espectro compartilhado para um serviço de proteção a falhas. Os resultados mostram que este compartilhamento de recursos atinge ganhos significativos na economia do espectro da rede.

O trabalho desenvolvido em [75] estuda o problema de sobrevivência RSA multicaminho com fator de proteção. Os autores desenvolveram uma PLI e um algoritmo heurístico para resolver o problema. Os resultados da simulação demonstraram que o esquema proposto atinge melhores resultados de bloqueio de banda e uma justiça relativamente maior. Além disso, os autores demonstram que a heurística proposta para resolver o problema apresenta um desempenho semelhante à PLI.

3.1.6 Análises de custos

Em qualquer área de estudo o critério fundamental para a implantação de uma nova tecnologia é o custo benefício a ela associado. Para a implantação da infraestrutura de rede EON, critérios e avaliações de custos devem ser analisados.

Estudos demonstram que as redes EON podem trazer vários benefícios em termos de custos para as redes ópticas [70, 68, 69]. Estas economias dependem em grande parte da granularidade da rede EON, do tráfego de rede adotado e do modelo de custo assumido. Em [68] autores formulam uma PLI para analisar as implicações de custo para uma implementação de uma rede EON multicamada. Os autores comprovam através de experimentos que considerando topologias de redes reais e perfis de tráfegos esperados a curto e médio prazo, investimentos para a implantação de uma rede EON com granularidades de 12,5 GHz e 25 GHz são rentáveis em todos os cenários.

Em [67] os autores desenvolveram uma metodologia para a estimativa do valor da rede EON em comparação com soluções de redes WDM tradicionais. A metodologia foi aplicada em diferentes cenários para ambas as redes. Os resultados mostraram que se os elementos necessários para a implantação das redes EON (BVTs e BV-WXCs) custarem de 20% a 25% a mais que os elementos necessários para a implantação de redes WDM, então o investimento adicional pode ser justificado devido à utilização de espectro minimizada.

Outros trabalhos também procuram realizar uma comparação semelhante entre o custo benefício das duas tecnologias de redes ópticas. Em [101] os autores propõem um algoritmo para a sobrevivência de redes flexíveis que obtêm ganhos significativos em relação ao gasto de energia dos BVTs. Em [69] os autores desenvolvem técnicas para calcular o custo de implantação de uma rede EON. Em ambos estudos [101, 69] apesar da implementação da tecnologia EON custar de duas a três vezes mais que a tecnologia WDM tradicional, a

simplificação da camada IP/MPLS, bem como uma melhor utilização da capacidade das fibras já instaladas, motiva a sua implantação.

Além disso, a eficiência energética das redes EON recentemente começou a ser investigada e, cada vez mais, vêm ganhando atenção devido à consciência ambiental. Em [71] os autores destacam os benefícios oferecidos pelas redes EON em termos de eficiência energética. Os autores ainda comprovam que a elasticidade oferecida pela rede EON reduz o consumo de energia elétrica através do desligamento de subportadoras ociosas. Da mesma forma, em [64] os autores avaliam a eficiência energética dos transmissores EON. Os autores concluem que uma economia significativa de energia pode ser obtida através do uso de transmissores baseados na tecnologia dos SBVTs

3.1.7 Tecnologia do plano de controle

Mecanismos avançados de controle e gerenciamento de rede são essenciais para suportar o provisionamento de conexões neste novo paradigma de redes ópticas. Alguns estudos estão sendo realizados para definir protocolos de gerenciamento e controle da rede EON.

Em [102] os autores propõem duas soluções para implementação do plano de controle EON. Um baseado no protocolo GMPLS e outro baseado na tecnologia *OpenFlow*. Os resultados indicam que o plano de controle proposto baseado em *OpenFlow* obtêm melhores resultados em termos da latência e provisionamento de recursos.

Em [103] os mesmos autores propõem um sistema de recuperação a falhas baseado em *OpenFlow* e redes definidas por *software* para redes EON. A viabilidade e a eficiência da solução proposta, incluindo o plano de controle, foi avaliada na rede de teste real GENI¹. Os resultados comprovam a viabilidade da solução proposta em redes reais.

Os autores em [104] estudam técnicas para tirar vantagens do plano de controle centralizado da rede EON através do protocolo *OpenFlow* e a abordagem de redes definidas por *software*. Os autores propõem uma técnica de desfragmentação *online* e demonstram a eficácia da solução. Os resultados experimentais indicam que a abordagem pode melhorar o desempenho das redes EON.

Os autores em [105] apresentam um controle de gerenciamento adaptativo para o cenário de redes EON dinâmico. A técnica inclui a desfragmentação dinâmica do espectro, o controle da qualidade de transmissão da rede e sistemas de monitoramento e recuperação a falhas. São apresentados algoritmos que resolvem essas questões e seus resultados demonstram que o uso das técnicas reduzem a taxa de bloqueio pela metade. O trabalho também apresenta demonstrações experimentais para comprovar a eficácia e a viabilidade da implementação dessas técnicas de gerenciamento em redes ópticas da próxima geração.

¹<http://www.geni.net/>

Da mesma maneira em [106] os autores demonstraram um plano de controle experimental baseado em *OpenFlow* para o provisionamento de caminhos ópticos em redes ópticas elásticas. A proposta mostra a viabilidade do ajuste dinâmico do espectro através do uso do protocolo *OpenFlow*. Em [107] os autores apresentam um *framework* para o plano de controle baseado em SDN que realiza a desfragmentação *online* do espectro. Os resultados mostraram uma redução significativa na probabilidade de bloqueio da rede.

3.2 Literatura de referência

O grande número de pesquisas relacionadas com o paradigma EON cria fortes indícios que este será o futuro das redes ópticas. Além disso, uma série de questões ainda estão sendo exploradas, como foi apresentado na Seção 3.1, o que pode elevar ainda mais os benefícios das redes ópticas elásticas.

Estudos recentes [12, 89, 88], apresentados na Seção 3.1, mostraram que o uso da modulação adaptativa no regime de atribuição de espectro aumenta a eficiência da rede em cerca de 9% a 60% em relação a abordagens de modulação fixa. Regimes de atribuição de espectro baseados em modulação fixa não consideram o nível de modulação mais adequado para as diferentes solicitações de tráfego.

Normalmente, o nível de modulação selecionado é feito de forma conservadora, em que é escolhido um nível de modulação para todas as requisições de tráfego, independentemente da distância percorrida pelos caminhos ópticos que atendam a mesma. Por exemplo, uso do formato de modulação BPSK para todos os caminhos ópticos formados na rede, independentemente da sua distância. Além de ser uma generalização do problema real, o uso dessas abordagens não utiliza o espectro de forma eficiente.

Por outro lado, regimes de atribuição de espectro que levem em consideração o formato de modulação adequado para atender as requisições de tráfego são mais eficientes em termos de economia de recursos e apresentam um cenário mais próximo da realidade das redes ópticas [11, 32]. Por exemplo, um esquema de atribuição de espectro que utilize o formato de modulação BPSK para caminhos ópticos de longa distância e 16QAM para caminhos ópticos com distância mais curta. Isso irá minimizar o número de *slots* de espectro que devem ser atribuídos fazendo um melhor uso dos recursos de espectro em comparação com regimes de atribuição de espectro baseados em modulação fixa.

O uso da modulação adaptativa foi inicialmente apresentado em [12], onde os autores apresentaram o problema RMLSA como uma evolução do problema RSA com a adição do formato de modulação adaptativa à atribuição do espectro na fibra. Posteriormente o problema foi investigado em [17], onde os autores avaliam os efeitos da modulação adaptativa nos mesmos algoritmos de [44]. Em [17] os autores propõem um esquema de

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 uma PLI proposta 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 [17].

Um aspecto que pode elevar ainda mais a eficiência dos recursos da rede EON em abordagens RSA com modulação adaptativa (RMLSA) é o uso das técnicas de agregação de tráfego. Embora os algoritmos propostos em [87, 90, 17, 86] levem em consideração a modulação adaptativa, recursos como agregação de dados e espectro são ignorados pelos algoritmos. Em contrapartida, os algoritmos propostos em [100, 99, 16, 63, 15, 14] embora levem em consideração técnicas de agregação de tráfego não abordam o contexto de modulação adaptativa nas suas propostas.

Em toda a literatura, são poucos os trabalhos que investigam os efeitos do uso da agregação de dados e de espectro no cenário de modulação adaptativa. A Seção 3.1.4 apresentou os trabalhos [96] (agregação de dados) e [98] (agregação de dados e espectro). Os resultados destes trabalhos indicam que a técnica é bastante eficaz em relação ao uso do espectro e o atendimento de demandas.

O artigo [98] propôs o primeiro algoritmo de distância adaptativa com agregação de espectro e fragmentação consciente para redes EON. O algoritmo proposto foi o *Distance-adaptive and Fragmentation-aware optical Grooming algorithm* (DFG). No algoritmo DFG 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. O algoritmo ainda leva em consideração a modulação utilizada pelo túnel óptico e mostra que nem sempre a utilização da agregação de espectro é eficiente, pois a distância do último caminho óptico pode ser muito longa e prejudicar a modulação do túnel óptico como um todo.

A Figura 3.2 mostra a exemplificação da técnica proposta em comparação com uma abordagem que faz o máximo de agregação de espectro possível (ex.: algoritmo FPA). Na Figura 3.2(a) o algoritmo FPA atende as quatro demandas com uso de 14 *slots* mais 2 bandas de guardas, um total de 16 *slots*, na Figura 3.2(b) o algoritmo DFG atende as mesmas demandas com um total de 14 *slots*, pois foi utilizado outro nível de modulação nos nós *d1*, *d2* e *d3*.

A simulação do algoritmo é executada em cima da topologia NSFNet com 14 nós e 42

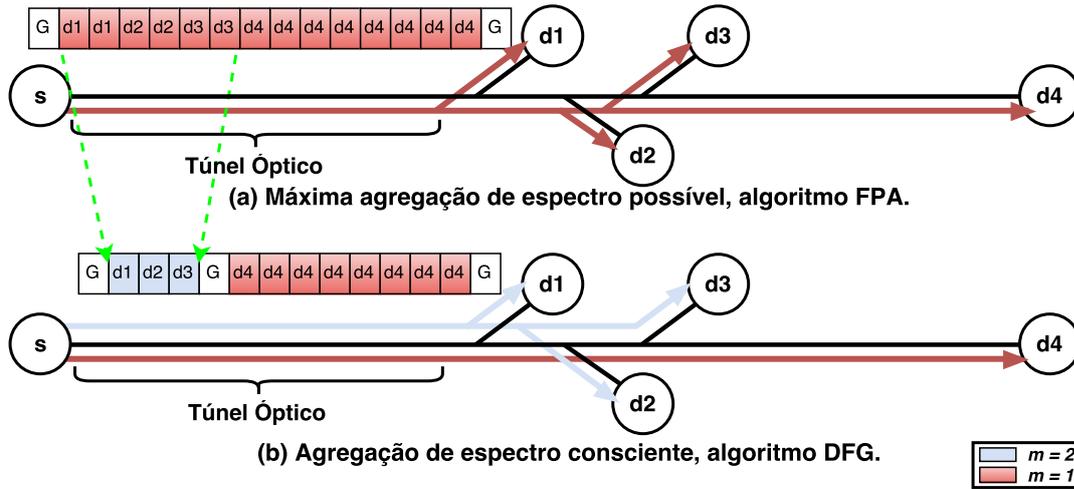


Figura 3.2: Problema de distância adaptativa com agregação de espectro.

enlaces. A granularidade da rede é de 12,5 GHz por *slot*. As modulações utilizadas foram BPSK, QPSK e 16QAM com eficiências de 1, 6;3, 2;6, 4 b/s/Hz e alcance de 8000, 3000, 1000 km respectivamente. A capacidade máxima de cada transmissor é de 400 Gb/s por caminho óptico. As fontes e destinos de cada demanda foram distribuídas uniformemente pela rede e a demanda de banda de cada solicitação foi entre 1 Gb/s a 200 Gb/s com distribuição uniforme.

Foram comparados ao algoritmo DFG, um algoritmo simples que não usa agregação de tráfego e o algoritmo *Least Spectrum Grooming algorithm* (LSG) de [16]. Os resultados do algoritmo DFG reduzem em até 14% o uso do espectro e até 13% a economia de transmissores em comparação com algoritmos existentes da literatura.

Embora os resultados em [98] tenham sido expressivos, o trabalho não leva em consideração o ambiente de rede dinâmico, somente a abordagem estática. Dessa forma, a maneira de como utilizar a técnica de agregação de espectro em relação ao nível de modulação adequado torna-se trivial. Outro fator importante não investigado em [98] é o uso de múltiplos saltos na topologia virtual (roteamento *multihop*).

Dentre todas as abordagens destacadas neste Capítulo, podem-se destacar as seguintes características: (i) seu cenário de tráfego, estático ou dinâmico; (ii) se a abordagem é capaz de realizar agregação de dados; (iii) se a abordagem é capaz de realizar agregação de espectro; (iv) seu tipo de roteamento, *singlehop* ou *multihop*; e (v) se sua modulação considerada é fixa ou adaptativa, se fixa, a abordagem é considerada RSA, se adaptativa a abordagem é considerada RMLSA.

A Tabela 3.1 resume as principais propostas da literatura, apresentadas neste Capítulo, para a resolução do problema de alocação de espectro em redes ópticas elásticas apresentando suas características.

Tabela 3.1: Principais propostas da literatura e suas características.

Proposta	Tráfego	Agregação de Dados	Agregação de Espectro	Roteamento	Modulação
KSP, MSP, SPV [44]	Dinâmico	Não	Não	Single-Hop	Fixa
RMLSA [12]	Estático	Não	Não	Single-Hop	Adaptativa
EMkPSF [87]	Estático	Não	Não	Single-Hop	Adaptativa
AFA-DCA [90]	Estático	Não	Não	Single-Hop	Adaptativa
GA-RMSA [86]	Dinâmico	Não	Não	Single-Hop	Adaptativa
TGA [14]	Estático	Sim	Não	Single-Hop	Fixa
MinT. MinS. [96]	Estático	Sim	Não	Single-Hop	Adaptativa
LB-SR [15]	Dinâmico	Sim	Não	Multi-Hop	Fixa
OG-SE [99]	Dinâmico	Não	Sim	Single-Hop	Fixa
MTG [16]	Estático	Não	Sim	Single-Hop	Fixa
FPA [100]	Dinâmico	Não	Sim	Single-Hop	Fixa
MPH [63]	Dinâmico	Sim	Sim	Multi-Hop	Fixa
DFG [98]	Estático	Sim	Sim	Single-Hop	Adaptativa
MBM (Capítulo 4)	Dinâmico	Sim	Sim	Multi-Hop	Adaptativa

Capítulo 4

Maximizando o Uso do Melhor Nível de Modulação

Na Seção 3.2 foram apresentados diversos trabalhos que abordam a questão da agregação dinâmica de dados e espectro em redes ópticas EON. Embora os trabalhos [100, 99, 16, 63, 15, 14] abordem essas questões, nenhum deles leva em consideração as abordagens de modulação adaptativa do canal. Todos os testes são realizados com a modulação única. A variação dos níveis de modulação não são consideradas e, particularmente, a não variação da modulação diminui bastante a complexidade da solução.

Embora os algoritmos propostos em [87, 90, 17, 86] levem em consideração a modulação adaptativa, recursos como agregação de dados e espectro são ignorados pelos algoritmos. Isso reduz a eficiência da solução, pois, como já mencionado, técnicas de agregação são bastante eficazes em relação ao uso do espectro e o atendimento de demandas.

Os trabalhos de [96] e [98], também apresentados na Seção 3.2, embora levem em consideração a questão da modulação adaptativa, não aplicam a solução em um cenário de rede dinâmico, somente a abordagem estática. Dessa forma, a maneira de como utilizar a técnica de agregação de espectro em relação ao nível adequado de modulação torna-se simples.

A solução proposta neste Capítulo leva em consideração todos os aspectos mencionados: *(i)* o uso da agregação de dados para um maior aproveitamento dos recursos não utilizados dos canais; *(ii)* o uso da agregação de espectro para um uso mais eficiente dos recursos; *(iii)* o uso da modulação adaptativa para aproveitar ao máximo os níveis de modulação fornecido, economizando recursos de espectro na rede; *(iv)* utilizar o cenário de tráfego dinâmico para o atendimento de requisições; e *(v)* alocação de espectro através do roteamento *multihop*.

Até o momento, nenhum dos trabalhos encontrados na literatura investiga os efeitos dessas questões em conjunto. Este Capítulo apresenta um algoritmo RMLSA que promove

o uso do maior nível de modulação suportado pela rede. A ideia geral é tentar realizar a maior agregação de espectro possível usando o nível de modulação mais alto através de múltiplos saltos na topologia virtual (roteamento *multihop*).

O algoritmo proposto foi projetado para tirar proveito do esquema de modulação adaptativa *mAdap*, proposto em [17], todavia, o algoritmo não requer a aplicação do *mAdap* para resolver o problema RMLSA.

4.1 Proposta: Algoritmo MBM

O algoritmo proposto MBM (*Maximize the use of Best Modulation format*) procura realizar o maior uso da agregação de espectro possível, associado ao uso do nível de modulação mais alto. Dessa forma, para que uma transmissão óptica entre dois nós distantes seja realizada com o uso de um nível de modulação alto é necessário que essa transmissão óptica seja composta por vários caminhos ópticos mais curtos que possam atender os requisitos de QoT dos níveis de modulação mais altos.

Assim, é possível utilizar menos recursos de espectro ao custo de utilizar mais conversões OEO na rede. Em outras palavras, utilizam-se mais transmissores, ao custo de economizar mais espectro. Entretanto, essa abordagem não acarretará grandes prejuízos na rede, pois o uso da agregação de espectro da tecnologia EON beneficia o uso da técnica de *multihop* na viabilização de novos pontos de entrada para a agregação de dados e espectro.

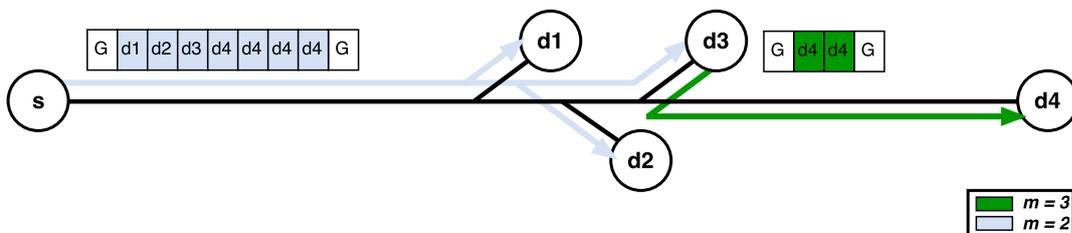


Figura 4.1: Exemplificação do algoritmo MBM.

A Figura 4.1 mostra um exemplo da sua lógica de funcionamento. Seguindo o mesmo exemplo da Figura 3.2, o nó d_4 está muito distante do nó de origem s e por sua vez é alcançado com QoT aceitável somente com o nível de modulação $m = 1$. Por outro lado, os nós de destino d_1 , d_2 e d_3 podem ser alcançados pelo nível de modulação $m = 2$. A proposta de [98], Figura 3.2(b), observa essa situação e divide o túnel óptico em dois túneis ganhando recursos de espectro. No entanto, a demanda que contém a maior distância continua com o mesmo nível de modulação. No caso do algoritmo MBM, o uso do *multihop*

traz a vantagem de usar caminhos ópticos menores e, por sua vez, utilizar níveis de modulação maiores.

O exemplo da Figura 4.1 mostra a vantagem do uso do algoritmo MBM. Como no algoritmo DFG, as demandas com destino aos nós $d1$, $d2$ e $d3$ continuam sendo enviadas pelo nível de modulação $m = 2$, entretanto a demanda com destino ao nó $d4$, que requeria 8 *slots* no nível de modulação $m = 1$, é enviada até o nó $d3$ com o nível de modulação $m = 2$, através do uso da agregação de espectro. Quando a demanda com destino $d4$ chega ao nó $d3$ ocorre uma conversão OEO e outro transmissor é utilizado com um nível de modulação maior possível, que neste caso é $m = 3$. Dessa forma, o algoritmo MBM utiliza ao todo 13 *slots* para enviar as quatro demandas enquanto o algoritmo DFG utiliza 14 *slots*. O algoritmo MBM foi projetado para potencializar o esquema de modulação adaptativa *mAdap* proposto em [17]. Todavia, o MBM não requer a aplicação do esquema *mAdap* para resolver o problema RMLSA.

A abordagem utilizada pelo algoritmo MBM é descrita no **Algoritmo 1**, onde AD representa a agregação de dados e AE representa a agregação de espectro.

O algoritmo MBM é baseado em três estratégias para aceitar a requisição r : Uma estratégia *singlehop* que procura utilizar agregação de dados e espectro (linhas 4-14); uma estratégia *multihop* que procura utilizar agregação de dados e espectro através de múltiplos saltos na topologia virtual (linhas 15-44); e uma estratégia *singlehop* simples, sem técnicas de agregação, baseada no algoritmo KSP [44, 17] (linhas 45-50). As estratégias são descritas a seguir:

Inicialmente cria-se duas estruturas compostas por k -menores caminhos disjuntos e não disjuntos através de uma execução *off-line* (linhas 1-2). Em seguida, para cada requisição, o algoritmo MBM procura um caminho óptico alocado na rede para realizar uma AD através da política *least loaded*, que procura o caminho óptico com maior sobra de banda, dentre os possíveis, para realizar a agregação de dados (linha 4).

Caso não seja possível realizar AD fim-a-fim, o algoritmo obtém os k menores caminhos disjuntos de s até d (linha 7) e tenta realizar uma AE . O algoritmo procura os caminhos ópticos com origem s que compartilham o máximo de enlaces possíveis com $Paths[i]$ (linhas 8-10). Verifica se este caminho óptico possui capacidade de agregação de espectro, caso possua, realiza-se a agregação de espectro de forma que este caminho óptico agregado seja fim-a-fim, como acontece no algoritmo FPA [100] (linha 11).

Caso não encontre um caminho que atenda esses requisitos para realizar uma AE , então parte-se para a estratégia com múltiplos saltos (*multihop*). O algoritmo obtém os k -menores caminhos (linha 15) e procura dentre os mesmos se é possível realizar AD ou AE , respectivamente, sobre os caminhos ópticos que compõem o caminho $Paths[i]$, realizando assim, múltiplos saltos na topologia virtual (linhas 16-35). Ainda no final do

Algoritmo 1 *Maximize the use of Best Modulation format – MBM*

```
1:  $kDPaths \leftarrow$  todos os  $k$ -menores caminhos disjuntos (off-line)
2:  $kSPaths \leftarrow$  todos os  $k$ -menores caminhos (off-line)
3: para cada requisição de conexão  $r(s, d, b)$  faça
4:   se possível fazer  $AD$  com  $r$  de  $s$  até  $d$  então ▷ (Estratégia singlehop)
5:     aceita a requisição  $r$ 
6:   senão
7:      $Paths \leftarrow kDPaths(s, d)$ 
8:     para  $i \leftarrow 1$  até  $k$  faça
9:       Procura um caminho óptico com origem em  $s$  que compartilha o máximo de enlaces com
        $Paths[i]$ 
10:      se encontrou um caminho óptico e for possível fazer  $AE$  com  $r$  de  $s$  até  $d$  então
11:        aceita a requisição  $r$ 
12:      fim se
13:    fim para
14:  fim se
15:   $Paths \leftarrow kSPaths(s, d)$  ▷ (Estratégia multihop)
16:  para  $i \leftarrow 1$  até  $k$  faça
17:     $s' \leftarrow s$ 
18:     $d' \leftarrow s$ 
19:    enquanto  $d' \neq d$  faça
20:      Procura um caminho óptico com origem em  $s'$  que compartilha o máximo de enlaces com
       $Paths[i]$ 
21:      se encontrou um caminho óptico então
22:         $d' \leftarrow$  o último nó compartilhado
23:        se possível fazer  $AD$  com  $r$  de  $s'$  até  $d'$  então
24:           $s' \leftarrow d'$ 
25:        senão
26:          se possível fazer  $AE$  com  $r$  de  $s'$  até  $d'$  então
27:             $s' \leftarrow d'$ 
28:          senão
29:            Sai do laço
30:          fim se
31:        fim se
32:      senão
33:        Sai do laço
34:      fim se
35:    fim enquanto
36:    se  $s' = d$  então
37:      aceita a requisição  $r$ 
38:    senão
39:      Criar um novo caminho óptico de  $s'$  até  $d$  com o algoritmo  $KSP$  com nível de modulação
      adequado a distância
40:      se for possível criar caminho óptico então
41:        aceita a requisição  $r$ 
42:      fim se
43:    fim se
44:  fim para ▷ (Estratégia singlehop)
45:  Executar o algoritmo  $KSP$  na requisição  $r$  com origem  $s$  e destino  $d$  com o maior nível de
  modulação adequado a distância
46:  se for possível criar um caminho óptico então
47:    aceita a requisição  $r$ 
48:  senão
49:    bloqueia a requisição  $r$ 
50:  fim se
51: fim para
```

laço, o algoritmo procura criar um novo caminho óptico com o maior nível de modulação adequado a distância para compor o restante do caminho $Paths[i]$ que não foi possível ser completado pela agregação de tráfego (linhas 36-44).

Por fim, se não for possível realizar nenhum tipo de agregação na requisição, então o algoritmo executa a estratégia utilizada pelo algoritmo KSP com o nível de modulação adequado a distância usando uma abordagem *singlehop* (linha 45). Se mesmo assim não for possível criar um caminho óptico, então a requisição é bloqueada (linha 49).

É interessante notar, que o uso da estratégia *multihop* do MBM associado ao esquema de modulação adaptativa *mAdap* procura sempre utilizar o maior nível de modulação possível, neste caso, o melhor nível de modulação possível dado a distância. Em outras palavras, o algoritmo MBM potencializa o esquema de modulação adaptativa *mAdap* provocando a utilização dos maiores níveis de modulação suportados na rede, com o intuito de economizar espectro.

A junção do esquema *mAdap* ao algoritmo MBM, torna a proposta do algoritmo uma estratégia gulosa. O uso de múltiplos saltos na topologia virtual provoca a utilização de mais transmissores na rede. Entretanto, a agregação de espectro faz com que o aumento do uso de transmissores não seja um fator significativo, pois à medida que novos transmissores são ativados em pontos distribuídos na rede, os mesmos podem ser reaproveitados para a agregação de novas demandas.

4.2 Complexidade do Algoritmo MBM

A complexidade de tempo do algoritmo MBM é analisada como segue. A primeira estratégia (linhas 4-14) é dominada por duas etapas: (i) a verificação inicial de possível agregação de dados (linha 4); e (ii) a verificação de possível agregação de espectro em k rotas (linhas 8-13). Tendo em vista que o número máximo de caminhos ópticos alocados na rede é $|E||S|$, onde E é o conjunto de enlaces na rede e S é o conjunto de *slots* em cada enlace, tem-se que a complexidade da primeira etapa é $O(|E||S|)$. A complexidade da segunda etapa segue o mesmo raciocínio em k rotas, logo tem-se uma complexidade de $O(k * |E||S|)$. Portanto, a primeira estratégia tem uma complexidade de tempo equivalente a $O(k * |E||S|)$.

A segunda estratégia (linhas 15-44) é dominada por duas etapas: (i) a verificação de possível agregação de dados (linha 23) e/ou possível agregação de espectro (linha 26); e (ii) a execução do algoritmo KSP (linha 39). Seguindo o raciocínio anterior, a complexidade da primeira etapa é $O(|E||S|)$ para realizar agregação de dados ou agregação de espectro. Na segunda etapa, marcada pela execução do algoritmo KSP, tem-se uma complexidade de $O(k)$, uma vez que o algoritmo YenKSP [85] é executado *offline* [17].

Portanto, considerando os laços das linhas (16/19), a segunda estratégia tem uma complexidade equivalente a $O(k * N * |E||S| + k^2)$, onde N é o número de nós na rede.

A terceira estratégia (linhas 45-50) tem apenas uma etapa que é a execução do algoritmo KSP, logo sua complexidade é de $O(k)$. Como a segunda estratégia é a que impõem a maior complexidade, tem-se que a complexidade do algoritmo MBM é de $O(k * N * |E||S| + k^2)$ que é polinomial.

4.3 Resultados de Simulação

Nesta Seção, avalia-se o desempenho do algoritmo MBM em comparação com demais algoritmos da literatura, em diferentes topologias de rede para diferentes cenários de carga.

4.3.1 Ambiente de Simulação

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 entre 15 níveis de granularidade variando de 12,5 Gb/s até 100 Gb/s com passos de 6,25 Gb/s. O processo de chegada das chamadas segue a distribuição de *Poisson* 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 (Figura 4.2), e a topologia PanEuro com 27 nós e 81 enlaces bidirecional (Figura 4.3). Em ambas as Figuras, 4.2 e 4.3, as distâncias apresentadas estão em quilômetros.

Foi considerada a largura de banda de cada *slot* como sendo 12,5 GHz e foi assumido que cada enlace possui a capacidade de 120 *slots* (1,5 THz). Admite-se uma banda de guarda de 2 *slots* (25 GHz). Assume-se que cada nó na topologia possui 15 transmissores e cada transmissor tem a capacidade máxima de transmitir até 8 *slots*.

As modulações consideradas são BPSK, QPSK, 8QAM e 16QAM com 1, 2, 3 e 4 bits por símbolo, respectivamente, de acordo com [12]. Os alcances considerados de cada modulação seguiram a lei da meia distância de [41] e, considerando eventuais regeneradores de sinal, calcula-se as distâncias máximas como sendo 8000, 4000, 2000 e 1000 Km para as modulações BPSK, QPSK, 8QAM e 16QAM, respectivamente.

Foram comparados sete algoritmos da literatura com o algoritmo MBM. Os algoritmos KSP, MSP e SPV [44, 17] não realizam agregação de tráfego para resolver o problema RSA. No entanto, estas propostas servem como base para analisar o ganho do uso das

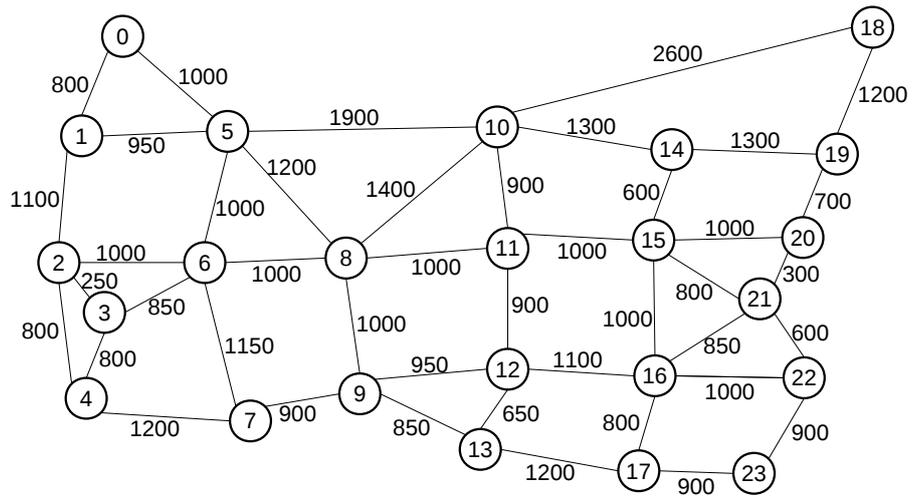


Figura 4.2: Topologia USANet.

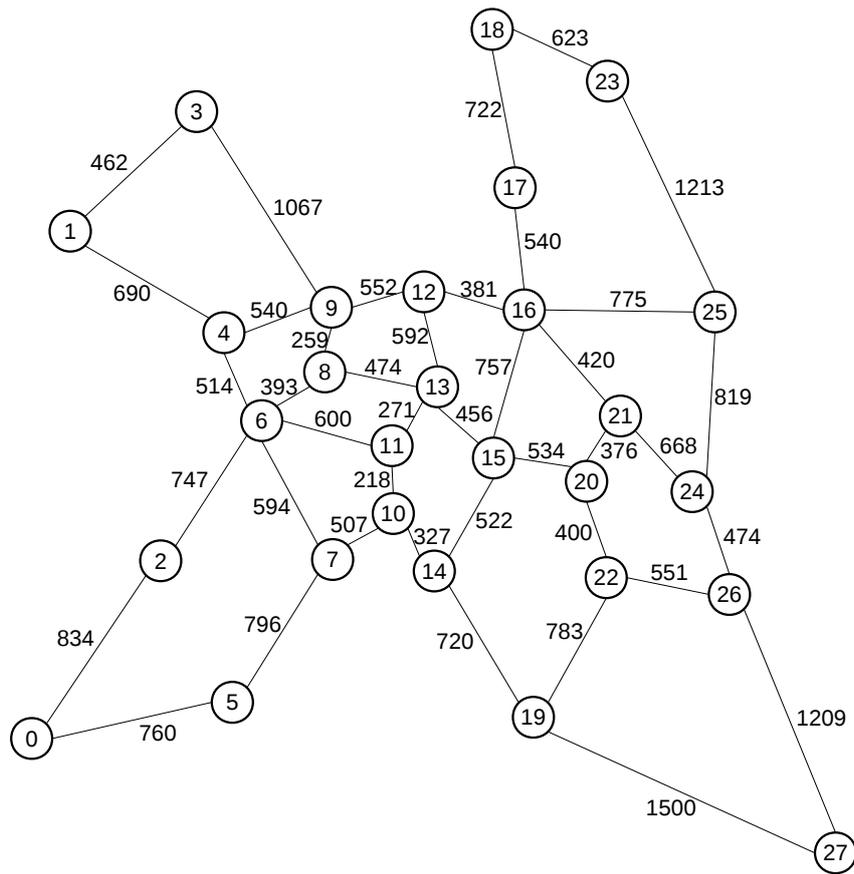


Figura 4.3: Topologia PanEuro.

técnicas de agregação de tráfego (dados e espectro). Todos os algoritmos utilizam a estratégia de roteamento *singlehop*.

O algoritmo FPA [100], considera o uso das técnicas de agregação de tráfego. No entanto, esse algoritmo ainda utiliza a estratégia de roteamento *singlehop*. O algoritmo LB, com o esquema de reserva SRLP, que obteve os melhores resultados em [15], considera o uso da técnica de agregação de dados e a estratégia de roteamento *multihop*.

Já o algoritmo MPH, que obteve os melhores resultados em [63], considera ambas as tecnologias de agregação de dados e espectro além de utilizar a estratégia de roteamento *multihop*. O algoritmo MPH é posto sobre ambos os esquemas de reserva de espectro SRLP e SRNP, formando assim os últimos dois algoritmos considerados nesta comparação.

Foi considerado no uso dos algoritmos KSP, MPH-SRLP e MPH-SRNP o parâmetro $k = 3$ e a política de FF (*First Fit*) para resolver o problema RSA e encontrar os caminhos ópticos. Para os algoritmos MPH-SRLP e MPH-SRNP, especificamente, foram considerados o uso de 8 sub-transmissores por transmissor com capacidades de 4 subportadoras de acordo com as definições de [63]. O uso de 8 sub-transmissores por transmissor foi considerado para que haja equilíbrio entre as comparações dos algoritmos. Assim, todos os algoritmos podem agregar até 8 caminhos ópticos em um túnel óptico.

Para tornar todas as abordagens avaliadas capazes de resolver o problema RMLSA e garantir um ambiente de avaliação justo, todos os algoritmos foram avaliados sob o esquema *mAdap* (Figura 3.1) conforme [17]. Portanto, todos os algoritmos são capazes de resolver o problema RMLSA.

As seguintes métricas são avaliadas: (i) Taxa de bloqueio de banda (BBR); (ii) taxa média de transmissores disponíveis; (iii) média de transmissores por requisição; (iv) média de saltos na topologia virtual por requisição; (v) média de saltos na topologia física por requisição; (vi) média da taxa de espectro disponível; e (vii) taxa média do uso de modulação.

As métricas referentes à utilização de recursos na rede são avaliadas para evidenciar os ganhos relativos aos mecanismos implementados no algoritmo MBM. Além disso, soluções de engenharia de tráfego que levam à redução na utilização dos recursos instalados na rede, contribuem para a diminuição de sua probabilidade de exaustão.

4.3.2 Exemplos Numéricos

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 4.4 e 4.5 mostram o BBR dos al-

goritmos considerados para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

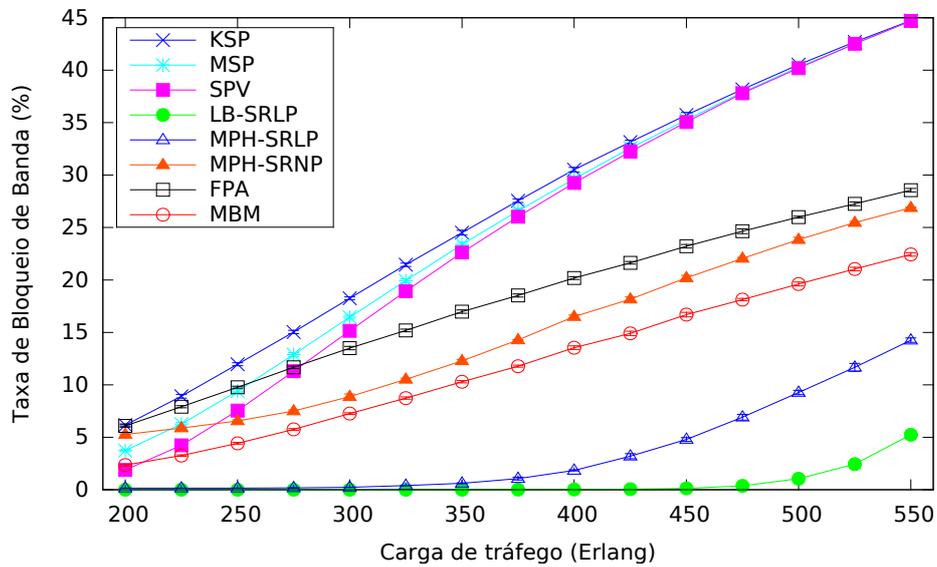


Figura 4.4: Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia USANet.

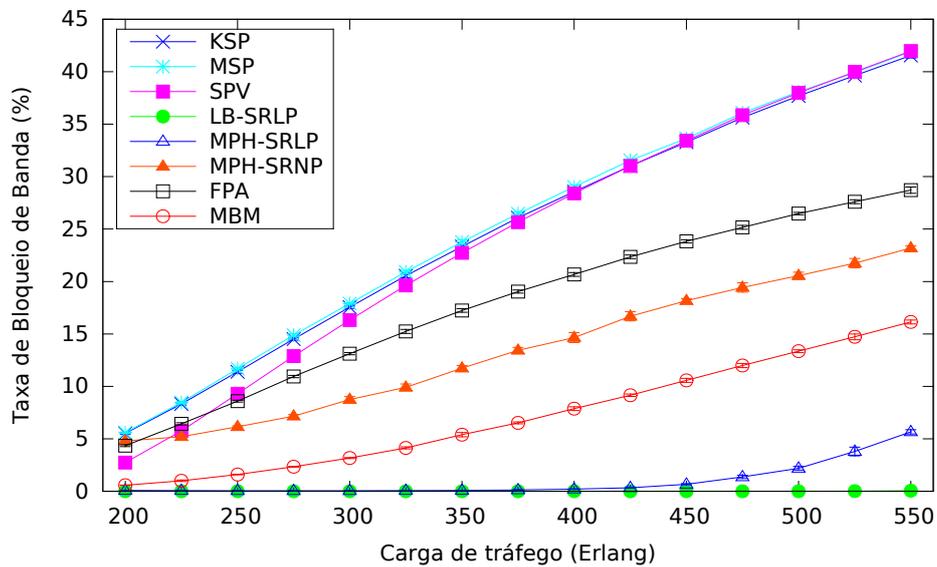


Figura 4.5: Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia PanEuro.

Pode-se observar que o algoritmo MBM obteve o menor bloqueio de banda frente aos algoritmos KSP, MSP, SPV, FPA e MPH-SRNP. Em relação aos algoritmos KSP, MSP e SPV a diferença na taxa de bloqueio em relação ao MBM caiu pela metade, em relação aos algoritmos FPA e MPH-SRNP o seu ganho foi de até 81% para cargas baixas e 43%

para cargas mais altas. Isso acontece, pois ao considerar múltiplos saltos na topologia virtual o algoritmo tem mais possibilidades para atender as demandas, tendo em vista que os requisitos de continuidade são aliviados com o uso do roteamento *multihop*.

Embora o algoritmo MPH-SRNP também realize *multihop*, sua técnica de minimizar o número de saltos na topologia física faz com que suas rotas percorram maiores distâncias e conseqüentemente leve o esquema de modulação adaptativa (*mAdap*) utilizar níveis de modulação menores. O não aproveitamento adequado dos maiores níveis de modulação provoca uma queda no desempenho do MPH-SRNP.

É necessário observar que o algoritmo MBM segue o mesmo padrão dos algoritmos FPA e MPH-SRNP à medida que a carga aumenta. Isso mostra a consistência e a linearidade do algoritmo, a taxa de bloqueio cresce linearmente com a carga do tráfego. O mesmo não acontece aos algoritmos MPH-SRLP e LB-SRLP.

Os algoritmos MPH-SRLP e LB-SRLP obtiveram os melhores resultados de BBR, uma diferença de cerca de 10% a 15% a menos na taxa de bloqueio de banda em relação ao MBM. Na topologia PanEuro praticamente não houve bloqueio para o algoritmo MPH-SRLP. Observa-se no entanto, que o uso do esquema de reserva de espectro SRLP é bastante eficaz em termos de BBR quando a abordagem é posta sob o esquema *mAdap*.

O esquema SRLP sob *mAdap* faz com que a rede tenha vários caminhos ópticos de grande capacidade, pois os caminhos ópticos são estabelecidos com a capacidade total do transmissor no maior nível de modulação. Dessa maneira, os algoritmos MPH-SRLP e LB-SRLP se aproveitam das técnicas de agregação de dados melhorando a taxa de bloqueio. No entanto, essa abordagem provoca um uso excessivo de conversões OEO o que provoca um uso mais elevado de transmissores na rede e um pior desempenho na média do número de saltos virtuais por requisição.

Os algoritmos MPH-SRLP e LB-SRLP tendem a crescer a taxa de bloqueio exponencialmente com o aumento da carga de tráfego. Isso acontece pois à medida que o tráfego cresce, a taxa de utilização de transmissores aumenta, e as demandas começam a ser bloqueadas por falta de transmissores na rede.

Pode-se observar que o pior resultado é o do algoritmo KSP, isso já era esperado, desde [17]. Observa-se também que à medida em que o tráfego cresce a disparidade entre os algoritmos KSP, MSP e SPV diminui, já que ambos são baseados no *Dijkstra* e não utilizam técnicas de agregação de tráfego.

Taxa média de transmissores disponíveis

A taxa de transmissores disponíveis reflete a usabilidade do número de transmissores, quanto maior for essa taxa, maior a quantidade de transmissores disponíveis na rede. As

Figuras 4.6 e 4.7 mostram os resultados para as topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

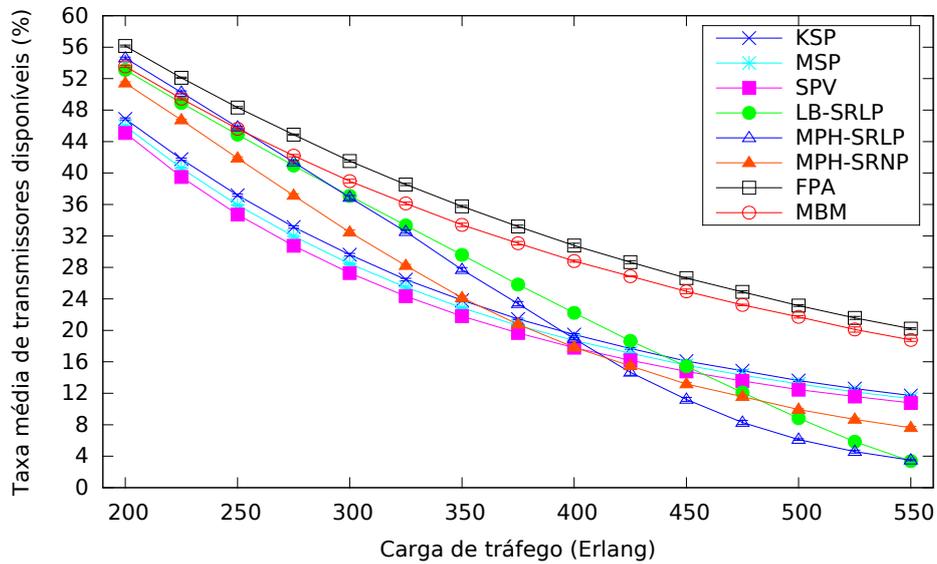


Figura 4.6: Taxa média de transmissores disponíveis para topologia USANet.

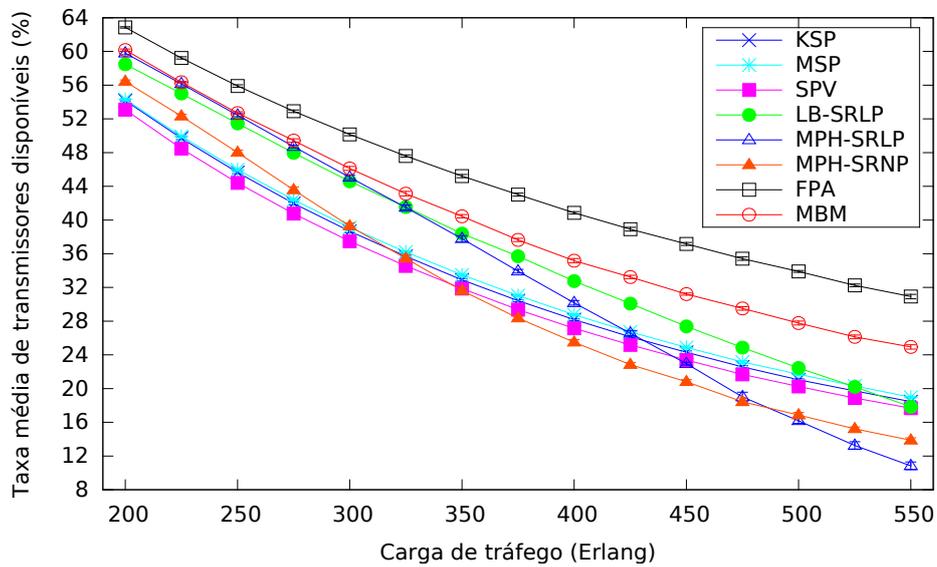


Figura 4.7: Taxa média de transmissores disponíveis para topologia PanEuro.

Observa-se que o uso de transmissores no algoritmo MBM é um pouco superior ao do algoritmo FPA e bem inferior aos demais. No entanto, isso já era esperado, tendo em vista que o uso da técnica de *multihop* exige um maior uso de transmissores na rede.

É importante notar a proximidade do MBM com o FPA, cerca de 2% na topologia USANet e 5% na topologia PanEuro. Nos demais algoritmos a taxa de utilização de transmissores é cerca de 15% maior que a do MBM. Isto demonstra que o aumento do uso de transmissores do algoritmo MBM não trouxe um impacto significativo quando comparado aos ganhos de BBR, o mesmo não acontece aos demais algoritmos com a característica *multihop*.

Os algoritmos MPH-SRNP, MPH-SRLP e LB-SRLP utilizam um número muito maior de transmissores na rede, demonstrando um uso de até duas vezes a mais do que o MBM. Observa-se também, que a taxa média de transmissores disponíveis teve uma queda mais acentuada com o aumento da carga para esses algoritmos, principalmente para os algoritmos MPH-SRLP e LB-SRLP que utilizam o esquema de reserva SRLP. Isto evidencia a eficiência do algoritmo MBM.

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. As Figuras 4.8 e 4.9 mostram a média do número de transmissores utilizados por conexão sob várias cargas de tráfego nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

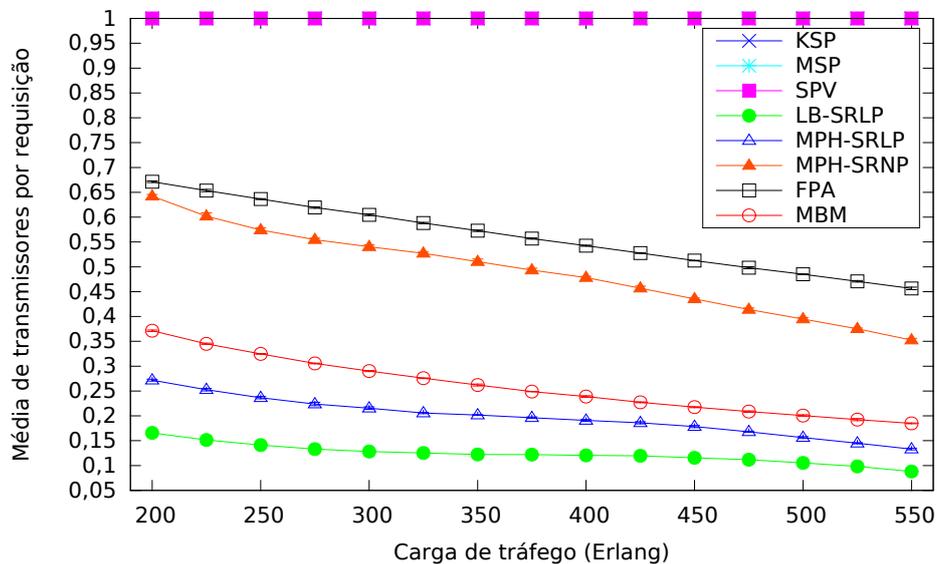


Figura 4.8: Média de transmissores por requisição para topologia USANet.

Observa-se que o número de transmissores utilizados por requisição é igual a 1 para os algoritmos KSP, MSP e SPV, pois os mesmos não realizam técnicas de agregação de tráfego (dados e espectro). Para os demais algoritmos, o número é inferior a 1. Isto se

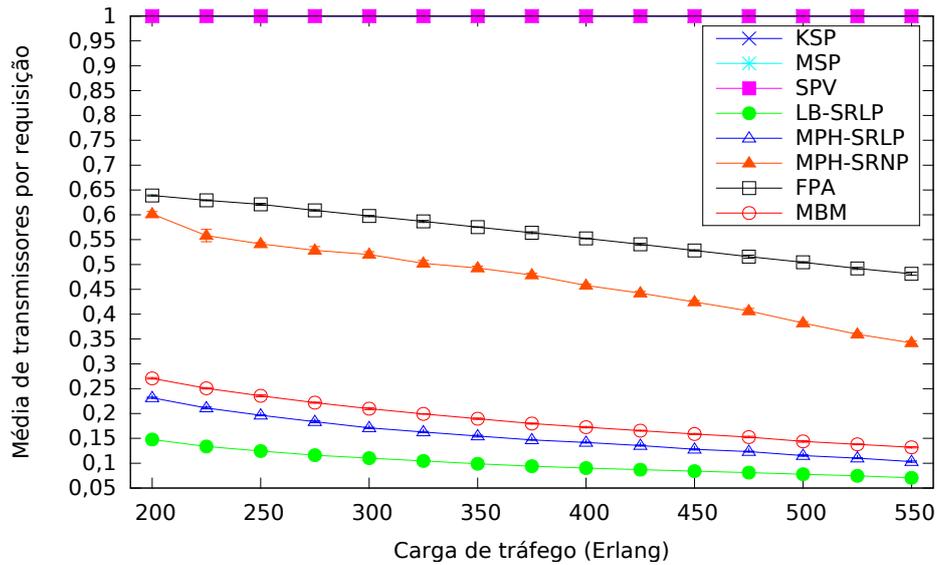


Figura 4.9: Média de transmissores por requisição para topologia PanEuro.

deve ao fato que, com o uso da agregação de dados e espectro, múltiplas conexões podem compartilhar um mesmo transmissor. Ou seja, observa-se a capacidade do algoritmo de realizar agregação de tráfego.

Quanto menor a taxa, maiores são as capacidades dos transmissores realizarem a agregação de tráfego para múltiplos fluxos. Observa-se que os transmissores são melhores utilizados pelas técnicas de agregação de tráfego nos algoritmos que utilizam a estratégia *multihop*. Isso acontece pois o *multihop* ajuda na viabilização de novos pontos de entrada na rede para a agregação de tráfego.

Assim, os algoritmos que realizam mais saltos são os que realizam mais agregação de tráfego e obtêm um melhor uso de transmissores na rede. Observa-se que os algoritmos que utilizam o esquema SRLP são os que mais utilizam agregação de tráfego, já que sua característica é estabelecer caminhos ópticos de grandes capacidades. Isso demonstra que os algoritmos que utilizam o esquema SRLP estabelecem poucos caminhos ópticos durante toda a simulação e por sua vez realizam um roteamento *multihop* mais agressivo que os demais.

Com exceção aos algoritmos LB-SRLP e MPH-SRLP, o algoritmo MBM consegue aproveitar bem as técnicas de agregação de tráfego, provocando um bom uso do espectro na rede. O MBM obtêm um ganho de mais de 100% no uso de transmissores por requisição frente aos demais algoritmos. Nota-se também que à medida que a carga cresce a disparidade entre os algoritmos LB-SRLP, MPH-SRLP e MBM diminui.

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 PanEuro, respectivamente.

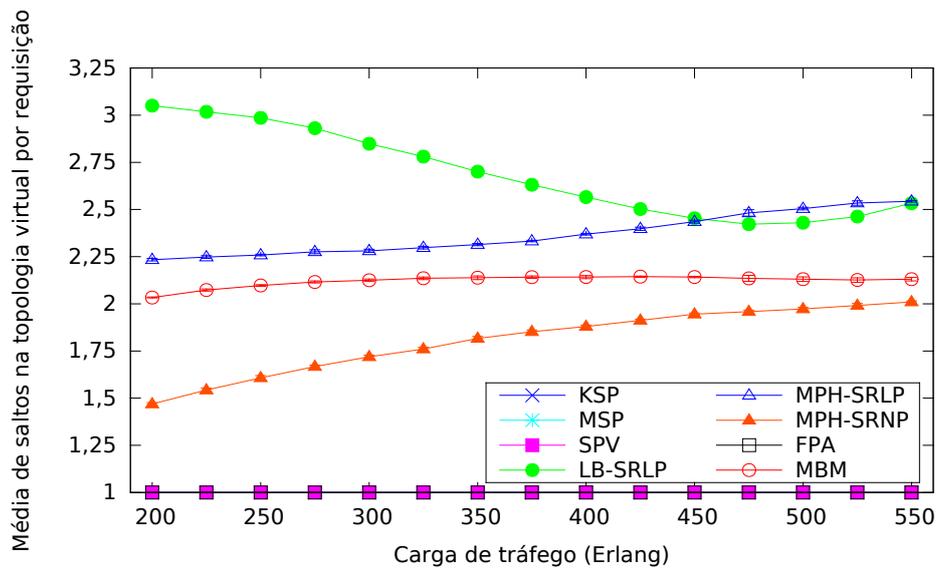


Figura 4.10: Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia USANet.

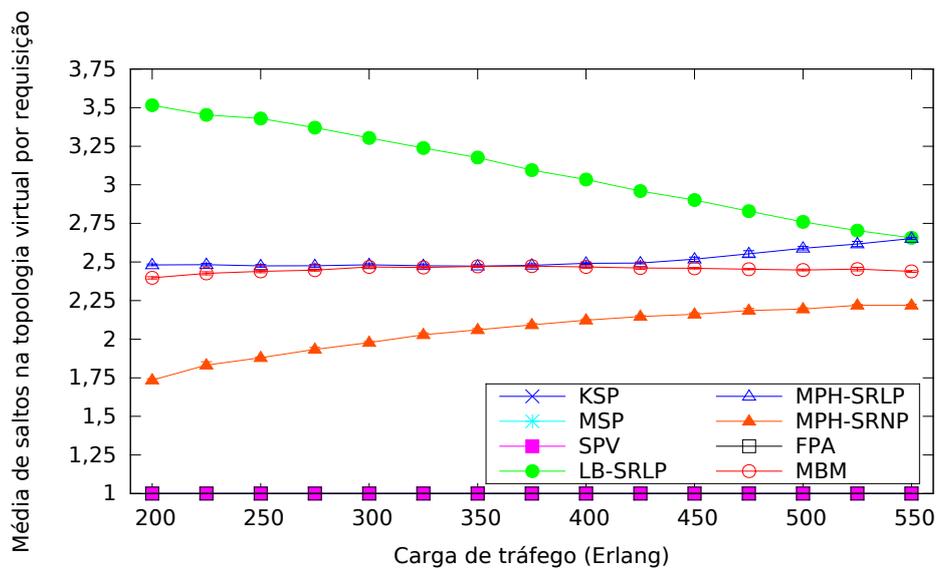


Figura 4.11: Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia PanEuro.

Os algoritmos KSP, MSP, SPV e FPA mantêm em todas as cargas de tráfego uma média igual a 1, pois esses algoritmos são *singlehop*. Pode-se observar que o algoritmo MBM mantém sua média de saltos entre 2 e 2,5 por requisição mesmo com o crescimento do tráfego. O mesmo não acontece ao algoritmo MPH-SRNP, onde sua tendência é aumentar o número de saltos com o crescimento do tráfego devido sua característica de reserva de espectro.

Para os algoritmos LB-SRLP e MPH-SRLP a média de saltos fica entorno de 2,25 a 3,5 por requisição. O número de saltos virtuais do algoritmo MPH-SRLP tende a aumentar conforme acontece ao algoritmo MPH-SRNP. Por outro lado, o número de saltos virtuais do algoritmo LB-SRLP diminui com o aumento da carga. Isso reflete a característica do algoritmo LB, que procura balancear o número de saltos na topologia virtual e física conforme descrito na Seção 3.1.4.

O algoritmo MBM, por sua vez, faz em média, dois saltos para atender uma requisição usando, em geral, o melhor nível de modulação possível. Observa-se que essa característica do MBM não afeta negativamente o desempenho do algoritmo, como demonstrado anteriormente. Pode-se inferir que a partir de redes opacas, na qual a conversão OEO é imposta em cada nó intermediário do caminho, é possível obter uma melhor eficiência do espectro, conseqüentemente um melhor desempenho do BBR, em detrimento de custos CAPEX/OPEX mais elevados, como número de transmissores [15].

Média de saltos na topologia física por requisição

O número de saltos na topologia física reflete diretamente no uso de recursos espectrais de toda a rede. Esse número também pode refletir no uso das diferentes modulações, tendo em vista que níveis de modulação menores podem, em geral, realizar mais saltos na rede. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram a média de saltos na topologia física por requisição para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

Observa-se que em todos os algoritmos, com exceção aos algoritmos MPH-SRNP, MPH-SRLP e LB-SRLP, à medida que a carga cresce o número de saltos físicos diminui. À medida que a carga de tráfego cresce, os algoritmos MPH-SRNP, MPH-SRLP e LB-SRLP tendem a procurar caminhos maiores em seus grafos auxiliares para atender os fluxos, em contrapartida, a característica dos demais algoritmos baseados em k -menores distâncias fazem com que caminhos ópticos maiores tenham menor probabilidade de serem alocados na rede, logo, quando a carga de tráfego é grande, caminhos ópticos que são mais curtos têm maior probabilidade de atender os requisitos do problema RSA por exigir menos recursos da rede.

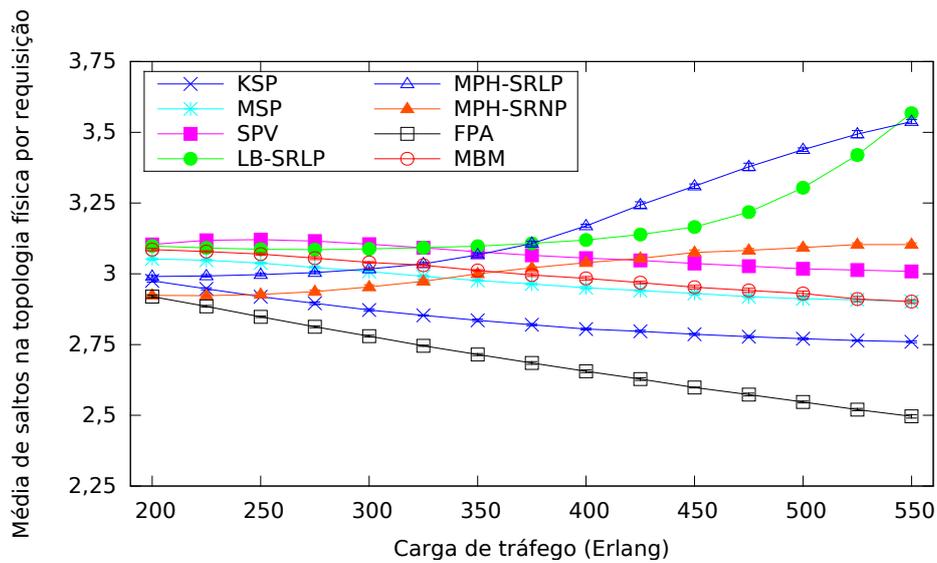


Figura 4.12: Média de saltos na topologia física por requisição para topologia USANet.

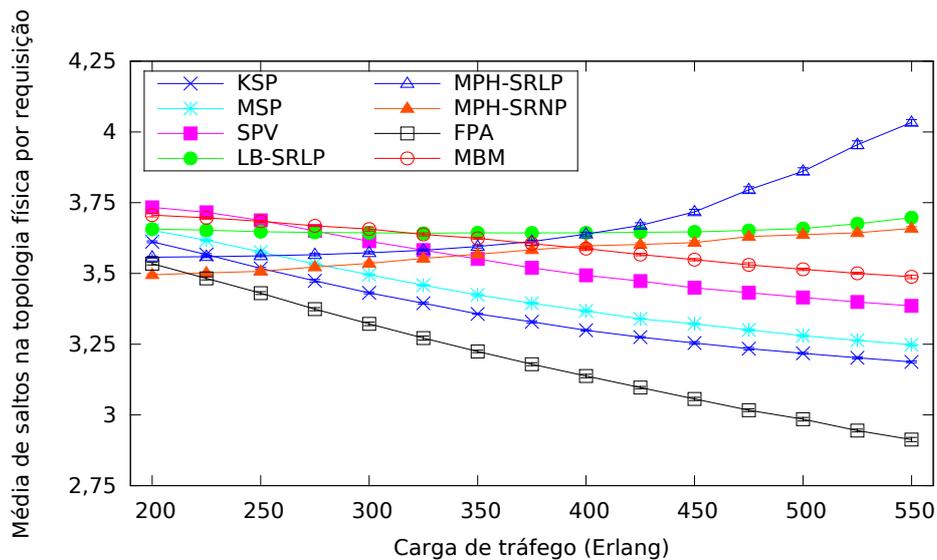


Figura 4.13: Média de saltos na topologia física por requisição para topologia PanEuro.

Observa-se que o algoritmo FPA tem a menor média de saltos físicos frente aos demais algoritmos, isso mostra a grande eficiência das técnicas de agregação de tráfego, uma vez que o FPA é o único algoritmo *singlehop* que utiliza essas técnicas.

O algoritmo MBM obtém valores medianos frente aos demais algoritmos, cerca de 3,5 saltos por requisição em ambas às topologias. Isso acontece, pois o uso da técnica de *multihop* faz com que o algoritmo procure caminhos maiores na rede, no entanto, o seu uso de espectro não é mais alto, pois ele procura aproveitar melhor os níveis de modulação

mais altos.

Por outro lado, os algoritmos MPH-SRNP, MPH-SRLP e LB-SRLP obtêm uma média bastante alta e o aumento da carga eleva ainda mais essa média, chegando até 4 saltos físicos por requisição. Isso demonstra a ineficiência no uso de espectro na rede, o que tende a piorar com o aumento da carga.

Taxa média de espectro disponível

A taxa de espectro disponível reflete o uso de recursos de espectro utilizado em toda a rede, quanto maior for essa taxa, maior é a quantidade de espectro disponível na rede. As Figuras 4.14 e 4.15 mostram a média da taxa de espectro disponível por requisição para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

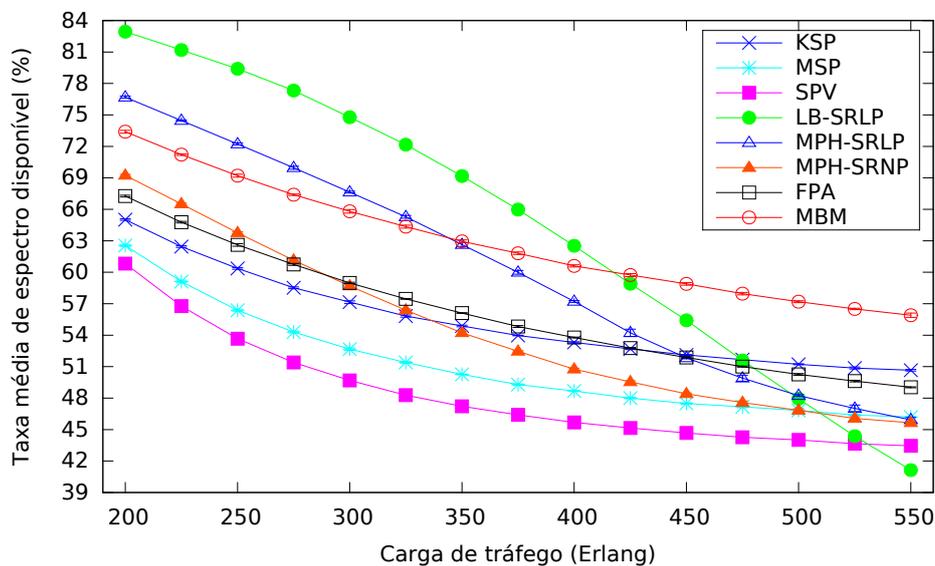


Figura 4.14: Taxa média de espectro disponível para topologia USANet.

Observa-se que os algoritmos MBM, LB-SRLP e MPH-SRLP têm os menores índices de uso do espectro, até 15% a menos. No entanto, os algoritmos LB-SRLP e MPH-SRLP apresentam uma queda muito acentuada com o aumento da carga, chegando a usar mais que a metade do total de espectro disponível na rede para as cargas mais altas. Essa mesma correspondência é apresentada na taxa de bloqueio de banda (BBR), onde a partir de certo ponto o BBR cresce exponencialmente para os algoritmos LB-SRLP e MPH-SRLP devido sua característica de reserva de espectro.

Por outro lado, o algoritmo MBM mantém sua linearidade e, no desempenho geral, obtém o melhor índice de uso do espectro, até 30% a menos que os demais algoritmos. Por aproveitar melhor o uso do espectro, o algoritmo MBM obtém uma melhor taxa de

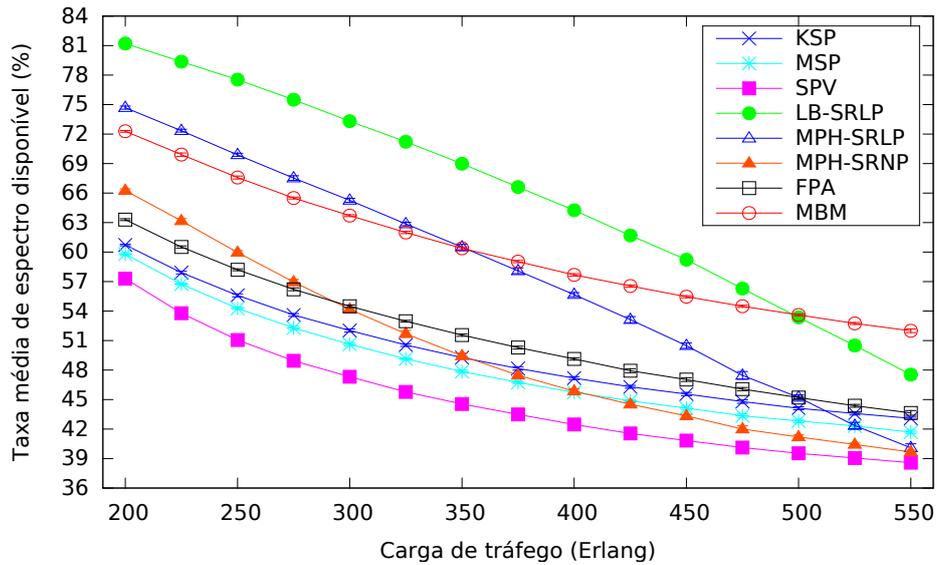


Figura 4.15: Taxa média de espectro disponível para topologia PanEuro.

bloqueio que os demais algoritmos, com exceção aos algoritmos que utilizam o esquema SRLP.

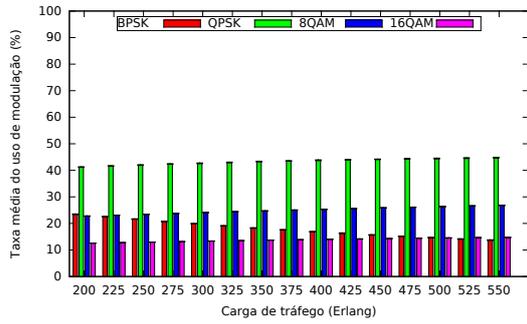
Um detalhe importante é que a mesma correspondência apresentada pela taxa de bloqueio de banda entre o algoritmo MBM e o FPA é refletida na taxa de uso do espectro, mostrando a importância dessa métrica no bloqueio de banda. O algoritmo que tem a menor taxa de espectro disponível é o SPV. Embora seu uso de espectro seja alto, seu desempenho no BBR é melhor que os algoritmos KSP e MSP, conforme acontece em [17].

Nota-se que os algoritmos que utilizam o esquema de reserva SRLP apresentam bons resultados na taxa do uso de espectro para cargas baixas, entretanto com o aumento da carga sua tendência é aumentar o uso do espectro e conseqüentemente elevar seu BBR, conforme visto anteriormente.

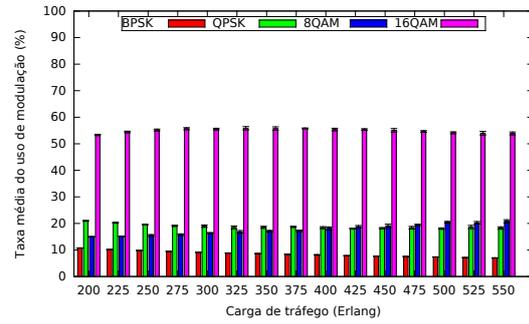
Taxa média do uso de modulação

A taxa média do uso de modulação mostra o percentual de caminhos ópticos alocados para cada nível de modulação. As Figuras 4.16 e 4.17 mostram a taxa média do uso de modulação para todos os algoritmos comparados em todas as cargas de trabalho nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

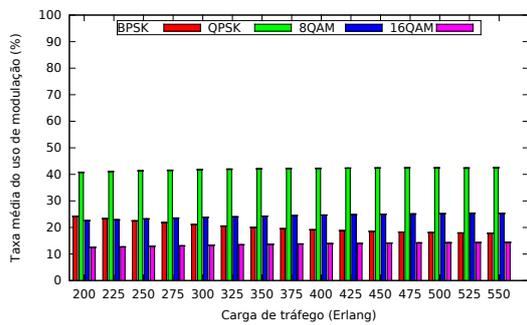
Os resultados mostram que o algoritmo MBM aproveita ao máximo o uso do maior nível de modulação fornecido pelos transmissores (16QAM), cumprindo o seu propósito. As Figuras 4.16(b) e 4.17(b) evidenciam esse uso. Com essa estratégia o algoritmo consegue um melhor desempenho no uso dos recursos de espectro proporcionando um bom



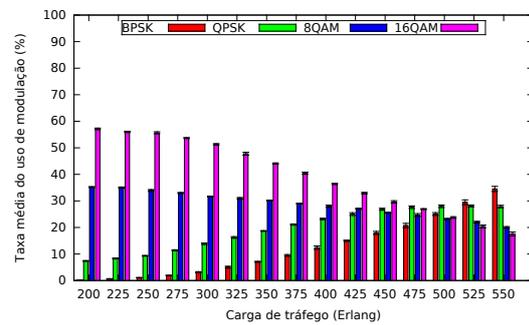
(a) Algoritmo FPA.



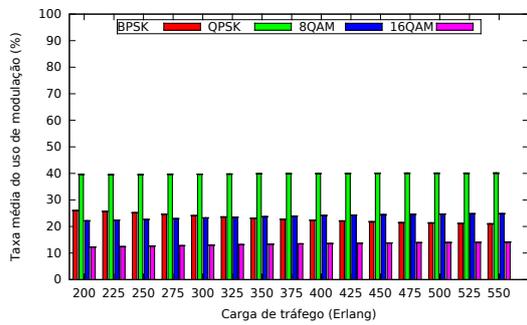
(b) Algoritmo MBM.



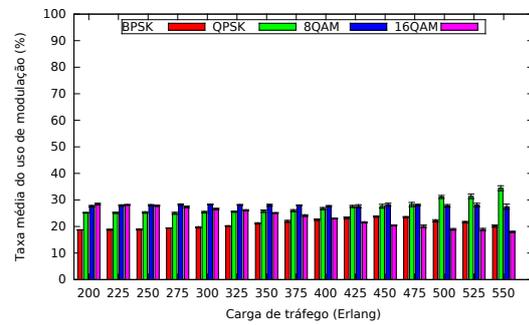
(c) Algoritmo KSP.



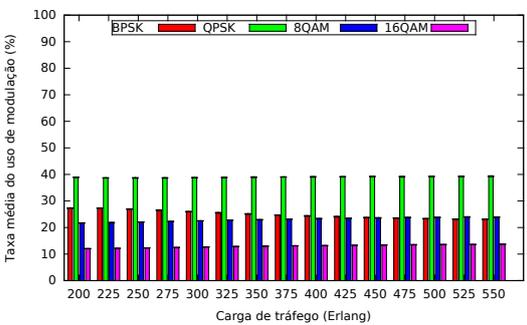
(d) Algoritmo LB-SRLP.



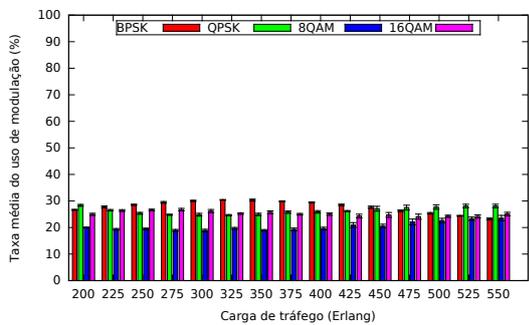
(e) Algoritmo MSP.



(f) Algoritmo MPH-SRLP.

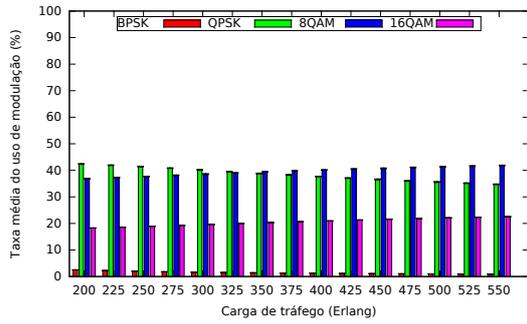


(g) Algoritmo SPV.

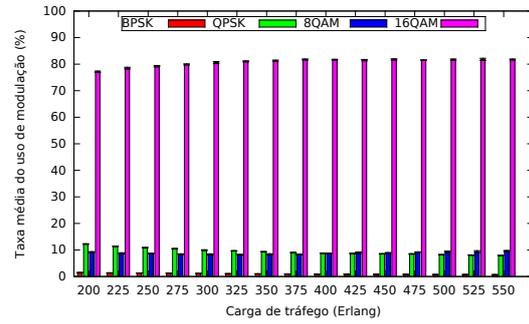


(h) Algoritmo MPH-SRNP.

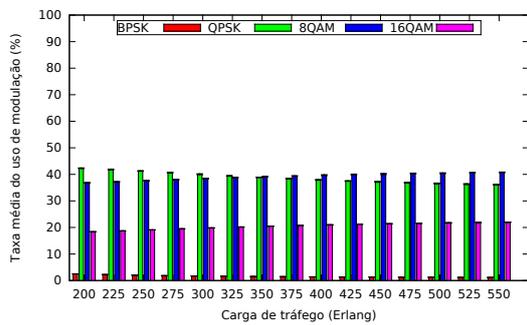
Figura 4.16: Taxa média do uso de modulação para topologia USANet.



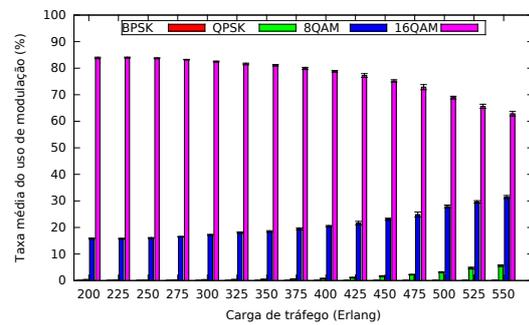
(a) Algoritmo FPA.



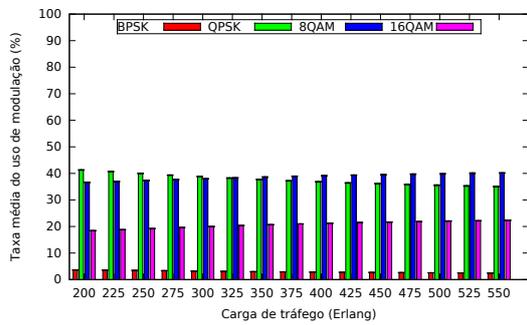
(b) Algoritmo MBM.



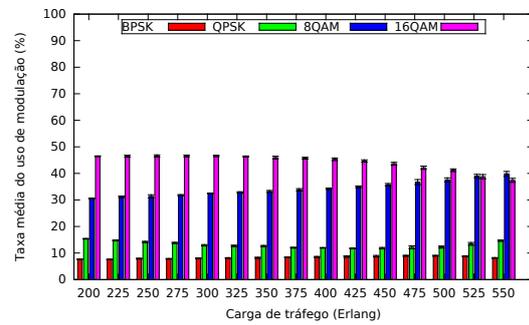
(c) Algoritmo KSP.



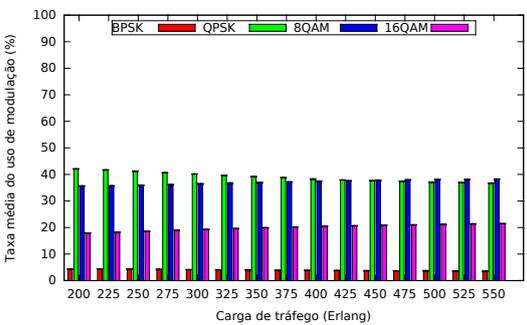
(d) Algoritmo LB-SRLP.



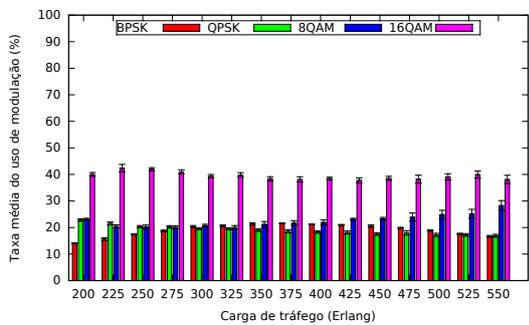
(e) Algoritmo MSP.



(f) Algoritmo MPH-SRLP.



(g) Algoritmo SPV.



(h) Algoritmo MPH-SRNP.

Figura 4.17: Taxa média do uso de modulação para topologia PanEuro.

desempenho na taxa de bloqueio de banda. A modulação 16QAM foi utilizada em 55% dos caminhos ópticos alocados na topologia USANet, e em 81% na topologia PanEuro.

O algoritmo MPH-SRNP obteve um percentual bastante distribuído na topologia USANet, entorno de 25% para todos os níveis de modulação. Na topologia PanEuro, o maior percentual concentrou-se na modulação 16QAM, chegando a 43%, uma vez que essa topologia possui uma distância média menor entre seus nós, favorecendo a criação de níveis de modulação mais altos. A distribuição dos níveis de modulação apresentada mostra que o algoritmo MPH-SRNP, associado ao esquema de modulação *mAdap*, não consegue utilizar os maiores níveis de modulação, o que reflete o seu baixo desempenho.

O algoritmo MPH-SRLP também apresentou uma distribuição semelhante ao MPH-SRNP, no entanto em ambas as topologias o percentual maior concentrou-se nas modulações de nível mais altos, até 50% para 16QAM e 40% para 8QAM. Isso evidencia o uso da técnica de reserva de espectro SRLP, que procura estabelecer poucos caminhos ópticos de alta capacidade.

Por outro lado o algoritmo LB-SRLP apresentou uma característica bastante comum ao MBM na topologia PanEuro, alcançando taxas de até 85% para a modulação 16QAM, evidenciando que o uso do melhor nível de modulação apresenta um bom desempenho nos ganhos de BBR. Entretanto para a topologia USANet o cenário foi bastante controverso. A medida que a carga de tráfego cresce o LB-SRLP começa a fazer uma inversão dos usos dos níveis de modulação. Isso ocorre pois o algoritmo começa a procurar rotas maiores para seus caminhos ópticos, que por sua vez, implica em usar níveis de modulação inferiores. Isto também evidencia o crescimento exponencial do BBR com o crescimento da carga mostrado anteriormente.

Os demais algoritmos mantêm o mesmo padrão de uso do nível de modulação em suas respectivas topologias, uma vez que os mesmos não implementam o roteamento *multi-hop* e são baseado em k -menores distâncias. O maior percentual de uso de modulação encontra-se na modulação QPSK e 8QAM nas topologias USANet e PanEuro, cerca de 40%, respectivamente, uma vez que, em média, modulações superiores não atendem as distâncias dos caminhos ópticos maiores.

4.3.3 Cenários Irrestritos

Nesta seção compara-se os algoritmos em dois cenários irrestritos de provisionamento de recursos. No primeiro não há restrição no número de transmissores disponíveis, os algoritmos podem estabelecer quantos caminhos ópticos quiserem, estabelecendo quantos saltos forem necessários na topologia virtual. No segundo não há limitação de espectro, os enlaces sempre vão ter capacidade de espectro para atender qualquer caminho óptico sem se preocupar com a fragmentação de espectro, por exemplo.

O objetivo de avaliar as propostas, nestes cenários utópicos, visa mostrar a relevância do impacto proporcionado do número de transmissores e da disponibilidade de espectro na rede.

Cenário com Transmissores Suficientes

A Figura 4.18 mostra o desempenho de BBR para as topologias USANet e PanEuro, respectivamente, quando não há limites no número de transmissores.

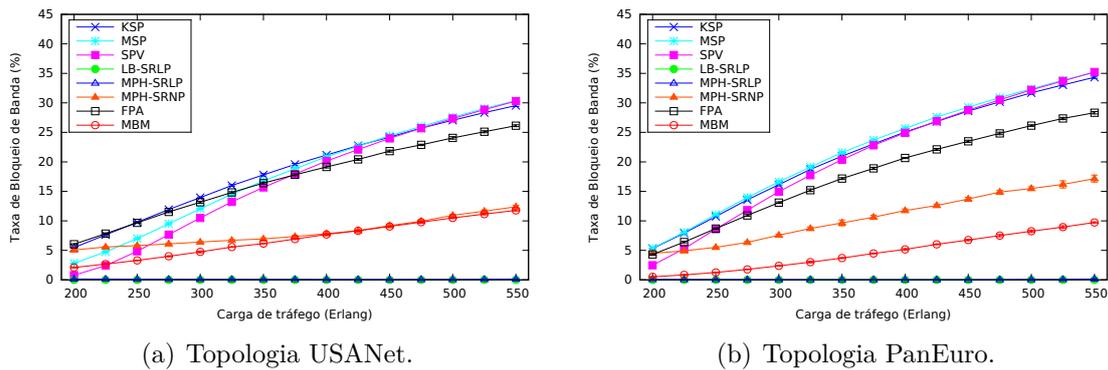


Figura 4.18: Taxa de bloqueio de banda (Transmissores Suficientes). Topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

Observa-se que os algoritmos que utilizam a estratégia *multihop* tornam-se ainda melhores em relação aos demais algoritmos, pois com transmissores ilimitados os algoritmos que utilizam a estratégia de roteamento *multihop* tem total liberdade para realizar quantos saltos forem necessários na topologia virtual, o que provoca um ganho de BBR, reforçando os resultados anteriores.

Observa-se também que à medida que a carga de tráfego cresce, a disparidade torna-se ainda mais evidente. Os algoritmos MPH-SRLP e LB-SRLP praticamente não apresentam bloqueio de banda na simulação. Isso acontece, pois a característica do esquema de reserva SRLP faz uso excessivo da técnica de *multihop*, mostrando que o número de transmissores na rede é característica primordial para algoritmos que utilizam esse esquema.

Os algoritmos MBM e MPH-SRNP apresentaram resultados semelhantes para a topologia USANet, atingindo um bloqueio máximo de 12%. Já na topologia PanEuro o MBM mostrou-se superior ao MPH-SRNP, cerca de 8% a menos de bloqueio. Isso acontece, pois com o aumento da carga o algoritmo MBM começa a procurar rotas que utilizam mais saltos na topologia física. Como a característica do MPH é justamente evitar essa abordagem, ele acaba apresentando um resultado inferior para a topologia PanEuro, que possui uma distância média menor entre seus nós comparado a USANet.

Cenário sem Limitação de Espectro

A Figura 4.19 mostra o desempenho de BBR para as topologias USANet e PanEuro, respectivamente, quando o espectro é ilimitado.

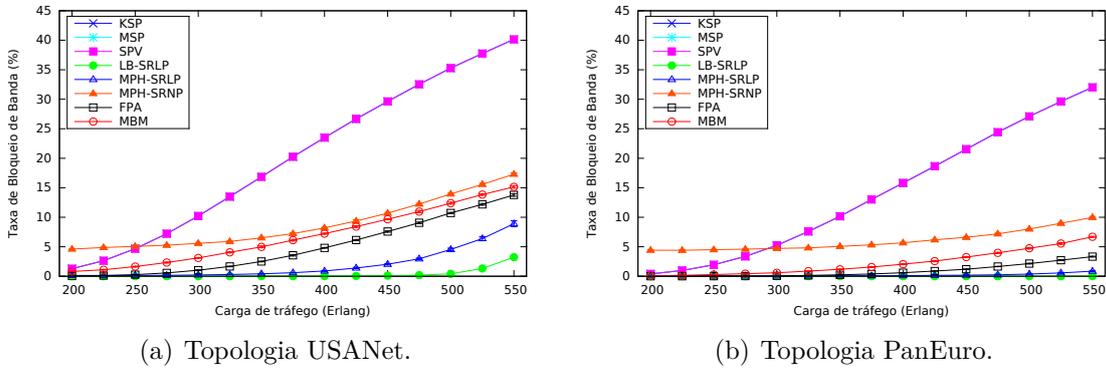


Figura 4.19: Taxa de bloqueio de banda (Sem Limitação de Espectro). Topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

Observa-se que há uma melhora significativa, em média 10% a menos, no BBR para todos os algoritmos avaliados quando não há limitação no espectro da rede, mostrando que o espectro é um fator primordial no impacto do BBR.

O algoritmo FPA apresentou resultados melhores que os algoritmos MPH-SRNP e MBM nesta situação, entretanto, isso já era esperado, dado que seu impacto sobre a taxa de transmissores disponíveis é ligeiramente menor que os algoritmos MPH-SRNP e MBM. Nesse contexto, o fator impactante neste cenário torna-se o número de transmissores, o que provoca um pior desempenho de BBR dos algoritmos MPH-SRNP e MBM em relação ao FPA.

Como neste cenário não há limitação de espectro, o algoritmo FPA pode atender as demandas com níveis de modulação menores, usando mais recursos de espectro. Assim, a economia de espectro proporcionada pelo algoritmo MBM, ao usar níveis de modulação maiores, não é relevante neste cenário hipotético.

Entretanto, o desempenho do MBM é de apenas 2,5% em média pior que o FPA e à medida que a carga cresce a diferença diminui, isso demonstra que o uso de recursos de espectro de forma eficiente é o principal fator para o impacto na taxa de bloqueio na rede EON.

Os resultados obtidos para os algoritmos MPH-SRLP e LB-SRLP continuam semelhantes ao cenário normal. A mesma subida exponencial é apresentada na topologia USANet. Isso demonstra o quanto esses algoritmos são dependentes da quantidade de transmissores na rede, não levando em consideração o espectro disponível.

4.4 Resumo Conclusivo

Neste Capítulo, o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA) no cenário de tráfego dinâmico foi estudado. Foi proposto um algoritmo para solucionar o problema através do uso de técnicas de agregação de dados e espectro associadas ao controle da modulação espectral. O objetivo de associar essas técnicas foi aproveitar melhor os recursos de espectro da rede óptica, atendendo maiores taxas de dados.

Para este fim, foi proposto o algoritmo MBM (*Maximize the use of Best Modulation format*) que busca tirar proveito do esquema de modulação adaptativa (*mAdap*), proposto em [17], utilizando-o de forma oportunista para resolver o problema RMLSA.

O algoritmo MBM procura realizar agregação de tráfego usando os níveis de modulação mais altos através de múltiplos saltos na topologia virtual. Dessa forma, para que uma transmissão óptica entre dois nós distantes seja realizada, com o uso de um nível de modulação alto, é necessário que essa transmissão óptica seja composta por vários caminhos ópticos mais curtos, que possam atender os requisitos de QoT dos níveis de modulações mais elevados. Assim, é possível utilizar melhor os recursos de espectro ao custo de um pequeno aumento na utilização de transmissores na rede.

Para demonstrar este fato, foram comparados sete algoritmos da literatura com o algoritmo MBM em duas topologias de rede. Os resultados mostraram que o algoritmo MBM obteve resultados até 81% melhores no bloqueio de banda (BBR) frente a alguns algoritmos da literatura. Embora o uso de transmissores tenha crescido cerca de 2% frente aos algoritmos comparados, observa-se que o MBM utiliza de maneira mais eficiente os transmissores através do roteamento *multihop*, viabilizando novos pontos de entrada na rede para a agregação de dados e espectro, o que leva a um melhor uso de espectro na rede.

Uma característica importante obtida no estudo deste Capítulo, é que o número de saltos virtuais impacta diretamente no uso da modulação e conseqüentemente na taxa de bloqueio de banda do algoritmo. Algoritmos baseados em esquemas de reserva de espectro na rede mostram-se bastante promissores quando a carga de tráfego é baixa e o número de transmissores é suficiente. No entanto, em cenários com cargas de tráfego mais altas, ou número de transmissores limitados, os esquemas de reserva prejudicam a solução do algoritmo, pois elevam o número de saltos virtuais na rede.

Observa-se portanto, a necessidade de um esquema que promova o controle do número de saltos virtuais adequado associado à escolha do nível de modulação apropriado para o atendimento de requisições de tráfego EON.

Capítulo 5

Esquema de Modulação Adaptativa com Múltiplos Saltos

O Capítulo 4 abordou o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa no cenário de tráfego dinâmico através de algoritmos RSA sob o esquema de modulação adaptativa *mAdap*, proposto em [17]. O estudo demonstrou que a maximização do uso do melhor nível de modulação proposto pelo esquema de modulação adaptativa *mAdap* é eficaz para resolver o problema RMLSA no cenário de tráfego dinâmico.

O estudo apresentado no Capítulo 4 ainda demonstra que a utilização da estratégia *multihop* traz benefícios significativos para o desempenho dos algoritmos RSA sob o esquema de modulação adaptativa *mAdap*. Foi observado que o número de saltos virtuais tem um impacto direto no uso da modulação e conseqüentemente na taxa de bloqueio de banda sofrida pelo algoritmo RSA. A escolha adequada do formato de modulação para o atendimento das demandas de tráfego tem conseqüência direta no desempenho das abordagens RSA, demonstrando que os estudos do Capítulo 4 reforçam os resultados de [98], neste caso, para o cenário de tráfego dinâmico.

Nesse contexto, observando os resultados da proposta do Capítulo 4, este Capítulo propõe criar um esquema de modulação adaptativa, inspirado no *mAdap*, para resolver o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA) para qualquer abordagem RSA.

Observando as deficiências do esquema de modulação adaptativa *mAdap* e a eficiência da estratégia *multihop*, o esquema de modulação adaptativa 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. O esquema de modulação adaptativa proposto ainda permite a suavização das restrições de continuidade de espectro do problema RSA e as restrições de distância de transmissão do problema RMLSA.

Este Capítulo está organizado como segue. A Seção 5.1 descreve o funcionamento do esquema de modulação adaptativa proposto. A Seção 5.2 apresenta a complexidade de execução do esquema proposto em função do algoritmo RSA. A Seção 5.4 apresenta resultados de simulação para duas topologias de rede. Por fim, a Seção 5.5 apresenta o resumo conclusivo da abordagem proposta.

5.1 Esquema de modulação adaptativa AMMS

O esquema de modulação adaptativa proposto é denominado *AMMS* (*Adaptive Modulation Multihop Schema*). O esquema *AMMS* propõe dividir o problema RMLSA em dois subproblemas: 1) atribuição do formato de modulação; e 2) execução de um algoritmo RSA/RMLSA.

O *AMMS* procura atribuir níveis de modulação adequados, associado a uma quantidade de saltos necessários para atender uma requisição de tráfego. Para isso, o esquema *AMMS* é constituído por uma série de tarefas *offline* que caracterizam a rede atribuindo a ela zonas de alcançabilidade em saltos por modulação. Estas zonas são formadas através dos alcances preestabelecidos de cada nível de modulação para que eles ofereçam um QoT aceitável na rede. A Figura 5.1 mostra um exemplo de zonas de alcançabilidade para os níveis de modulação 8QAM e QPSK na topologia USANet.

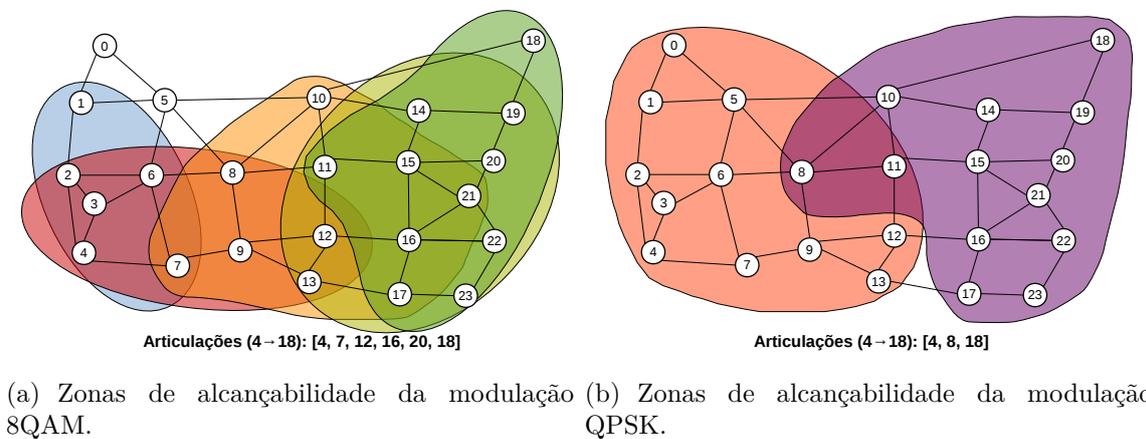


Figura 5.1: Exemplos de zonas de alcançabilidade para a Topologia USANet.

O exemplo da Figura 5.1 mostra as zonas que compõem a rota para dois nós extremos da topologia USANet. Para formar uma rota do nó 4 ao 18 são estabelecidas 5 zonas para o nível de modulação 8QAM e apenas 2 zonas para o nível de modulação QPSK. O número de zonas correspondem ao número mínimo de saltos virtuais que a solução terá e o alcance da zona delimitará os caminhos que o algoritmo RSA poderá utilizar.

A ideia geral do esquema *AMMS* é dividir a rota da requisição de tráfego em várias partes procurando sempre atender os níveis de modulação mais adequados a essa requisição. Cada parte será constituída por um caminho óptico e neste será atribuído um formato de modulação de acordo com sua distância de transmissão. A rota da requisição de tráfego é formada a partir dos k -menores caminhos da topologia de rede. A divisão desta rota é feita a partir dos alcances dos níveis de modulação disponíveis na rede. Estes alcances formam as zonas de alcançabilidade de cada modulação, em que níveis de modulação maiores têm zonas de alcance menor e vice-versa.

Dessa forma, a partir de uma requisição de tráfego, o esquema *AMMS* estabelece pontos de articulação na rede para que os algoritmos RSA proponham soluções que atravessem esses pontos, a partir de qualquer caminho dentro da zona de alcançabilidade correspondente a modulação sugerida pelo esquema. Assim, cada travessia entre esses pontos caracterizará um salto na topologia virtual.

Para isso, o esquema inclui uma estrutura de dados P , que contém as distâncias dos k -menores caminhos entre todos os nós de origem e destino da rede. Dado um $P \rightarrow \{s, d, k\}$, onde “ s ” é a origem, “ d ” é o destino e “ k ” é a k -rota considerada, P retornará a k -menor rota de “ s ” para “ d ”. Essa estrutura é construída em uma fase *offline* a partir do algoritmo YenKSP [85].

Para atribuir os pontos de articulação na rota o esquema inclui uma rotina chamada $path(R, P(k), m)$, que retorna os pontos de articulação da requisição $R \rightarrow \{s, d, b\}$, onde “ s ” é a origem, “ d ” é o destino e “ b ” é a quantidade de banda requisitada para a k -menor rota, utilizada na estrutura P , para a zona de alcançabilidade do nível de modulação m . A rotina $path(R, P(k), m)$ é descrita no **Algoritmo 2**.

Algoritmo 2 $path(R, P(k), m)$

- 1: $s \leftarrow$ origem de R ;
 - 2: $d \leftarrow$ destino de R ;
 - 3: $caminho \leftarrow P(s, d, k)$;
 - 4: $z \leftarrow \lceil \text{Tamanho}(caminho) / \text{Alcance}(m) \rceil$;
 - 5: **para** $i \leftarrow 1$ **até** z **faça**
 - 6: $subcaminho(i) \leftarrow$ $Parte(caminho, i)$ tal que
 $Parte(caminho, i)$ atende $Alcance(m)$;
 - 7: **fim para**
 - 8: **retorna** $subcaminho$;
-

A origem “ s ” e o destino “ d ” são obtidos da requisição R . O “ $caminho$ ” é obtido a partir da estrutura P com base no “ k ” recebido externamente e “ z ” recebe o teto do tamanho do “ $caminho$ ” dividido pelo alcance do nível de modulação “ m ”. Dessa forma, “ z ” corresponde ao número de sub-caminhos, ou zonas de alcançabilidade dessa requisição neste k -caminho neste nível de modulação. O laço das linhas 5-7 formam as

zonas de alcançabilidade e os nós pertencentes aos pontos de articulação do esquema. Ao final a rotina retorna os sub-caminhos que correspondem a parte do “*caminho*”, tal que cada sub-caminho possa ser atendido pelo nível de modulação “*m*”. Esses sub-caminhos correspondem aos pontos de articulação do esquema *AMMS*.

Tendo em vista que o esquema *AMMS* pode ser posto sobre qualquer abordagem RSA, algoritmos RSA que utilizam técnicas de roteamento *singlehop* serão transformados em soluções RMLSA *multihop*. Como o esquema *AMMS* não controla como a abordagem RSA irá resolver a atribuição de espectro na rede, pode acontecer que os algoritmos RSA também realizem saltos na topologia virtual entre os pontos de articulação, aumentando ainda mais o número de saltos na topologia virtual.

Para amenizar este problema é necessário limitar o número de zonas de alcançabilidade propostas pelo *AMMS*, dessa maneira, um determinado número máximo de pontos de articulação deve ser atendido. O número de pontos de articulação traz impactos diretos na escolha do nível de modulação com o qual será atendida a requisição. Um número elevado de pontos de articulação provocará muitos saltos virtuais, o que poderá prejudicar a solução. Por exemplo, a Figura 5.1(a) mostrou que para atender uma requisição com origem no nó 4 e destino ao nó 18, com o nível de modulação 8QAM, é necessário ultrapassar 5 zonas de alcançabilidade, isso resulta no estabelecimento de pelo menos 5 caminhos ópticos para atender esta requisição. Por outro lado, ao utilizar um nível de modulação inferior, como o QPSK (Figura 5.1(b)) por exemplo, é necessário ultrapassar apenas 2 zonas, resultando no estabelecimento de apenas 2 caminhos ópticos.

Para isso, uma análise do número adequado de saltos foi desenvolvida a partir das características de cada topologia de rede. Um bom índice para analisar esse número é o diâmetro da rede que representa o caminho mais longo dentre todos os caminhos mais curtos calculados em uma rede. Assim, dado um diâmetro pode-se ter uma ideia de quantos caminhos ópticos seriam necessários para atender qualquer requisição usando o melhor nível de modulação possível, por exemplo. Para esse fim, foi proposto a Equação 5.1, apresentada a seguir:

$$Z = \left\lceil \frac{d \times f}{Alcance(maxM)} \right\rceil \quad (5.1)$$

onde “*d*” é o diâmetro da topologia de rede, “*Alcance(maxM)*” representa o alcance máximo do maior nível de modulação disponível na rede e “*f*” é um fator de multiplicação do diâmetro. Portanto, “*Z*” é o número total de zonas de alcançabilidade que o esquema *AMMS* deve propor para a abordagem RSA. Caso a rotina *path*, descrita no Algoritmo 2, proponha um número de sub-caminhos maiores que “*Z*”, então o esquema deve ignorar

esse conjunto de sub-caminhos por ser grande demais e provocar um número elevado de saltos na topologia virtual.

Nota-se que o fator de multiplicação do diâmetro “ f ” é um atributo importante do esquema de modulação. Ele irá determinar a quantidade de saltos virtuais adequados que irão compor a solução RMLSA. Este atributo será analisado adiante na Seção 5.3.

O esquema de modulação adaptativa *AMMS* pode ser visto no diagrama de blocos da Figura 5.2.

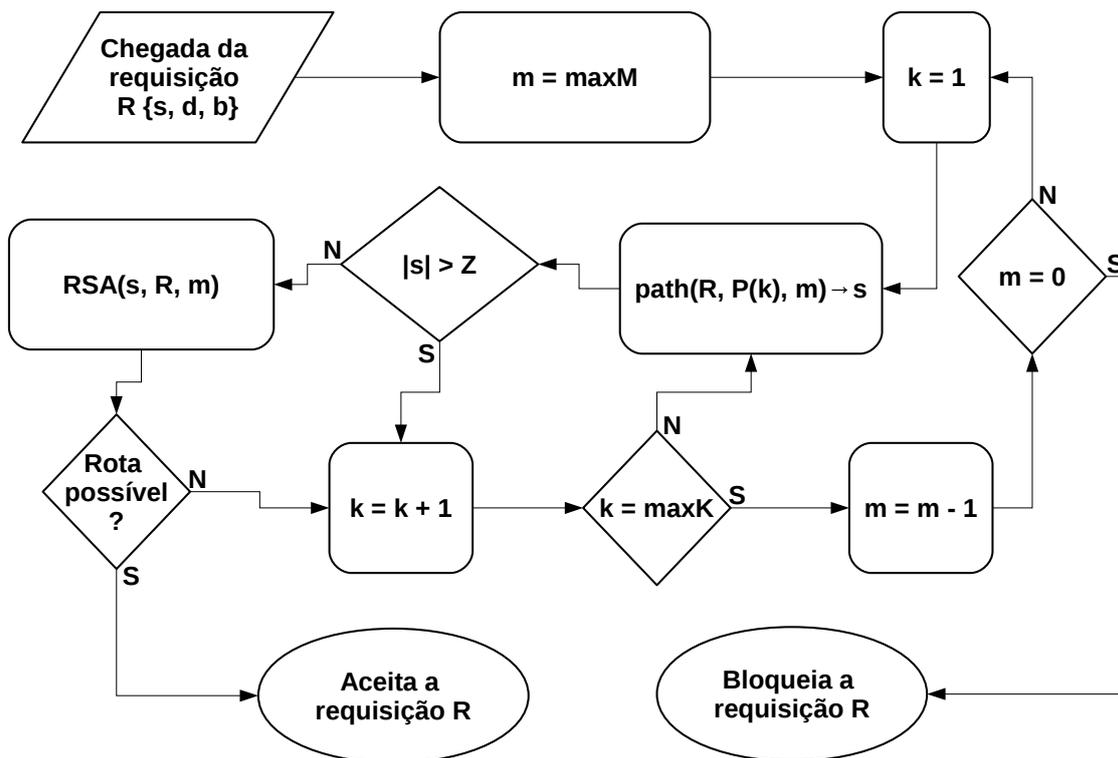


Figura 5.2: Esquema de modulação adaptativa AMMS.

A cada requisição $R \rightarrow \{s, d, b\}$ com origem “ s ”, destino “ d ” e taxa “ b ”, o algoritmo escolhe o maior nível de modulação disponível na rede, $m = maxM$, em seguida, seta $k = 1$ e executa a rotina *path*, baseando-se no k -menor caminho e na modulação “ m ”, para atribuir os sub-caminhos “ s ” dada a requisição. Em seguida, o algoritmo verifica se a quantidade de sub-caminhos “ s ” é maior que “ Z ”. Caso este tamanho não seja maior, então “ s ” é enviado para o algoritmo *RSA* para que ele possa resolver o problema de roteamento e atribuição de espectro para todos os sub-caminhos em “ s ”, com a modulação “ m ”. Caso o algoritmo *RSA* consiga atribuir espectro para todos os sub-caminhos “ s ” então R é aceita na rede. Caso ele não consiga atribuir espectro para todos em “ s ” ou a

quantidade de caminhos da disposição “ s ” é maior que Z , então ele incrementa o valor de “ k ”. Em seguida, verifica se $k = \max K$, caso não seja, executa-se a rotina *path* com um novo k —menor caminho. Caso contrário, decrementa-se a modulação. Posteriormente, verifica-se se $m = 0$, caso seja, bloqueia-se R , caso contrário, seta $k = 1$ e volta a executar o algoritmo com um nível de modulação menor.

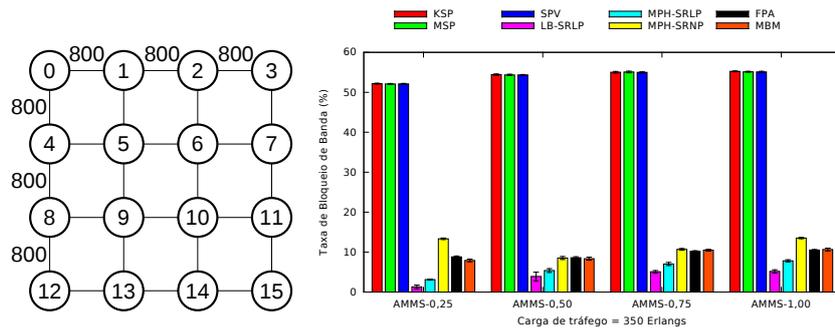
A estrutura P associada a rotina *path* caracteriza a rede em zonas de alcançabilidade por modulação. O caminho sob essas zonas determinam o número de saltos virtuais que o esquema propõem. O fator Z estabelece o número máximo de saltos, para que a solução não proponha rotas com um número elevado de saltos virtuais. A partir dessas características a modulação adequada é escolhida dada a requisição. Dessa forma, o *AMMS* realiza o roteamento da requisição através de múltiplos saltos na topologia virtual suavizando as restrições de continuidade de espectro e distância de transmissão, viabilizando o uso de níveis de modulação mais elevados, ao mesmo tempo que permite um melhor aproveitamento dos recursos de espectro da rede.

5.2 Complexidade do esquema AMMS

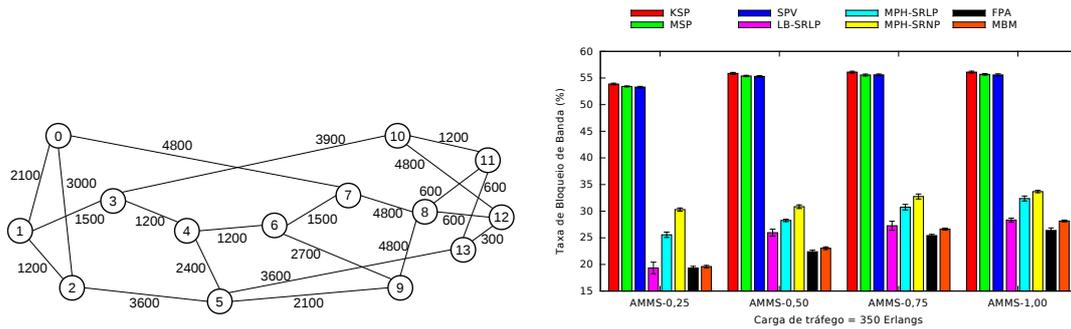
A complexidade de tempo do esquema *AMMS* é analisada como segue. A complexidade da rotina *path* é determinada pela quantidade de sub-caminhos que um caminho pode ter. Como o número máximo de sub-caminhos que uma rede pode ter é igual ao número de nós da rede, então a complexidade da rotina *path* é $O(n)$. A quantidade máxima de vezes que a rotina *path* pode ser executada é $\max K * \max M$ vezes. A cada execução de *path* tem-se até n execuções de *RSA*. Portanto a complexidade de tempo do esquema *AMMS* é $O(n * \max K * \max M)$, multiplicado pela complexidade do algoritmo *RSA* utilizado. É importante ressaltar que $\max K$ e $\max M$ são constantes para uma determinada configuração de rede, e que, na prática, assumem valores pequenos.

5.3 Análise da quantidade de zonas para o esquema AMMS

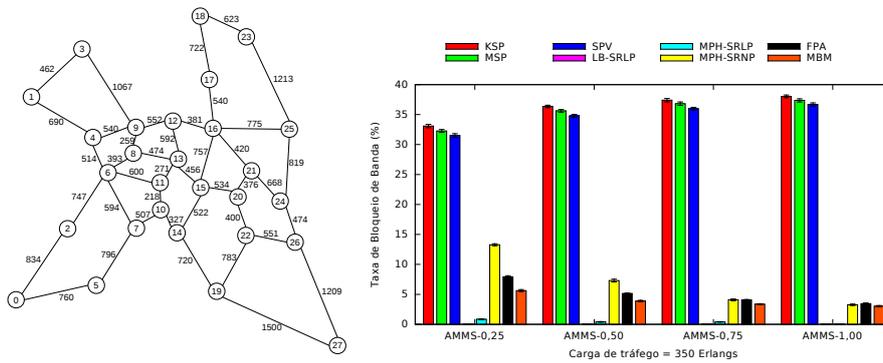
Para avaliar empiricamente o fator de multiplicação “ f ” adequado para ser utilizado na Equação 5.1, foram realizados testes de simulação do esquema de modulação *AMMS* para quatro “fatores de multiplicação de diâmetro”: (i) 0,25; (ii) 0,5; (iii) 0,75; e (iv) 1,0. Estes testes foram realizados utilizando o mesmo cenário de simulação do Capítulo 4, na Seção 4.3.1.



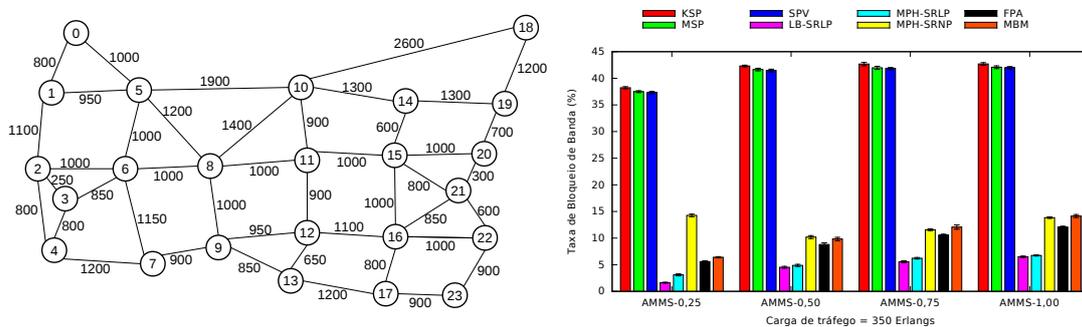
(a) Resultados para topologia 4×4 malha.



(b) Resultados para a topologia NSFNet.



(c) Resultados para a topologia PanEuro.



(d) Resultados para a topologia USANet.

Figura 5.3: Resultados de simulação do esquema *AMMS* para a carga de 350 Erlangs para quatro fatores de multiplicação de diâmetro.

Cada simulação foi realizada cinco vezes com replicações independentes. Os resultados apresentam intervalos de confiança com 95%. Em cada simulação foram geradas 10^5 requisições de conexão distribuídas uniformemente entre 15 níveis de granularidade variando de 12,5 Gb/s até 100 Gb/s com passos de 6,25 Gb/s. O processo de chegada das chamadas segue a distribuição de *Poisson* com origem e destino distribuídos uniformemente para todos os pares de comunicação da rede.

As topologias consideradas nas simulações foram a topologia em malha 4×4 com 16 nós, a topologia NSFNet com 14 nós, a topologia USANet com 24 nós e a topologia PanEuro com 27. As modulações consideradas foram BPSK, QPSK, 8QAM e 16QAM com distâncias máximas de 8000, 4000, 2000 e 1000 Km, respectivamente.

Foram comparados os 8 algoritmos, simulados na Seção 4.3.1 sob o esquema *AMMS*, para cada um dos quatro fatores de multiplicação de diâmetro. A Figura 5.3 apresenta os resultados de simulação do esquema *AMMS* para a carga de 350 Erlangs para quatro fatores de multiplicação de diâmetro em quatro topologias de rede, as distâncias apresentadas nas topologias estão em quilômetros.

Pode-se observar que para as topologias 4×4 malha, NSFNet e USANet o fator de multiplicação de diâmetro utilizado para o esquema *AMMS* que obteve os melhores resultados foi o fator “0,25”. Apenas um algoritmo, o MPH-SRNP, apresentou piores resultados para o fator “0,25”. Isto se deve ao fato que o algoritmo MPH-SRNP prioriza realizar poucos saltos físicos em sua abordagem e conseqüentemente provoca um menor número de saltos virtuais. Assim, a abordagem utilizada para o fator “0,25” provoca o algoritmo a usar níveis de modulação menores na rede. Por outro lado, para o algoritmo MPH-SRLP, embora sua característica de minimizar o número de saltos físicos continue valendo, o esquema SRLP provoca o algoritmo a realizar mais agregação de tráfego, pois o esquema SRLP reserva muito mais caminhos ópticos que o esquema SRNP, por definição. Assim, o algoritmo continua usando os maiores níveis de modulação da rede.

Para a topologia PanEuro, a situação se inverte. O fator de multiplicação de diâmetro que obteve os melhores resultados foi o fator “1,0”. Isso acontece, pois uma das características importantes da topologia PanEuro é o fato dela possuir vários ciclos em sua topologia, o que impacta de forma negativa o grau de conectividade dessa rede e, conseqüentemente, restringe a possibilidade de se encontrar caminhos alternativos. Assim, como a utilização do fator “1,0” implica em usar os maiores níveis de modulação na rede, que por conseqüência implica em uma melhor utilização do espectro, o limite de espectro torna-se o fator impactante nesta comparação.

Portanto, conclui-se que o fator de multiplicação de diâmetro que melhor se enquadra para o esquema de modulação adaptativa *AMMS* é o fator “0,25” para as topologias 4×4 malha, NSFNet e USANet, e o fator “1,00” para a topologia PanEuro.

Um detalhe importante que este estudo prévio demonstrou, é que o esquema de modulação *AMMS* não é efetivo para algoritmos que não utilizam técnicas de agregação de tráfego, tendo em vista os resultados do Capítulo 4. Isso acontece, pois o esquema *AMMS* obriga esses algoritmos a realizarem saltos na topologia virtual e, conseqüentemente, utilizarem mais transmissores na rede. Como esses transmissores não são reaproveitados por nenhuma técnica de agregação de tráfego, então essa característica torna-se um fator dispendioso para a abordagem geral. Entretanto, o esquema provoca que esses algoritmos utilizem níveis de modulação maiores, isso traz uma maior economia de espectro na rede. Portanto, se o número de transmissores não for limitado, o esquema *AMMS* também trará benefícios para essa classe de algoritmos. Essas e outras características serão investigadas na próxima Seção.

5.4 Resultados de Simulação

Nesta Seção, avalia-se o desempenho do esquema de modulação adaptativa *AMMS* em comparação com o esquema de modulação adaptativa *mAdap*, proposto em [17]. Sob ambos os esquemas, são postos 7 algoritmos da literatura e o algoritmo MBM proposto no Capítulo 4. A simulação é realizada em diferentes topologias de rede para diferentes cenários de carga.

5.4.1 Ambiente de Simulação

Cada simulação foi realizada cinco vezes com intervalos de confiança com 95%. Em cada simulação foram geradas 10^5 requisições de tráfego distribuídas uniformemente entre 15 níveis de granularidade variando de 12,5 Gb/s até 100 Gb/s com passos de 6,25 Gb/s. O processo de chegada das chamadas seguiu a distribuição de *Poisson* 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 (Figura 5.4), e a topologia PanEuro com 27 nós e 81 enlaces bidirecionais (Figura 5.5). Em ambas as Figuras, 5.4 e 5.5, as distâncias apresentadas estão em quilômetros.

O tamanho da largura de banda de cada *slot* considerado foi 12,5 GHz com cada enlace com capacidade de 120 *slots* (1,5 THz). Assumiu-se uma banda de guarda de 2 *slots* (25 GHz). Cada nó na topologia possui 15 transmissores e cada transmissor tem a capacidade máxima de transmitir até 8 *slots*. Novamente as modulações consideradas foram a BPSK, a QPSK, a 8QAM e a 16QAM com 1, 2, 3 e 4 bits por símbolo, respectivamente. Os alcances considerados de cada modulação foram 8000, 4000, 2000 e 1000 Km para as modulações BPSK, QPSK, 8QAM e 16QAM, respectivamente.

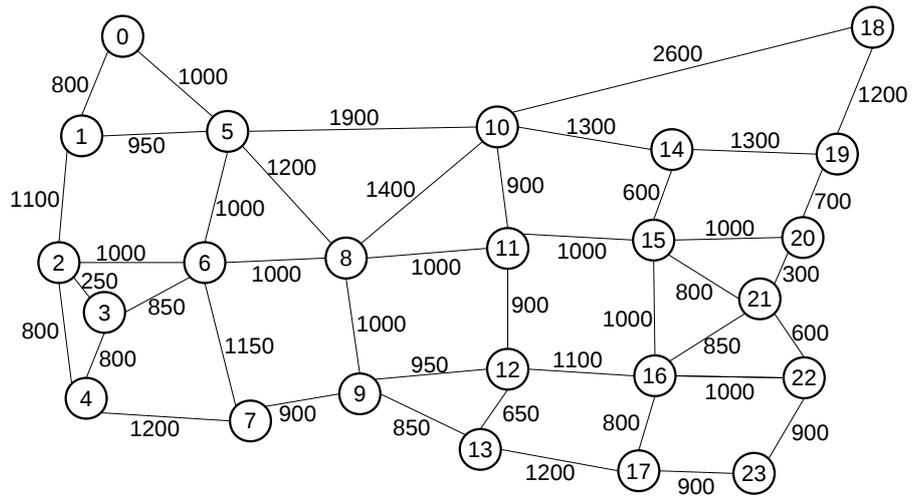


Figura 5.4: Topologia USANet.

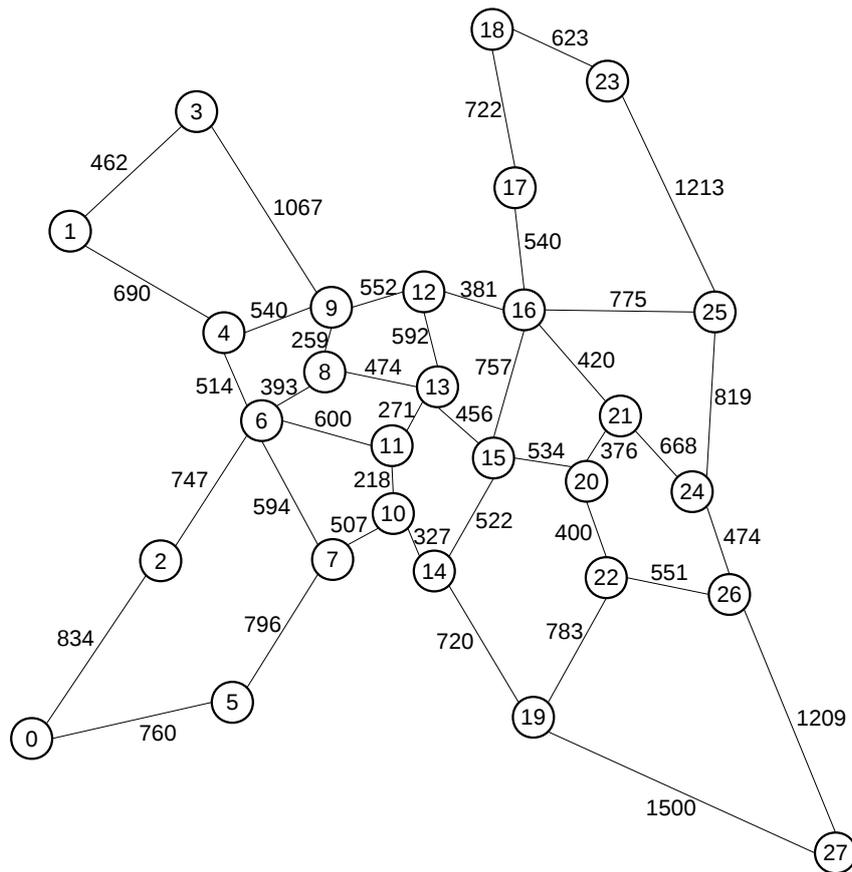


Figura 5.5: Topologia PanEuro.

Foram comparados os 8 algoritmos, também simulados na Seção 4.3.1. Os algoritmos KSP, MSP e SPV de [44, 17]. O algoritmo LB-SRLP de [15]. Os algoritmos MPH-SRLP e MPH-SRNP de [63]. O algoritmo FPA de [100] e o algoritmo MBM proposto no Capítulo 4.

Foi considerado no uso dos algoritmos KSP, MPH-SRLP e MPH-SRNP o parâmetro $k = 3$ e a política de FF (*First Fit*) para resolver o problema RSA. Para os algoritmos MPH-SRLP e MPH-SRNP, especificamente, foram considerados o uso de 8 sub-transmissores por transmissor com capacidades de 4 subportadoras de acordo com as definições de [63].

Todos os algoritmos foram colocados sob os esquemas de modulação adaptativa *mAdap* (Figura 3.1) e o *AMMS* (Figura 5.2). No esquema *AMMS* foi considerado o fator de multiplicação do diâmetro da rede como 0,25 para a topologia USANet e 1,00 para a topologia PanEuro de acordo com o estudo da Seção 5.3.

As seguintes métricas são avaliadas para todos os algoritmos em ambos os esquemas de modulação adaptativa: (i) Taxa de bloqueio de banda (BBR); (ii) taxa média de transmissores disponíveis; (iii) média de transmissores por requisição; (iv) média de saltos na topologia virtual por requisição; (v) média de saltos na topologia física por requisição; (vi) média da taxa de espectro disponível; e (vii) taxa média do uso de modulação. As métricas que se referem à utilização de recursos são avaliadas para demonstrar os ganhos relativos aos mecanismos implementados. Além disso, soluções de engenharia de tráfego que levam à redução na utilização dos recursos instalados na rede, auxiliam na diminuição de sua probabilidade de exaustão.

5.4.2 Exemplos Numéricos

Taxa de bloqueio de banda (BBR)

O BBR mostra a taxa do bloqueio de banda na rede, quanto maior for o BBR, maior será a banda bloqueada na rede e pior o desempenho do algoritmo. As Figuras 5.6 e 5.7 mostram o BBR dos algoritmos considerados para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

Observa-se que na topologia USANet o desempenho dos algoritmos MBM e FPA sob o esquema de modulação adaptativa *AMMS* obtiveram uma melhora significativa em relação ao esquema de modulação *mAdap*, cerca de até 50% para o MBM e 70% para o FPA. Na topologia PanEuro, os resultados mostraram-se ainda melhores, o algoritmo FPA sob o esquema de modulação adaptativa *AMMS* obteve uma melhora de até 85% em relação ao esquema de modulação *mAdap*. Para o algoritmo MBM a melhora aconteceu somente para as cargas de tráfego mais baixas, cerca de 52%. Para as cargas maiores

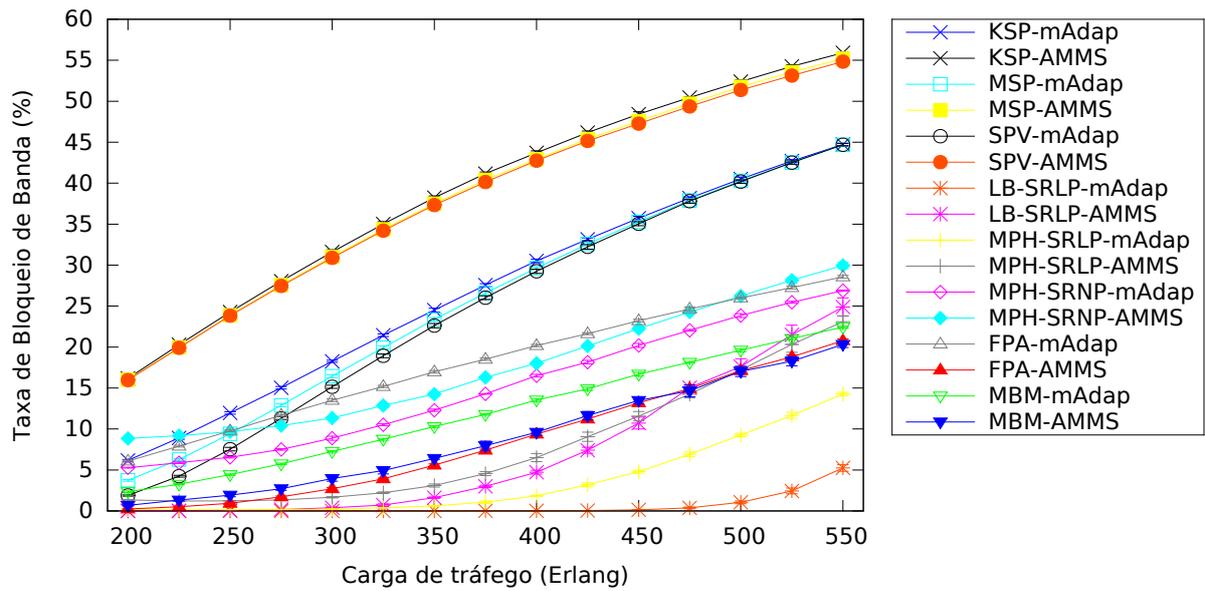


Figura 5.6: Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia USANet.

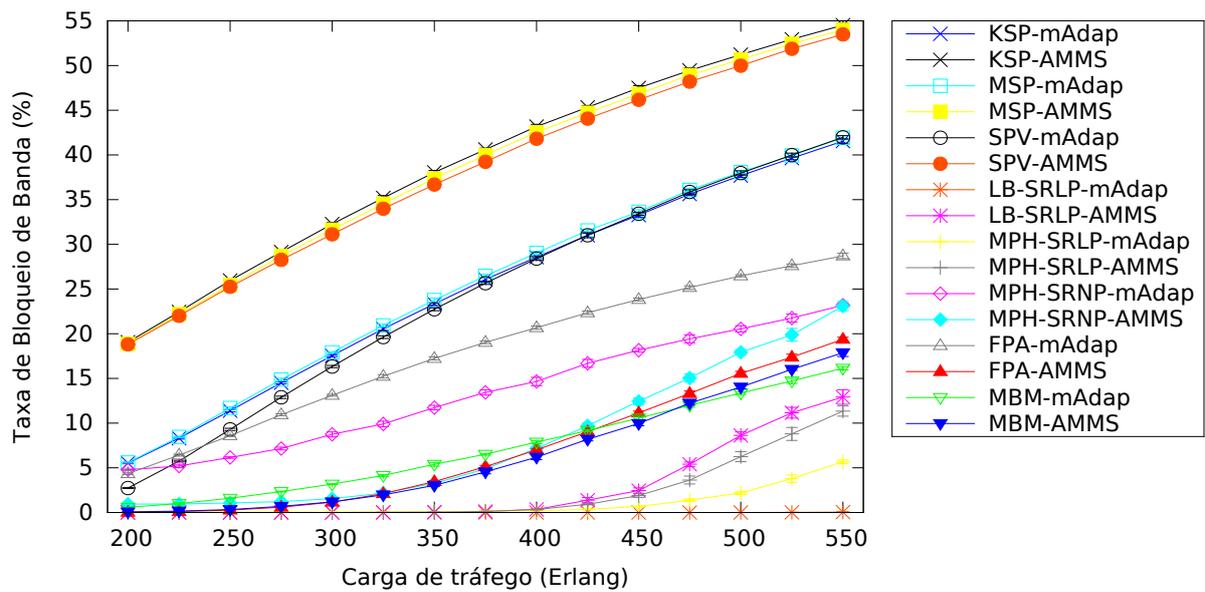


Figura 5.7: Taxa de bloqueio de banda (BBR) para topologia PanEuro.

o esquema *mAdap* mostrou-se ligeiramente melhor, cerca de 10%. Isso acontece pois o esquema *AMMS* procura realizar mais saltos na topologia virtual, que por sua vez acaba exaurindo a quantidade de transmissores para cargas mais elevadas. Nota-se que a estratégia tomada pelo esquema *AMMS*, de controle de modulação associado ao controle do número de saltos na topologia virtual, traz aos algoritmos mais possibilidades para atender as demandas, tendo em vista ainda que os requisitos de continuidade de rota são

aliviados com o uso dessa estratégia.

Para o algoritmo MPH-SRNP sob o esquema *AMMS* houve uma melhora de até 70% na topologia PanEuro. Por outro lado, para a topologia USANet, o MPH-SRNP obteve um desempenho ligeiramente pior, cerca de 15%, uma vez que nessa topologia seus enlaces possuem distâncias maiores e como a característica do algoritmo é de realizar menos saltos na topologia física ele acaba utilizando modulações de níveis maiores.

Para os demais algoritmos o uso do esquema *AMMS* implicou na redução do BBR. Para os algoritmos LB-SRLP e MPH-SRLP, sob o esquema *AMMS*, também apresentou uma subida exponencial, demonstrada nos resultados do estudo do Capítulo 4, porém, um pouco antes do que sob o esquema *mAdap*, entre 400 e 500 *Erlangs*. Isso acontece pois com o aumento do número de saltos, proporcionado pelo *AMMS*, os algoritmos aumentam sua taxa de utilização de transmissores e as demandas começam a ser bloqueadas por falta de transmissores na rede.

Para os algoritmos KSP, MSP, e SPV que não utilizam técnicas de agregação de tráfego o esquema de modulação *AMMS* não traz benefícios. Isso ocorre, pois o esquema *AMMS* obriga essas abordagens a realizarem saltos na topologia virtual e, conseqüentemente, utilizarem mais transmissores na rede. Assim, como esses algoritmos não realizam agregação, os transmissores não são reaproveitados e o *multihop* torna-se um fator dispendioso para essas abordagens.

Taxa média de transmissores disponíveis

A taxa de transmissores disponíveis mostra o uso global do número de transmissores na rede, quanto maior a taxa, menos transmissores foram usados em média na rede. As Figuras 5.8 e 5.9 mostram a porcentagem da soma de todos os transmissores da rede nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente, tendo em vista que cada nó na topologia possui 15 transmissores nesta simulação.

Pode-se observar que, em geral, o uso de transmissores dos algoritmos sob o esquema de modulação adaptativa *AMMS* foram maiores que no esquema *mAdap*. Isso já era esperado, tendo em vista que o esquema *AMMS* intensifica o uso do *multihop* para todos os algoritmos exigindo um maior uso de transmissores na rede.

Entretanto, nota-se que na topologia USANet o algoritmo MBM sob o esquema *AMMS* utilizou menos transmissores que o mesmo sob o esquema *mAdap*, cerca de até 5% a menos. Isso acontece pois o esquema *AMMS* provoca que o algoritmo MBM, no início da simulação quando não é possível realizar muitas agregações de tráfego, crie caminhos ópticos mais longos, pois seu fator de multiplicação de diâmetro utilizado na topologia é 0,25. Assim, com o decorrer da simulação, o algoritmo acaba realizando mais agregação

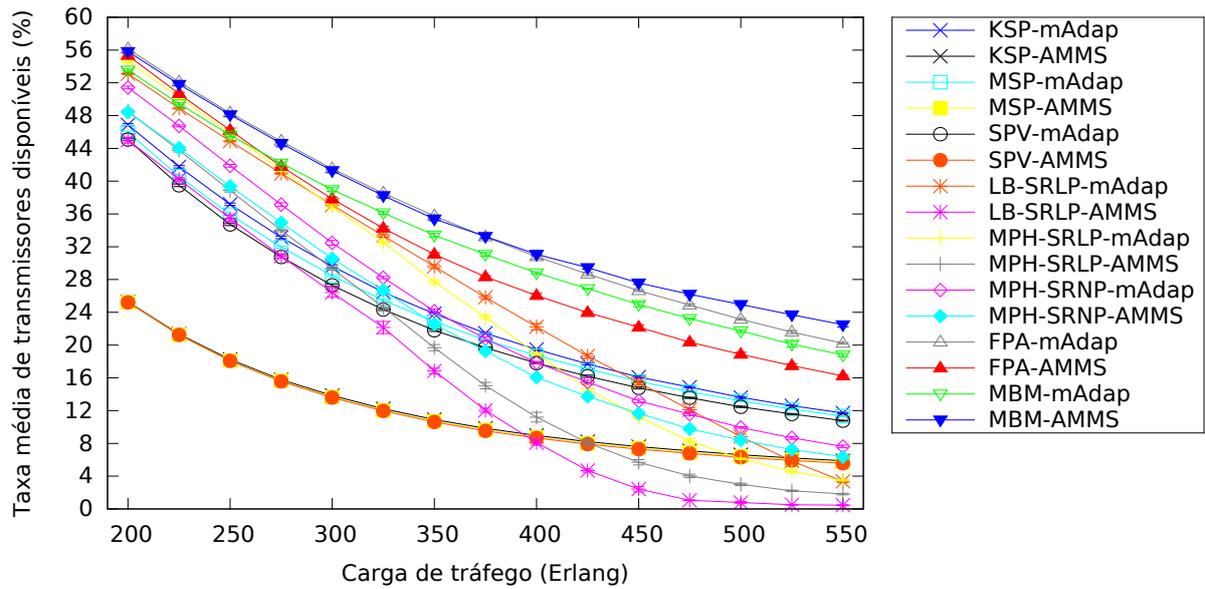


Figura 5.8: Taxa média de transmissores disponíveis para topologia USANet.

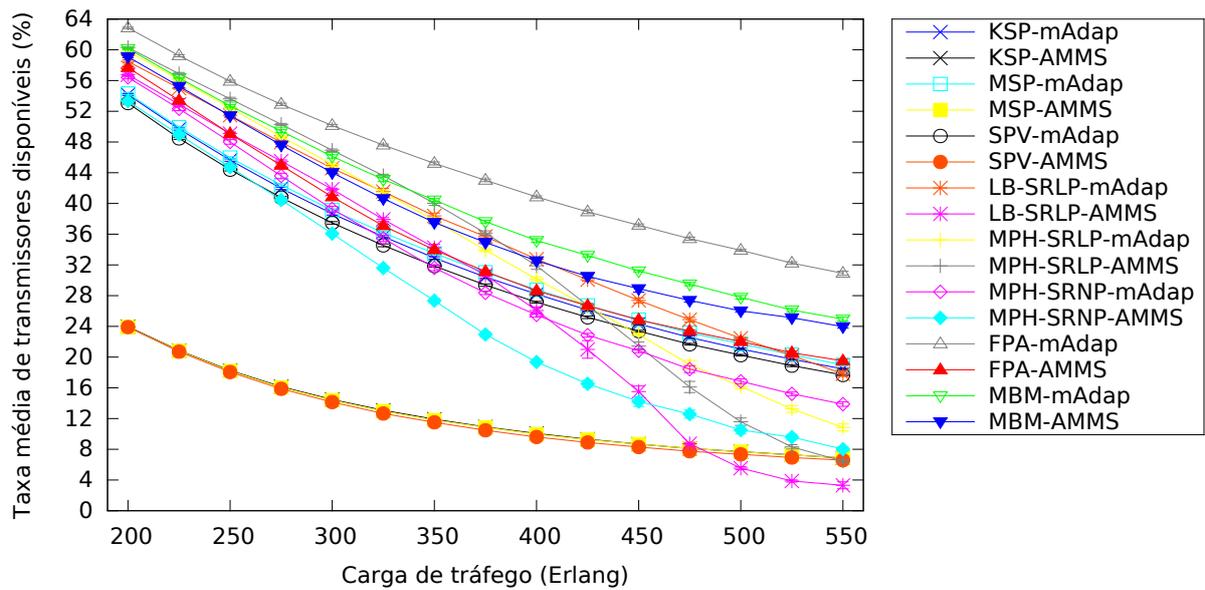


Figura 5.9: Taxa média de transmissores disponíveis para topologia PanEuro.

de tráfego na rede e, portanto, utilizando menos transmissores. O mesmo não acontece na topologia PanEuro, já que o fator de multiplicação de diâmetro utilizado foi 1,0.

Todavia, o aumento no número de transmissores não trouxe um impacto significativo quando comparado aos ganhos de BBR para os algoritmos FPA, MBM e MPH-SRNP, já que seu impacto foi cerca de 3,5% em média superior. Para os demais algoritmos o impacto no uso dos transmissores do esquema *AMMS* justifica o pior desempenho de

BBR.

Média de transmissores por requisição

O número médio de transmissores por requisição mostra a taxa do uso de técnicas de agregação de tráfego dos algoritmos. Essa métrica reflete-se também no uso de transmissores da rede. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram a média do número de transmissores utilizados por conexão sob várias cargas de tráfego nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

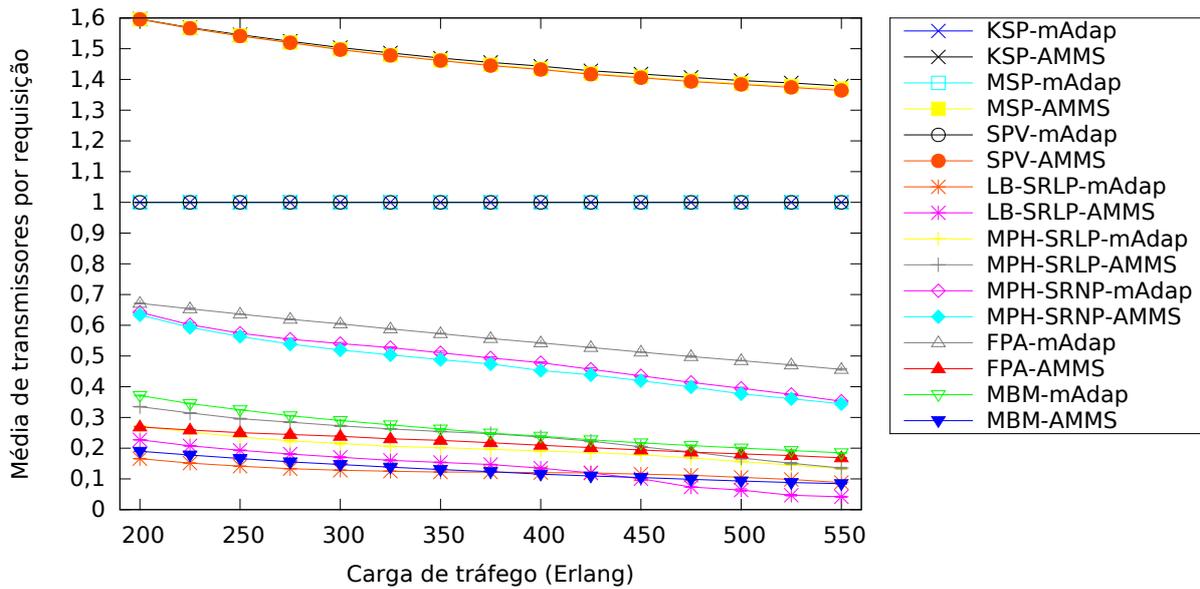


Figura 5.10: Média de transmissores por requisição para topologia USANet.

Observa-se que o número de transmissores utilizados por requisição é igual a 1,0 para os algoritmos KSP, MSP e SPV que estão sob o esquema de modulação adaptativa *mAdap*, pois os mesmos não realizam técnicas de agregação de tráfego e utilizam a estratégia *singlehop*. Para os mesmos algoritmos sob o esquema *AMMS* sua média de transmissores utilizados por requisição é superior a 1,0, pois com o uso da estratégia *multihop* e sem técnicas de agregação de tráfego, os algoritmos utilizam mais de um transmissor para atender as requisições de tráfego. A consequência disto é o maior uso de transmissores e um pior desempenho no BBR demonstrando anteriormente.

Para os demais algoritmos, o número é inferior a 1,0. Isto se deve ao fato de que, com o uso da agregação de dados e espectro, múltiplas conexões podem compartilhar um mesmo transmissor. Em outras palavras, observa-se a capacidade do algoritmo de realizar agregação de tráfego, quanto menor a taxa, maior é a capacidade dos transmissores de realizarem a agregação de dados e espectro para múltiplos fluxos.

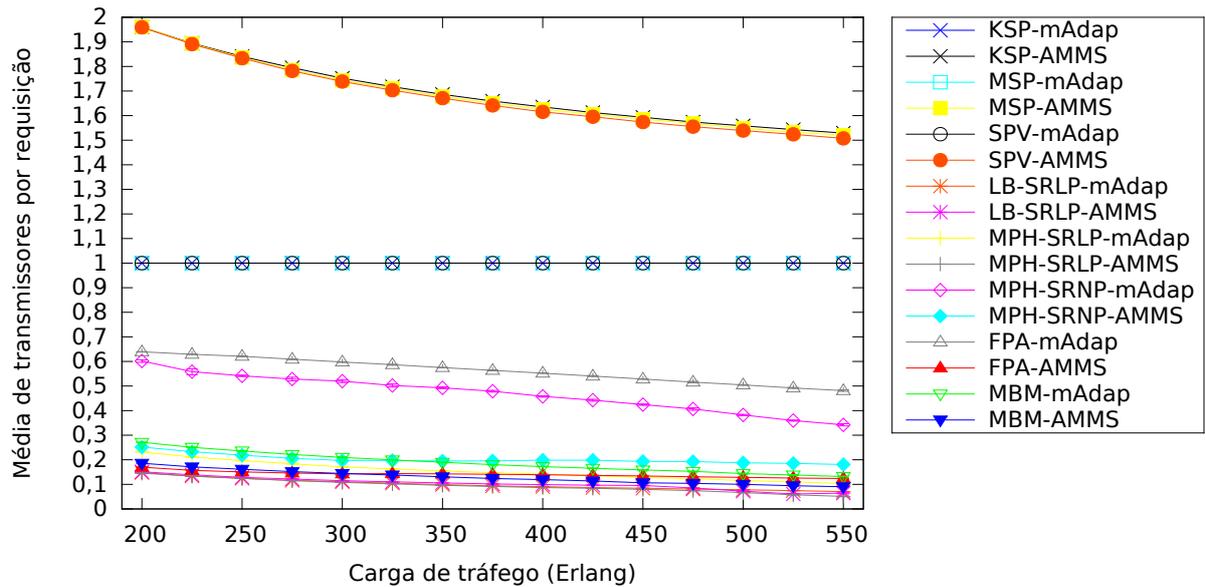


Figura 5.11: Média de transmissores por requisição para topologia PanEuro.

Observa-se que os algoritmos que obtiveram os melhores resultados de BBR foram justamente os algoritmos que utilizaram melhores os transmissores, ou seja, obtiveram uma taxa de transmissores utilizados por requisição inferior. O algoritmo FPA foi o algoritmo que obteve o maior ganho no uso de transmissores por requisição quando comparado os esquemas *AMMS* e *mAdap*, cerca de 71%. Para o algoritmo MBM, seu ganho foi um pouco menor, cerca de 52%. Para o algoritmo MPH-SRNP o ganho proporcionado pelo esquema de modulação adaptativa *AMMS* foi de cerca de 60%.

Para os demais algoritmos, o esquema *AMMS* teve resultados semelhantes para a taxa de transmissores por requisição, uma vez que *multihop*, proporcionado por todos os algoritmos, ajuda na viabilização de novos pontos de entrada para as técnicas de agregação de tráfego.

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 realizados na rede. Essa métrica não só demonstra os custos em termos de OPEX e CAPEX na rede, como também reflete o número de transmissores utilizados. As Figuras 5.12 e 5.13 mostram a média de saltos na topologia virtual por requisição para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

Os algoritmos KSP, MSP, SPV e FPA sob o esquema de modulação adaptativa *mAdap* mantém em todas as cargas de tráfego uma média igual a 1, pois esses algoritmos

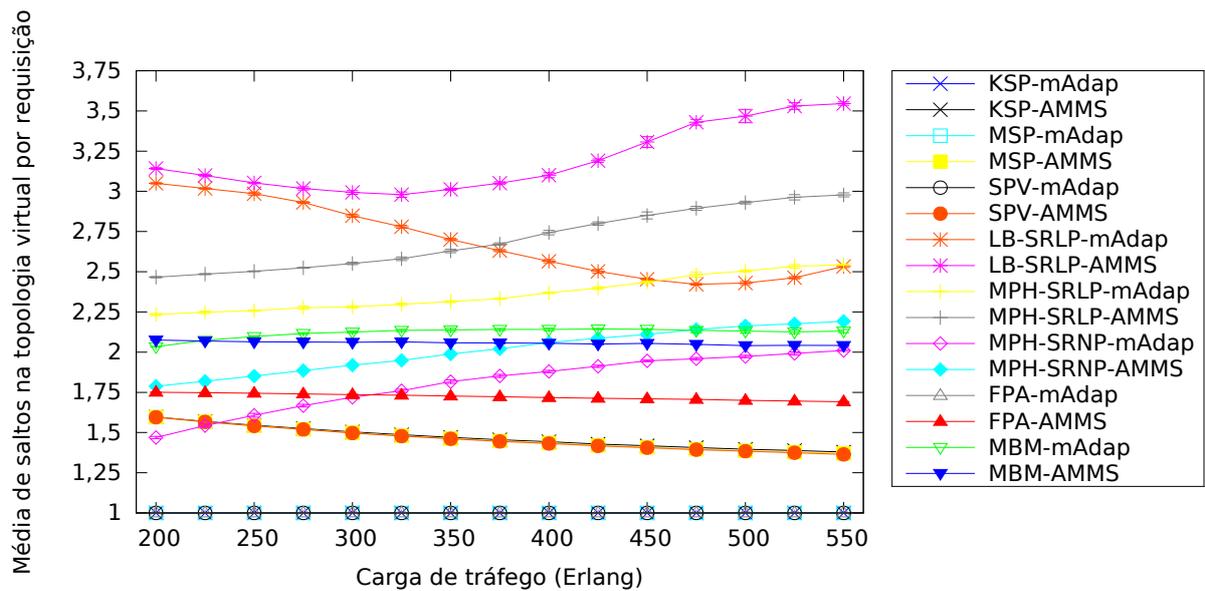


Figura 5.12: Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia USANet.

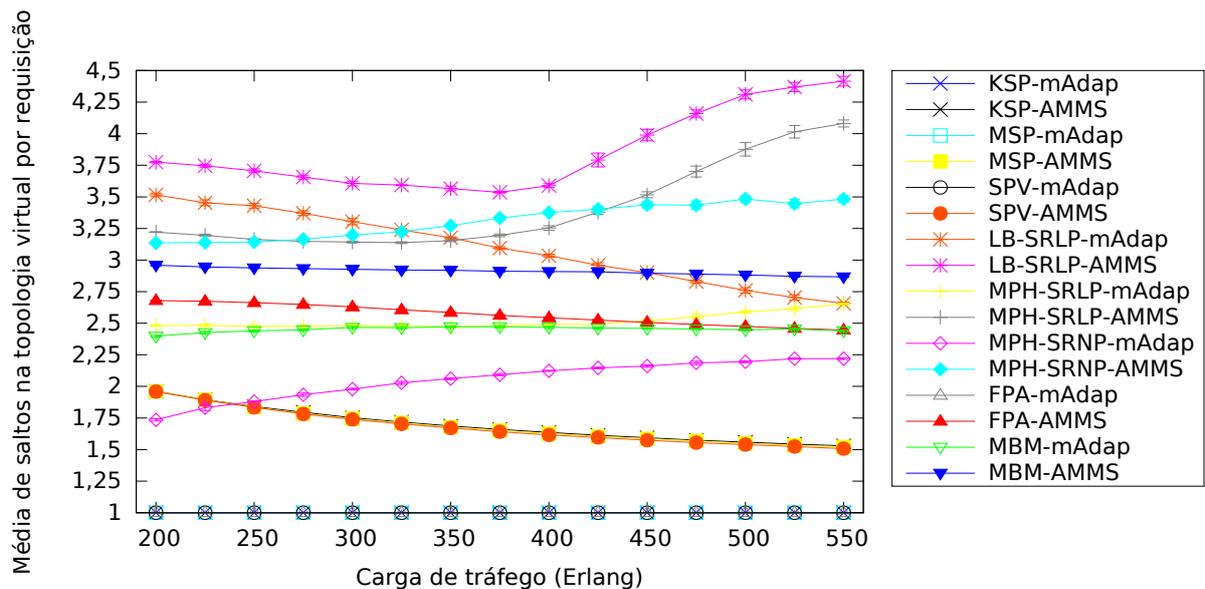


Figura 5.13: Média de saltos na topologia virtual por requisição para topologia PanEuro.

são *singlehop*. Os mesmos algoritmos sob o esquema de modulação adaptativa *AMMS* apresentam médias superiores a 1, já que o *AMMS* proporciona a esses algoritmos um roteamento *multihop*.

Pode-se observar que o algoritmo MBM sob o esquema *AMMS* mantém sua média de saltos próximo de 2 para a topologia USANet. Os resultados ainda demonstram que o número de saltos na topologia virtual é levemente inferior ao MBM sob o esquema

mAdap. Por outro lado, na topologia PanEuro a situação se inverte, o MBM sob o esquema *AMMS* fica próximo a 3 saltos e o mesmo sob o esquema *mAdap* fica próximo a 2,5 saltos. Isso acontece, pois o fator de multiplicação de diâmetro do *AMMS* utilizado na topologia PanEuro é maior, causando a criação de mais zonas de alcançabilidade e, por sua vez, mais saltos na topologia virtual. Observa-se que essa característica não afeta negativamente o desempenho do algoritmo, como demonstrado anteriormente.

Para o algoritmo FPA o aumento de saltos na topologia virtual proporcionado pelo *AMMS* foi relativamente baixo na topologia USANet, em média 1,75 saltos por requisição. Em contrapartida na topologia PanEuro esse aumento foi relativamente grande, em média 2,75 saltos por requisição. Nota-se aqui, que a característica de realizar mais saltos na topologia virtual não afeta negativamente o desempenho de BBR do algoritmo, já que a usabilidade dos transmissores por meio da agregação de tráfego é significativamente maior, como demonstrado anteriormente.

O algoritmo MPH-SRNP sob o esquema *AMMS* obteve um aumento de cerca de 2 saltos a mais que o mesmo sob o esquema *mAdap* na topologia PanEuro. Entretanto, isso já era esperado, já que o esquema *AMMS* promove o *multihop*. Para os algoritmos LB-SRLP e MPH-SRLP nota-se um grande aumento quando a carga de tráfego sobe. Isso ocorre, pois com a limitação do recursos, os algoritmos LB-SRLP e MPH-SRLP começam a procurar rotas cada vez maiores para atender a demanda, tendo em conta que o esquema de reserva SRLP estimula o uso de técnicas de agregação e a busca de caminhos cada vez maiores para atender esse fim.

Média de saltos na topologia física por requisição

O número de saltos na topologia física reflete diretamente no uso de recursos de espectro de toda a rede. Esse número também reflete no uso dos níveis de modulações, uma vez que os níveis de modulação menores, em geral, podem realizar mais saltos na topologia física por serem capazes de percorrer caminhos maiores. As Figuras 5.14 e 5.15 mostram a média de saltos na topologia física por requisição para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

Pode-se observar que a característica apresentada no estudo do Capítulo 4 volta a aparecer aqui. Com exceção aos algoritmos MPH-SRNP, MPH-SRLP e LB-SRLP, à medida que a carga cresce o número de saltos físicos diminuí. Isto ocorre, pois esses algoritmos tendem a procurar caminhos maiores em seus grafos auxiliares para atender os fluxos, em compensação, a característica dos demais algoritmos baseados em k —menores distâncias fazem com que caminhos ópticos maiores tenham menor probabilidade de serem alocados na rede.

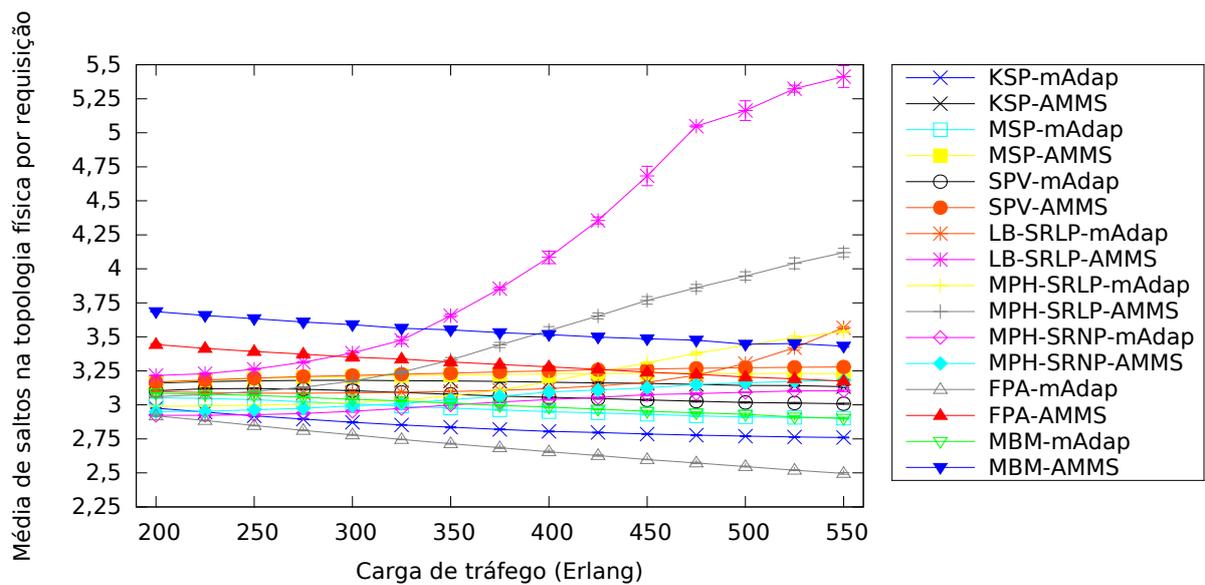


Figura 5.14: Média de saltos na topologia física por requisição para topologia USANet.

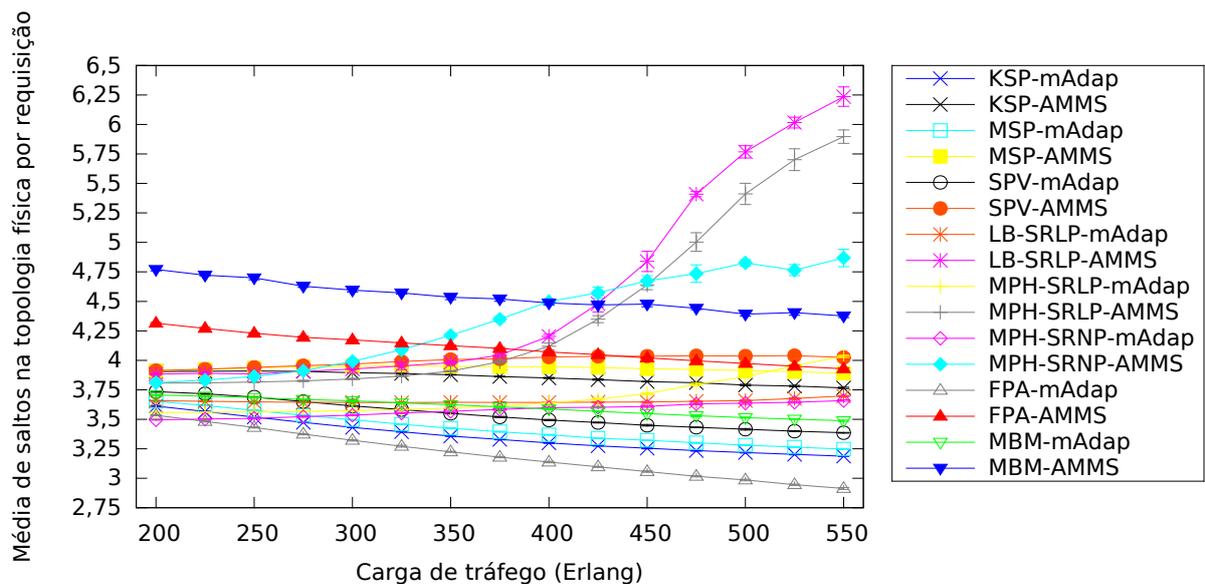


Figura 5.15: Média de saltos na topologia física por requisição para topologia PanEuro.

Observa-se que o algoritmo MBM sob o esquema *AMMS* obtém a maior média de saltos na topologia física por requisição em comparação aos demais algoritmos, cerca de em média 3,5 saltos para a topologia USANet e 4,5 para a topologia PanEuro. Isso acontece, pois, como visto anteriormente, o esquema *AMMS* provoca um elevado uso da técnica de *multihop* fazendo com que os algoritmos procurem caminhos maiores na rede, no entanto, é essa característica que provoca um desempenho melhor no BBR e um melhor

uso das técnicas de agregação de tráfego pelos transmissores.

Para o algoritmo FPA sob o esquema de modulação adaptativa *AMMS* a média subiu cerca de 0,75 saltos em comparação ao mesmo sob o esquema *mAdap*. Essa média foi um pouco menor que a ocorrida no algoritmo MBM sob os mesmos esquemas. Isso acontece, pois a estratégia utilizada pelo algoritmo FPA é baseada no roteamento *singlehop*, diminuindo assim o número de saltos.

Para os algoritmos MPH-SRLP e LB-SRLP o aumento do número de saltos foi ainda maior quando a carga de tráfego é elevada, chegando até 6 saltos físicos por requisição. Isso demonstra, a ineficiência do esquema *AMMS* para os algoritmos que realizam técnicas de reserva de tráfego, demonstrando que o esquema não está preparado para essas abordagens.

Para os demais algoritmos a média de saltos na topologia física manteve-se semelhante em ambos os esquemas de modulação adaptativa, cerca de 3 saltos na topologia USANet e 3,5 saltos na topologia PanEuro em média.

Taxa média de espectro disponível

A taxa de espectro disponível mostra os recursos de espectro utilizados em toda a rede. As Figuras 5.16 e 5.17 mostram a média da taxa de espectro disponível por requisição para várias cargas de tráfego nas topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

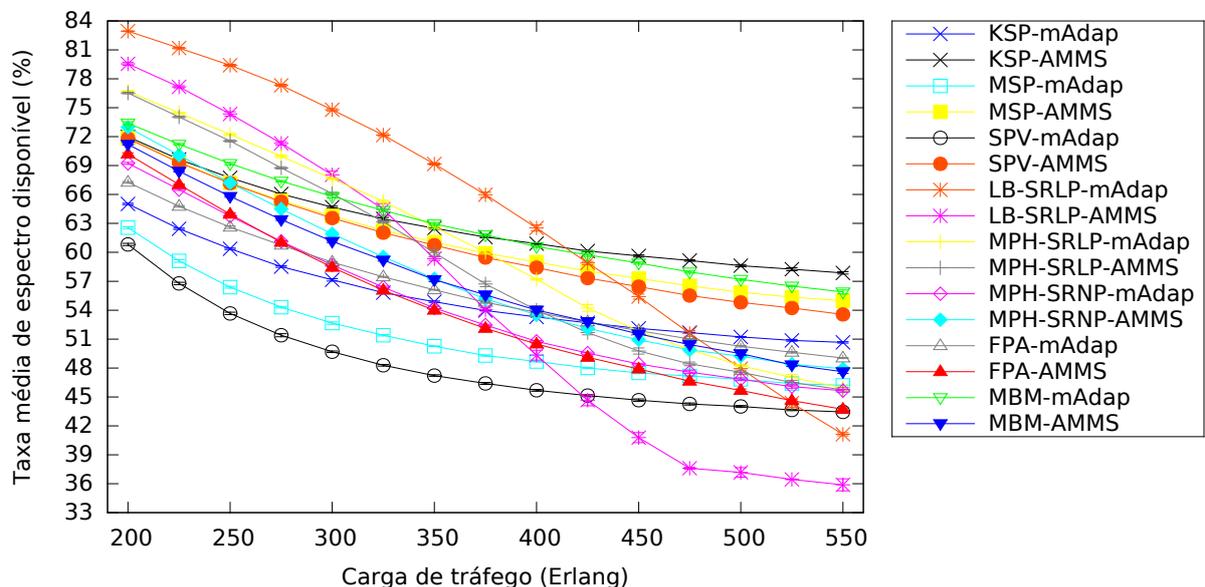


Figura 5.16: Taxa média de espectro disponível para topologia USANet.

Observa-se que os algoritmos LB-SRLP e MPH-SRLP têm os menores índices de uso do espectro sob ambos os esquemas de modulação adaptativa *mAdap* e *AMMS*. No entanto, a mesma correspondência ocorrida no estudo do Capítulo 4 é refletida aqui.

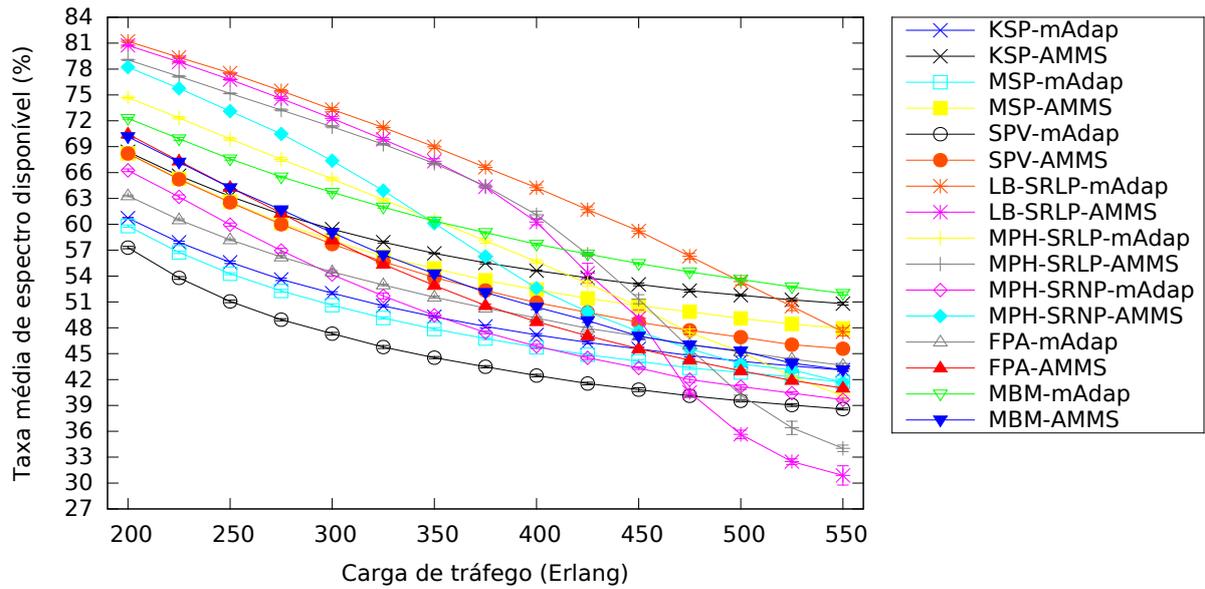


Figura 5.17: Taxa média de espectro disponível para topologia PanEuro.

Os algoritmos LB-SRLP e MPH-SRLP apresentam uma queda muito acentuada com o aumento da carga, chegando a usar quase 70% do total de espectro disponível na rede para as cargas mais altas. Essa correspondência ocorre no desempenho do BBR apresentado anteriormente, onde a carga cresce exponencialmente a partir de 400 *Erlangs*.

Para o algoritmo MBM, o uso do espectro foi moderadamente superior no esquema *AMMS* em comparação com o esquema *mAdap*, apresentando um uso de até 1% para cargas baixas e 5% para cargas altas. Entretanto, o MBM sob o esquema *AMMS* obtém um melhor uso dos recursos de espectro, tendo em vista a métrica de transmissores por requisição. O maior uso do espectro ocorre devido a maior quantidade de caminhos ópticos proporcionado pelo esquema *AMMS*, o que provoca um maior número de bandas de guarda na rede.

Para o algoritmo MPH-SRNP o uso do espectro foi significativamente inferior no esquema *AMMS* em comparação com o esquema *mAdap*, até 12% menor. Isso se deve ao fato da característica do algoritmo MPH de procurar realizar menos saltos na topologia física e o esquema de reserva SRNP realizar menos reservas que o esquema SRLP. Como o esquema *AMMS* procura criar mais caminhos ópticos na rede, o algoritmo MPH-SRNP sob o esquema *AMMS* realiza mais agregações de tráfego e assim consegue economizar mais espectro.

O algoritmo FPA apresentou um uso de espectro semelhante em ambos os esquemas de modulação adaptativa *AMMS* e *mAdap*, concentrando seu uso em cerca de pouco mais da metade do total de espectro disponível em toda a rede. Para os demais algoritmos

o uso do espectro foi um pouco inferior para os algoritmos sob o esquema *AMMS*, em média 9% menor. No entanto, esses algoritmos não conseguem aproveitar a economia de recursos de espectro proporcionado pelo esquema *AMMS*, pois esses algoritmos não utilizam técnicas de agregação de tráfego e, por sua vez, provocam um uso elevado na taxa de transmissores por requisição.

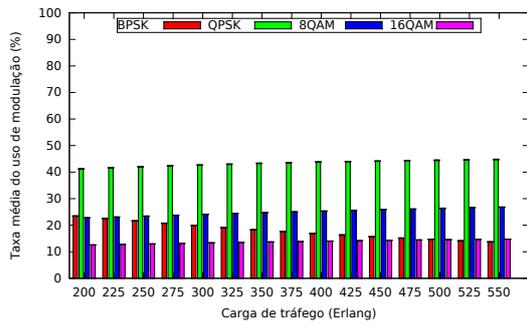
Taxa média do uso de modulação

A taxa média do uso de modulação mostra o percentual de caminhos ópticos alocados em toda a simulação para cada nível de modulação. As Figuras 5.18 e 5.19 mostram os resultados dessa métrica para a topologia USANet. As Figuras 5.20 e 5.21 mostram os resultados dessa métrica para a topologia PanEuro. Todas essas Figuras mostram a taxa média do uso de modulação para todos os algoritmos comparados em todas as cargas de trabalho sob ambos os esquema de modulação adaptativa *AMMS* e *mAdap* apresentados lado a lado.

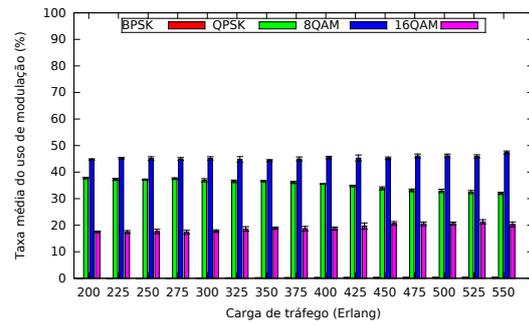
Os resultados mostram que, em geral, os algoritmos que utilizam os maiores níveis de modulação são os que apresentam o melhor desempenho. O algoritmo FPA sob o esquema *AMMS* concentrou seu uso nos níveis de modulação 8QAM e QPSK, cerca de 40% a 45%, respectivamente para topologia USANet. O FPA sob o esquema *AMMS* praticamente não usa o nível de modulação BPSK, em contrapartida o mesmo algoritmo sob o esquema *mAdap* utiliza o nível de modulação BPSK em média 15% do caminhos ópticos alocados. Para a topologia PanEuro essa disparidade é ainda maior, FPA sob o esquema *AMMS* usa o nível de modulação 16QAM em cerca de 90% dos caminhos ópticos alocados. Por esse motivo, o algoritmo consegue um melhor desempenho no uso dos recursos de espectro proporcionando um bom desempenho na taxa de bloqueio de banda.

Os algoritmos KSP, MSP e SPV mantêm o mesmo padrão de uso do nível de modulação em suas respectivas topologias e esquemas de modulação, uma vez que ambos não possuem a característica do *multihop* e são baseado em k -menores distâncias. O maior percentual de modulação para o esquema *mAdap* encontra-se na modulação QPSK e 8QAM para as topologias USANet e PanEuro, respectivamente.

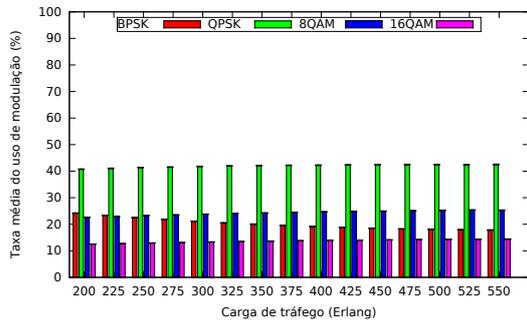
Já para o esquema de modulação adaptativa *AMMS* maior percentual de modulação concentrou-se na modulação QPSK e 16QAM para as topologias USANet e PanEuro, respectivamente. No entanto, no esquema *AMMS*, esses algoritmos praticamente não utilizaram o nível de modulação BPSK, que por sua vez aumentou o uso dos níveis de modulação superiores em cerca de 20%. Embora esses algoritmos utilizem níveis de modulação superiores, sua economia no uso do espectro não é aproveitada pela suas abordagens RSA, como apresentado anteriormente.



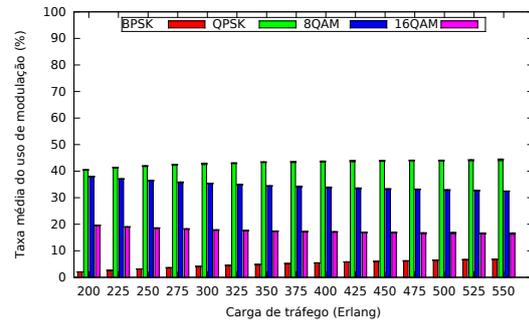
(a) Algoritmo FPA sob o esquema *mAdap*.



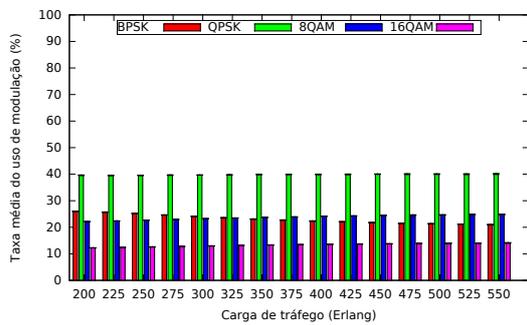
(b) Algoritmo FPA sob o esquema *AMMS*.



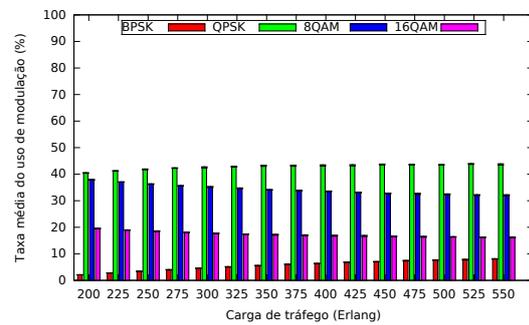
(c) Algoritmo KSP sob o esquema *mAdap*.



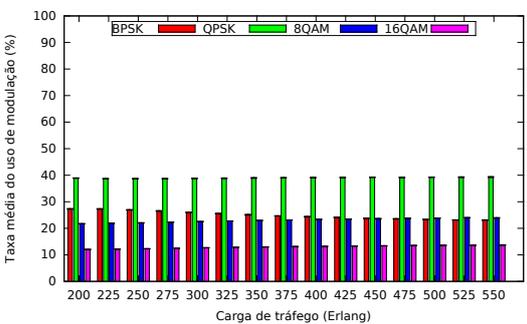
(d) Algoritmo KSP sob o esquema *AMMS*.



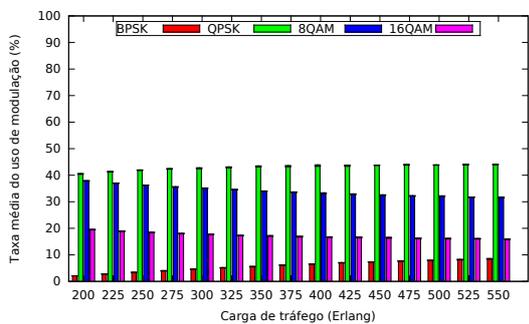
(e) Algoritmo MSP sob o esquema *mAdap*.



(f) Algoritmo MSP sob o esquema *AMMS*.

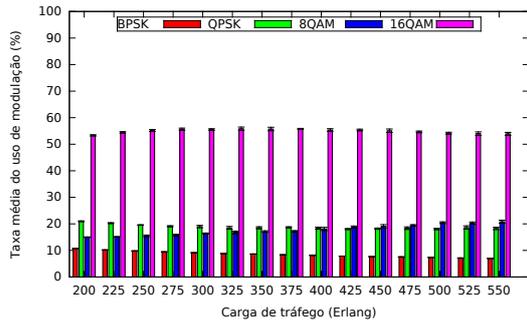


(g) Algoritmo SPV sob o esquema *mAdap*.

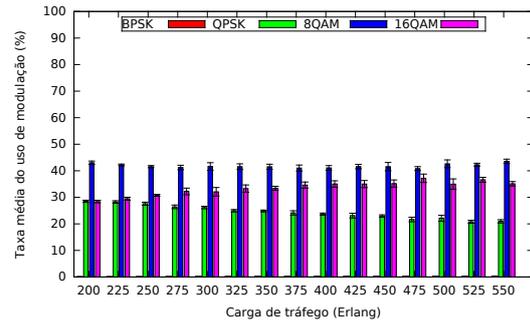


(h) Algoritmo SPV sob o esquema *AMMS*.

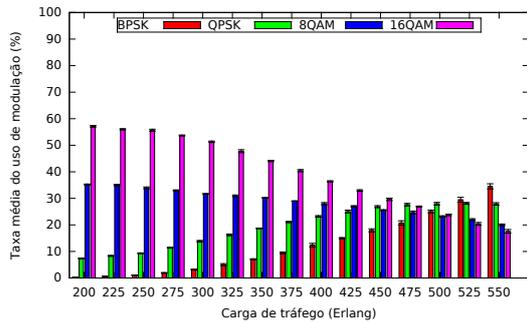
Figura 5.18: Taxa média do uso de modulação para topologia USANet, algoritmos FPA, KSP, MSP, SPV sob os esquemas *mAdap* e *AMMS*.



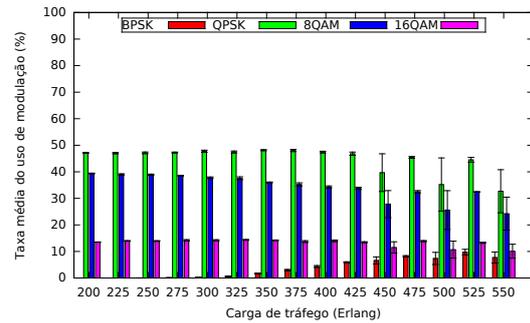
(a) Algoritmo MBM sob o esquema *mAdap*.



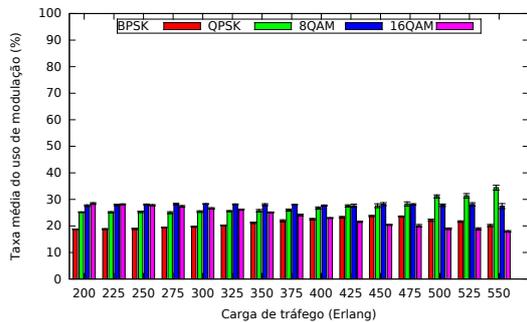
(b) Algoritmo MBM sob o esquema *AMMS*.



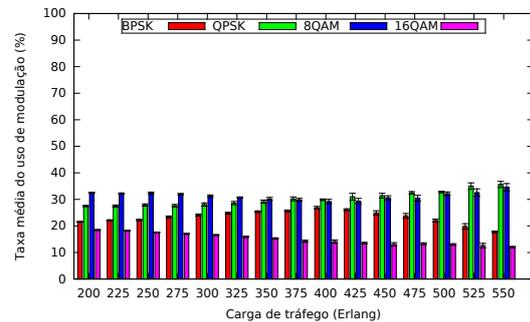
(c) Algoritmo LB-SRLP sob o esquema *mAdap*.



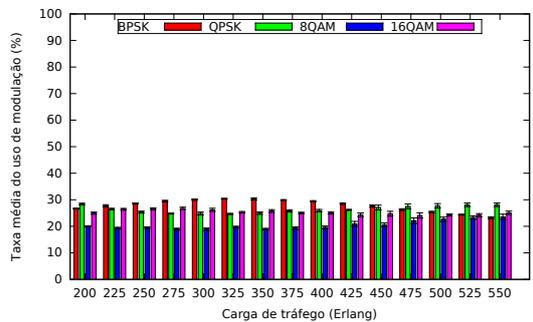
(d) Algoritmo LB-SRLP sob o esquema *AMMS*.



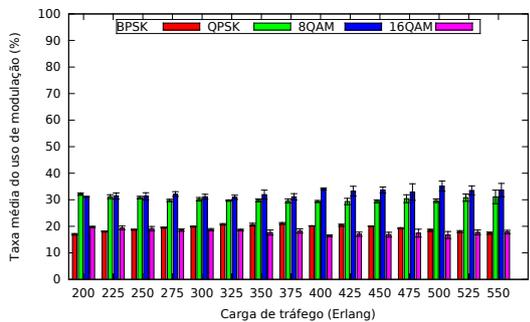
(e) Algoritmo MPH-SRLP sob o esquema *mAdap*.



(f) Algoritmo MPH-SRLP sob o esquema *AMMS*.

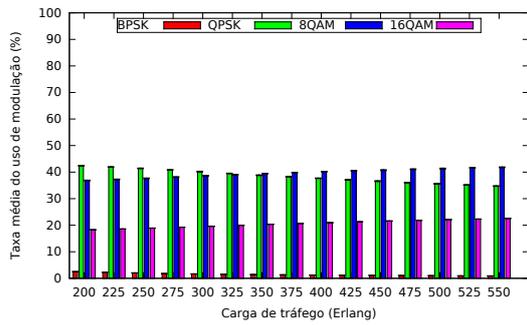


(g) Algoritmo MPH-SRNP sob o esquema *mAdap*.

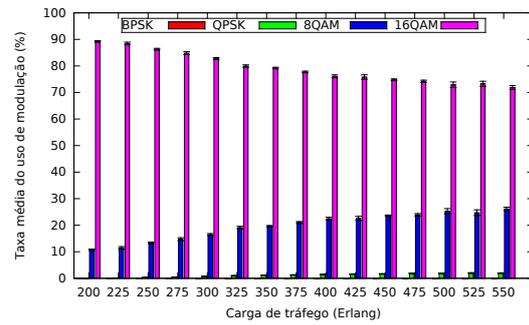


(h) Algoritmo MPH-SRNP sob o esquema *AMMS*.

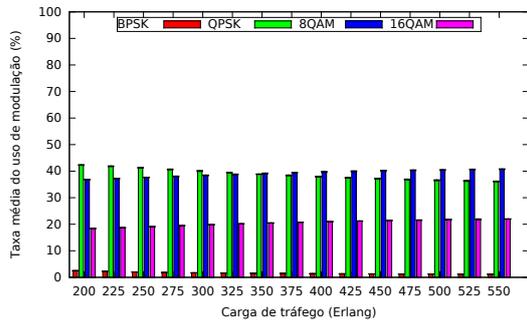
Figura 5.19: Taxa média do uso de modulação para topologia USANet, algoritmos MBM, LB-SRLP, MPH-SRLP, MPH-SRNP sob os esquemas *mAdap* e *AMMS*.



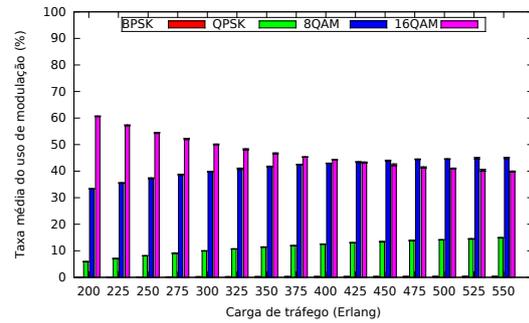
(a) Algoritmo FPA sob o esquema *mAdap*.



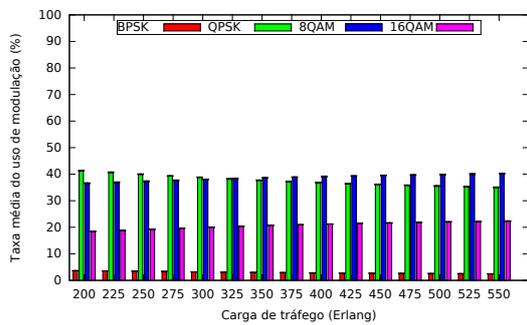
(b) Algoritmo FPA sob o esquema *AMMS*.



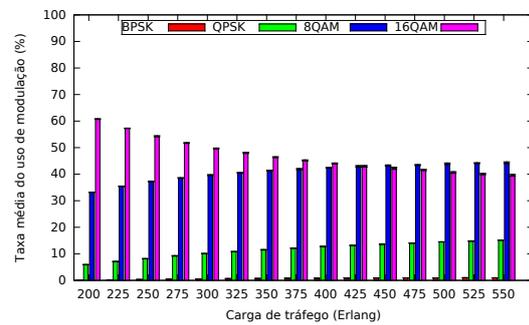
(c) Algoritmo KSP sob o esquema *mAdap*.



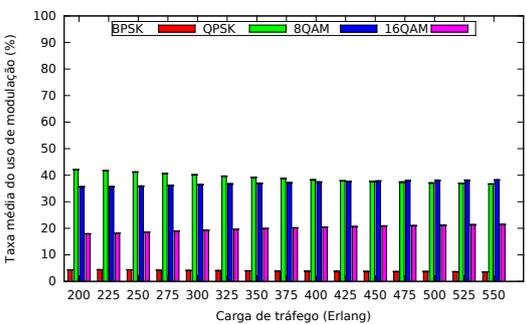
(d) Algoritmo KSP sob o esquema *AMMS*.



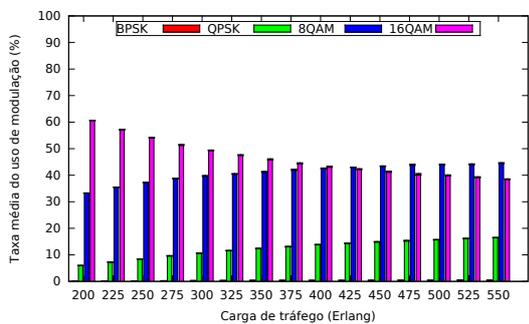
(e) Algoritmo MSP sob o esquema *mAdap*.



(f) Algoritmo MSP sob o esquema *AMMS*.

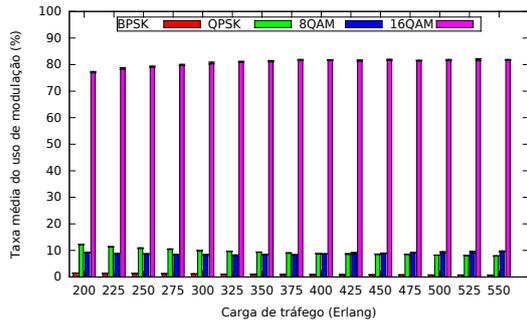


(g) Algoritmo SPV sob o esquema *mAdap*.

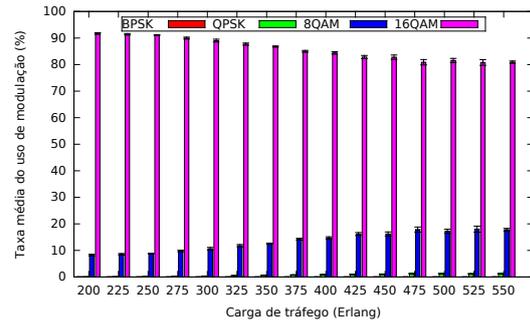


(h) Algoritmo SPV sob o esquema *AMMS*.

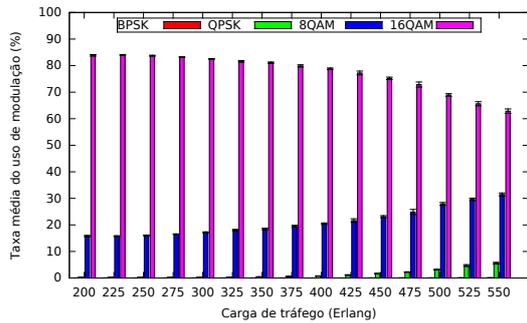
Figura 5.20: Taxa média do uso de modulação para topologia PanEuro, algoritmos FPA, KSP, MSP, SPV sob os esquemas *mAdap* e *AMMS*.



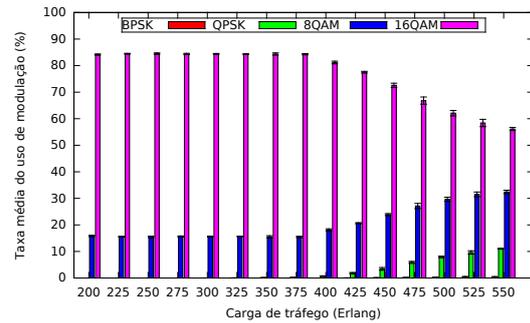
(a) Algoritmo MBM sob o esquema *mAdap*.



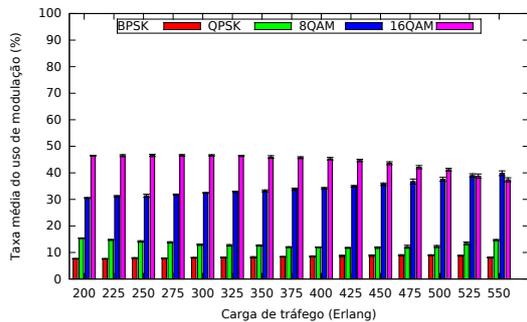
(b) Algoritmo MBM sob o esquema *AMMS*.



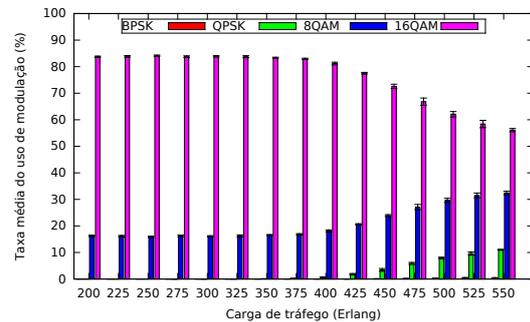
(c) Algoritmo LB-SRLP sob o esquema *mAdap*.



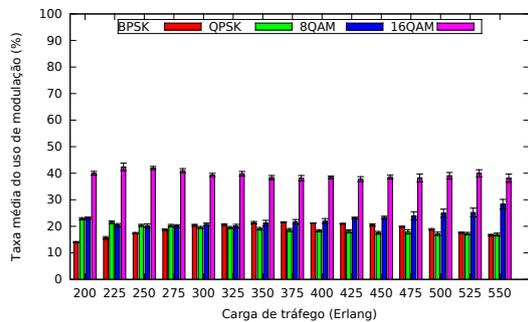
(d) Algoritmo LB-SRLP sob o esquema *AMMS*.



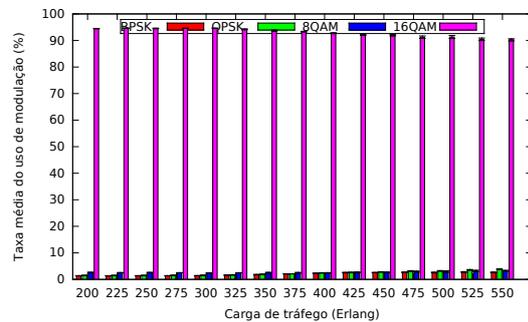
(e) Algoritmo MPH-SRLP sob o esquema *mAdap*.



(f) Algoritmo MPH-SRLP sob o esquema *AMMS*.



(g) Algoritmo MPH-SRNP sob o esquema *mAdap*.



(h) Algoritmo MPH-SRNP sob o esquema *AMMS*.

Figura 5.21: Taxa média do uso de modulação para topologia PanEuro, algoritmos MBM, LB-SRLP, MPH-SRLP, MPH-SRNP sob os esquemas *mAdap* e *AMMS*.

Para o algoritmo MBM sob o esquema *AMMS* o uso dos níveis de modulação superiores também aumentaram. O nível de modulação BPSK praticamente não é utilizado, entretanto houve uma queda no percentual do uso do nível de modulação 16QAM na topologia USANet, cerca de 25%. Isso acontece, pois o algoritmo consegue atender mais demandas e assim há uma maior distribuição entre os níveis de modulação 8QAM e QPSK. Para a topologia PanEuro, o algoritmo MBM sob o esquema *AMMS* utiliza ainda mais o nível de modulação 16QAM, praticamente não utilizando os níveis de modulação BPSK e QPSK.

Para os algoritmos LP-SRLP e MPH-SRLP, a modulação concentrou-se nos níveis de modulação 8QAM e QPSK na topologia USANet e no nível de modulação 16QAM na topologia PanEuro. Uma característica interessante do esquema *AMMS* é que o percentual de nível de modulação manteve-se em toda simulação. O mesmo não acontece no esquema *mAdap*, onde, com o aumento da carga de tráfego, os níveis de modulação menores começam a ser mais utilizados. Isso acontece, pois com o aumento da carga, os recursos tornam-se mais limitados e os algoritmos no *mAdap* começam a procurar caminhos ópticos maiores na rede. Assim, níveis de modulação superiores, proporcionados pelo *AMMS*, não conseguem atender caminhos ópticos maiores, proporcionando um pior desempenho de BBR, como demonstrado anteriormente.

Por fim, para o algoritmo MPH-SRNP, o esquema *AMMS* concentrou seus níveis de modulação em níveis ainda mais altos. Na topologia PanEuro, o percentual de caminhos ópticos com o nível de modulação 16QAM foi cerca de 95%. Isso mostra que o *multihop* proporcionado pelo *AMMS* eleva o potencial dos níveis de modulação superiores ainda mais que o esquema *mAdap*. Para a topologia USANet, a modulação concentrou-se nos níveis de modulação 8QAM e QPSK, uma vez o fator de multiplicação de diâmetro utilizado nesta topologia foi inferior que a topologia PanEuro, provocando assim, zonas de alcançabilidade maiores e consequentemente uso de modulação com níveis mais baixos.

5.5 Resumo Conclusivo

Neste Capítulo, foi estudado o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA) no cenário de tráfego dinâmico. Foi proposto um esquema de modulação adaptativa, inspirado no esquema proposto em [17], para resolver o problema RMLSA para qualquer abordagem RSA. Observando as deficiências do esquema de modulação adaptativa *mAdap*, proposto em [17], e a eficiência da estratégia *multihop* observado no Capítulo 4, o objetivo do 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.

Para isso foi proposto o esquema de modulação adaptativa *AMMS* (*Adaptive Modulation Multihop Schema*), que viabiliza o roteamento do tráfego através de múltiplos saltos na topologia virtual permitindo a suavização das restrições de continuidade de espectro e distância de transmissão do problema RMLSA.

O esquema *AMMS* procura atribuir níveis de modulação adequados, associado a uma quantidade de saltos necessários para atender as requisições de tráfego. Para isso o esquema *AMMS* é constituído por uma série de tarefas *offline* que caracterizam a rede atribuindo a ela zonas de alcançabilidade em saltos por modulação. Estas zonas são formadas através dos alcances preestabelecidos de cada nível de modulação para que eles ofereçam um QoT aceitável na rede.

Para demonstrar a eficiência do esquema de modulação adaptativa proposto, foram comparados sete algoritmos da literatura e o algoritmo MBM proposto no Capítulo 4 desta dissertação. Uma análise prévia da quantidade de zonas de alcançabilidade em saltos por modulação foi realizada para 4 topologias de rede. Concluiu-se que cada topologia possui características específicas que devem ser analisadas previamente para a utilização esquema *AMMS*. A análise prévia mostrou que o valor adequado utilizado para calcular o número total de zonas de alcançabilidade que o esquema *AMMS* deve propor é obtido através de um percentual do diâmetro da rede dividido pelo alcance máximo do melhor nível de modulação disponível na rede.

Simulações foram executadas em duas topologias de rede, USANet e PanEuro. O percentual de diâmetro utilizado na topologia USANet foi 25%, enquanto na topologia PanEuro foi utilizado 100%. Os resultados mostraram que o uso do esquema de modulação adaptativa *AMMS* pode proporcionar um ganho de até 85% na taxa de bloqueio de banda (BBR) para algoritmos que utilizam técnicas de agregação de dados e espectro.

Os resultados também demonstraram que o esquema de modulação adaptativa *AMMS* é mitigado pela quantidade de transmissores da rede, mostrando que há sempre um *trade-off* entre o número de transmissores e a quantidades de saltos utilizados na topologia virtual. Como o número de saltos na topologia virtual impacta no uso do nível modulação e o uso da modulação impacta no uso do espectro, percebe-se então que para cada classe de algoritmos RSA deve-se realizar um ajuste fino de parâmetros para que se possa utilizar o esquema de modulação adaptativa *AMMS* da forma mais adequada.

Capítulo 6

Considerações Finais

O rápido crescimento do tráfego da Internet e as aplicações emergentes demandam um melhor desempenho das tecnologias de transmissão em fibra óptica. A rigidez das tecnologias de redes WDM tradicionais dificulta a transmissão das novas demandas, impondo taxas de transmissão fixas reduzindo a eficiência na utilização dos recursos da rede. O conceito de redes ópticas elásticas vem recebendo muita atenção na literatura por prover taxas de transmissão flexíveis que se adaptam às demandas heterogêneas do tráfego atual e futuro.

Esta dissertação abordou as principais características deste novo paradigma de redes ópticas e apresentou os principais desafios encontrados na literatura. Além disso, também apresentou um estudo abrangente sobre o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa (RMLSA) no cenário de tráfego de rede dinâmico. Foram estudados diferentes aspectos do problema RMLSA em diferentes contextos de rede.

No Capítulo 4 foi estudado o problema RMLSA dinâmico através de diversas abordagens RSA sob um esquema de modulação adaptativa que transforma qualquer abordagem RSA clássica em uma abordagem RMLSA. O esquema de modulação adaptativa utilizado foi o *mAdap*, proposto em [17]. O estudo demonstrou que a maximização do uso do melhor nível de modulação proposto pelo esquema *mAdap* é eficaz para resolver o problema RMLSA no cenário de tráfego dinâmico. O estudo também demonstrou que a utilização da estratégia *multihop* trás benefícios significativos para o desempenho das abordagens RSA sob o esquema de modulação adaptativa *mAdap*. Foi observado que o número de saltos virtuais traz um impacto direto no uso da modulação e conseqüentemente na taxa de bloqueio de banda desempenhada pelo algoritmo RSA.

Para demonstrar estes fatos, foi proposto um algoritmo para solucionar o problema através do uso de técnicas de agregação de dados e espectro associado ao controle da modulação espectral. O algoritmo MBM proposto busca tirar proveito do esquema de modulação adaptativa *mAdap*, utilizando-o de forma oportunista para resolver o pro-

blema RMLSA. Resultados de simulação compararam sete algoritmos da literatura com o algoritmo MBM em duas topologias de rede. Os resultados apresentados mostraram que o algoritmo MBM obteve ganhos de até 81% no bloqueio de banda frente a alguns algoritmos da literatura. Observa-se que a característica do MBM provoca uma melhor utilização no uso dos transmissores pois a técnica de *multihop* proporcionada, ajuda na viabilização de novos pontos de entrada para a agregação de dados e espectro, obtendo um melhor uso de espectro na rede.

No estudo do Capítulo 5 propõe-se uma nova visão para o problema RMLSA dinâmico. Observando os resultados do estudo do Capítulo 4, onde a escolha adequada de formato de modulação traz consequências diretas no desempenho das abordagens RSA, propõe-se criar um esquema de modulação adaptativa inovador para a resolução do problema RMLSA, que busca atribuir níveis de modulação adequados, associado a uma quantidade de saltos virtuais necessários para atender as requisições de tráfego. O esquema de modulação adaptativa *AMMS* proposto, observa as deficiências do esquema *mAdap* e a eficiência da estratégia *multihop* para propor um roteamento do tráfego através de múltiplos saltos na topologia virtual, tendo como objetivo atender as requisições de tráfego com níveis de modulação adequados às distâncias percorrida pelas rotas.

Para demonstrar a eficiência do esquema proposto, foram comparados sete algoritmos da literatura e o algoritmo MBM proposto no Capítulo 4 desta dissertação. Uma análise prévia das características de várias topologias de rede foram realizadas para compor os aspectos do esquema de modulação adaptativa proposto. Resultados de simulação, executados em duas topologias de rede, mostraram que o uso do esquema de modulação adaptativa *AMMS* pode proporcionar ganhos de até 85% na taxa de bloqueio de banda para algoritmos que utilizam técnicas de agregação de dados e espectro.

O estudo do Capítulo 4 concluiu que o número de saltos virtuais impacta diretamente no uso da modulação e conseqüentemente na taxa de bloqueio de banda dos algoritmos. Além disso, algoritmos baseados em esquemas de reserva de espectro mostram-se bastante promissores quando a carga de tráfego é baixa e o número de transmissores é suficiente.

O estudo do Capítulo 5 concluiu que esquemas de modulação adaptativa são afetados pela quantidade de transmissores da rede, mostrando que há sempre um compromisso entre o número de transmissores e a quantidades de saltos utilizados na topologia virtual e, conseqüentemente, no uso do nível modulação adequado.

Ambos os estudos apresentados nesta dissertação tiveram como característica principal a busca por soluções eficientes para o problema de roteamento e atribuição de espectro com modulação adaptativa no cenário de tráfego dinâmico. Esse objetivo foi alcançado, tanto pela elaboração de uma nova abordagem para resolver o problema RMLSA, quanto pela busca de uma nova forma de modelar o problema através de um novo esquema de

modulação adaptativa.

6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, propõe-se ajustar melhor as características predeterminadas do esquema de modulação adaptativa *AMMS* tais como: propor uma variação dinâmica dos atributos fixos do esquema; atender requisições de tráfego com níveis de modulação híbridas; levar em consideração métricas como a taxa de fragmentação do enlace para a escolha das rotas na rede; e propor algoritmos RSA/RMLSA que consigam tirar o máximo proveito do esquema de modulação adaptativa *AMMS*.

Referências

- [1] A A M Saleh e Jane M. Simmons. Technology and architecture to enable the explosive growth of the internet. *IEEE Communications Magazine*, 49(1):126–132, January 2011. 1
- [2] Cisco. The Zettabyte Era - Trends and Analysis. Cisco Visual Networking Index (VNI) Forecast, 2015. 1
- [3] I Tomkos, 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. 1, 3, 7, 30, 31, 39, 41
- [4] K. Sato e H. Hasegawa. Optical networking technologies that will create future bandwidth-abundant networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 1(2):A81–A93, July 2009. 1, 16
- [5] R. Essiambre, G. Kramer, P.J. Winzer, G.J. Foschini, e B. Goebel. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4):662–701, Feb 2010. 2
- [6] O. Gerstel, 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. 2, 7, 16, 48, 49
- [7] P. Frascella, N. M. Suibhne, F. C. G. Gunning, S. K. Ibrahim, P. Gunning, e A. D. Ellis. Unrepeatered field transmission of 2 tbit/s multi-banded coherent wdm over 124 km of installed smf. *Optics Express*, 18:24745–24752, 2010. 2
- [8] W. Shieh, H. Bao, e Y. Tang. Coherent optical ofdm: theory and design. *pt. Express*, 16:841–859, 2008. 2, 10, 12, 16
- [9] D. J. Geisler, N. K. Fontaine, R. P. Scott, T. He, L. Paraschis, O. Gerstel, J. P. Heritage, e S. J. B. Yoo. Bandwidth scalable, coherent transmitter based on parallel synthesis of multiple spectral slices. In *2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, 2011. 2
- [10] J. Armstrong. Ofdm for optical communications. *Journal of Lightwave Technology*, 27(3):189–204, Feb 2009. 2, 9, 10, 15

- [11] G. Zhang, 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. 2, 3, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 23, 30, 41, 42, 46, 53
- [12] K. Christodoulopoulos, 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. 2, 3, 14, 18, 23, 24, 27, 29, 30, 44, 53, 57, 63
- [13] Y. Wang, X. Cao, e Y. Pan. A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks. In *2011 Proceedings IEEE INFOCOM*, pages 1503–1511, April 2011. 3, 27, 29, 44
- [14] Yi Zhang, Xiaoping Zheng, Qingshan Li, Nan Hua, Yanhe Li, e Hanyi Zhang. Traffic grooming in spectrum-elastic optical path networks. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3, March 2011. 4, 34, 47, 55, 57, 58
- [15] S. Zhang, 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. 4, 48, 49, 50, 55, 57, 58, 65, 72, 92
- [16] G. Zhang, 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. 4, 34, 37, 48, 49, 55, 56, 57, 58
- [17] Xin Wan, 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. 5, 43, 45, 53, 55, 58, 59, 60, 62, 63, 65, 67, 75, 81, 82, 90, 92, 108, 110
- [18] M. Jinno, 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. 7, 17, 18, 19, 26, 34, 37
- [19] R. W. Chang. Orthogonal frequency multiplex data transmission system. USA U.S. Patent 3,488,445, 1966. 8
- [20] J. Salz e S. B. Weinstein. Fourier transform communication system. In *Proceedings of the First ACM Symposium on Problems in the Optimization of Data Communications Systems*, pages 99–128, New York, NY, USA, 1969. ACM. 8
- [21] A. Peled e A. Ruiz. Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms. In *IEEE International Conference on ICASSP '80. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, volume 5, pages 964–967, Apr 1980. 9
- [22] R. Lassalle e M. Alard. Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers. *EBU Tech. Rev.*, pages 168–190, 1987. 9
- [23] R. Prasad. *OFDM for Wireless Communications Systems*, volume 1. Artech House Universal Personal Communications Series, 2004. 9

- [24] S. Weinstein e P. Ebert. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 19(5):628–634, October 1971. 11
- [25] William Shieh e Ivan Djordjevic. *OFDM for Optical Communications*. Academic Press Elsevier, 2009. 12
- [26] A. Sano, E. Yamada, H. Masuda, E. Yamazaki, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, R. Kudo, K. Ishihara, e Y. Takatori. No-guard-interval coherent optical ofdm for 100-gb/s long-haul wdm transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 27(16):3705–3713, Aug 2009. 13
- [27] William Shieh. Ofdm for flexible high-speed optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 29(10):1560–1577, May 2011. 15
- [28] Chen Chen, Qunbi Zhuge, e David V. Plant. Zero-guard-interval coherent optical ofdm with overlapped frequency-domain cd and pmd equalization. *Opt. Express*, 19(8):7451–7467, Apr 2011. 15
- [29] A. Sano, H. Masuda, E. Yoshida, T. Kobayashi, E. Yamada, Y. Miyamoto, F. Inuzuka, Y. Hibino, Y. Takatori, K. Hagimoto, T. Yamada, e Y. Sakamaki. 30 x 100-gb/s all-optical ofdm transmission over 1300 km smf with 10 roadm nodes. In *2007 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication - Post-Deadline Papers (published 2008)*, pages 1–2, Sept 2007. 15
- [30] A. Nag, 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. 16, 23, 24
- [31] K. Yonenaga, F. Inuzuka, Shuto Yamamoto, H. Takara, B. Koziicki, T. Yoshimatsu, Atsushi Takada, e M. Jinno. Bit-rate-flexible all-optical ofdm transceiver using variable multi-carrier source and dqpsk/dpsk mixed multiplexing. In *OFC 2009. Conference on Optical Fiber Communication - includes post deadline papers*, pages 1–3, March 2009. 18
- [32] B.C. Chatterjee, 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. 18, 25, 36, 40, 53
- [33] M. Jinno, 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. 18, 25
- [34] V. Lopez, 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. In *2013 Future Network and Mobile Summit (FutureNetworkSummit)*, pages 1–9, July 2013. 18

- [35] N. Sambo, 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. 19, 25
- [36] T.A. Strasser e J.L. Wagener. Wavelength-selective switches for roadm applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 16(5):1150–1157, Sept 2010. 19
- [37] N. Amaya, I. Muhammad, G.S. Zervas, R. Nejabati, D. Simeodinou, Y.R. Zhou, e A. Lord. Experimental demonstration of a gridless multi-granular optical network supporting flexible spectrum switching. In *2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, pages 1–3, March 2011. 19, 42
- [38] S. Gringeri, 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. 19
- [39] 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
- [40] M. Jinno, 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. 21, 22, 23, 24, 43
- [41] A. Bocoli, M. Schuster, Franz Rambach, M. Kiese, C.-A. Bunge, e B. Spinnler. Reach-dependent capacity in optical networks enabled by ofdm. In *Conference on Optical Fiber Communication (OFC) - includes post deadline papers*, pages 1–3, March 2009. 23, 63
- [42] A. Klekamp, O. Rival, A. Morea, Roman Dischler, e F. Buchali. Transparent wdm network with bitrate tunable optical ofdm transponders. In *Conference on Optical Fiber Communication (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3, March 2010. 23, 43
- [43] Xiang Liu, 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. 23, 43
- [44] Xin Wan, Lei Wang, Nan Hua, Hanyi Zhang, e Xiaoping Zheng. Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3, March 2011. 23, 30, 44, 45, 53, 57, 60, 63, 92

- [45] C.E. Shannon. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IEEE*, 86(2):447–457, Feb 1998. 24
- [46] Fuqin Xiong. *Digital Modulation Techniques, Second Edition (Artech House Telecommunications Library)*. Artech House, Inc., Norwood, MA, USA, 2006. 24
- [47] Hui Ding, 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. 24, 43
- [48] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, e E.A. Varvarigos. Routing and spectrum allocation in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation. In *2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, pages 1–6, Dec 2010. 26
- [49] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, e Clifford Stein. *Introduction to Algorithms*. The MIT Press, 2 edition, 2001. 27, 29
- [50] I. Chlamtac, A. Ganz, e G. Karmi. Lightpath communications: an approach to high bandwidth optical wan’s. *IEEE Transactions on Communications*, 40(7):1171–1182, Jul 1992. 28
- [51] M. Klinkowski e K. Walkowiak. Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network. *IEEE Communications Letters*, 15(8):884–886, August 2011. 30, 44, 45
- [52] A. Rosa, C. Cavdar, S. Carvalho, J. Costa, e L. Wosinska. Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. In *2012 9th International Conference on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET)*, pages 242–246, Dec 2012. 31, 32, 33, 47
- [53] AN. Patel, P.N. Ji, J.P. Jue, e Ting Wang. Defragmentation of transparent flexible optical wdm (fwdm) networks. In *2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, pages 1–3, March 2011. 32, 46
- [54] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, A. Hirano, e M. Jinno. Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation. In *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2011. 32, 46
- [55] F. Cugini, M. Secondini, N. Sambo, G. Bottari, G. Bruno, P. Iovanna, e P. Castoldi. Push-pull technique for defragmentation in flexible optical networks. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3, March 2012. 32, 46
- [56] F. Cugini, F. Paolucci, G. Meloni, G. Berrettini, M. Secondini, F. Fresi, N. Sambo, L. Poti, e P. Castoldi. Push-pull defragmentation without traffic disruption in flexible grid optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(1):125–133, Jan 2013. 32, 46

- [57] R. Proietti, Runxiang Yu, Ke Wen, Yawei Yin, e S.J.B. Yoo. Quasi-hitless defragmentation technique in elastic optical networks by a coherent rx lo with fast tx wavelength tracking. In *2012 International Conference on Photonics in Switching (PS)*, pages 1–3, Sept 2012. 32, 47
- [58] André K. Horota, 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. 32, 33, 47
- [59] B. Kozicki, H. Takara, T. Yoshimatsu, K. Yonenaga, e M. Jinno. Filtering characteristics of highly-spectrum efficient spectrum-sliced elastic optical path (slice) network. In *OFC 2009. Conference on Optical Fiber Communication - includes post deadline papers*, pages 1–3, March 2009. 35, 43
- [60] Roman Dischler, F. Buchali, e A. Klekamp. Demonstration of bit rate variable roadm functionality on an optical ofdm superchannel. In *2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3, March 2010. 35
- [61] E. Le Rouzic, P. Gavignet, B. Arzur, e N. Brochier. Future optical core networks for novel applications. In *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2011. 35
- [62] Jiawei Zhang, Yongli Zhao, Xiaosong Yu, Jie Zhang, e B. Mukherjee. Auxiliary graph model for dynamic traffic grooming in elastic optical networks with sliceable optical transponder. In *2014 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2014. 36, 49, 50
- [63] J. Zhang, 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*, PP(99):1–1, 2015. 36, 49, 50, 55, 57, 58, 65, 92
- [64] Jiawei Zhang, 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. 37, 39, 52
- [65] Keyao Zhu e B. Mukherjee. Traffic grooming in an optical wdm mesh network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(1):122–133, Jan 2002. 38
- [66] J.L. Vizcaino, Yabin Ye, V. Lopez, F. Jimenez, R. Duque, e P.M. Krummrich. Cost evaluation for flexible-grid optical networks. In *2012 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 358–363, Dec 2012. 39
- [67] K. Christodoulopoulos, M. Angelou, D. Klonidis, P. Zakyntinos, E. Varvarigos, e I. Tomkos. Value analysis methodology for flexible optical networks. In *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2011. 39, 51

- [68] O. Pedrola, A. Castro, L. Velasco, M. Ruiz, J.P. Fernandez-Palacios, e D. Careglio. Capex study for a multilayer ip/mppls-over-flexgrid optical network. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(8):639–650, Aug 2012. 39, 51
- [69] A. Bocoli, M. Schuster, F. Rambach, D.A. Schupke, C.-A. Bunge, e B. Spinnler. Cost comparison of networks using traditional 10 and 40 gb/s transponders versus ofdm transponders. In *OFC/NFOEC 2008. Conference on Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3, Feb 2008. 39, 51
- [70] E. Palkopoulou, M. Angelou, D. Klonidis, K. Christodoulopoulos, A. Klekamp, F. Buchali, E. Varvarigos, e I. Tomkos. Quantifying spectrum, cost, and energy efficiency in fixed-grid and flex-grid networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(11):B42–B51, Nov 2012. 40, 51
- [71] J. Lopez, Yabin Ye, V. Lopez, F. Jimenez, R. Duque, e P.M. Krummrich. On the energy efficiency of survivable optical transport networks with flexible-grid. In *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2012. 40, 52
- [72] Eric Bouillet, Georgios Ellinas, Jean-Francois Labourdette, e Ramu Ramamurthy. *Path Routing in Mesh Optical Networks*. Online Library Wiley, 2007. 40
- [73] Y. Sone, 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. In *OFC 2009. Conference on Optical Fiber Communication - includes post deadline papers*, pages 1–3, March 2009. 40, 50
- [74] Menglin Liu, M. Tornatore, e B. Mukherjee. Survivable traffic grooming in elastic optical networks - shared protection. *Journal of Lightwave Technology*, 31(6):903–909, March 2013. 40, 51
- [75] Lu Ruan 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. 40, 51
- [76] K. Christodoulopoulos, I Tomkos, e E. Varvarigos. Dynamic bandwidth allocation in flexible ofdm-based networks. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3, March 2011. 42
- [77] B. Kozicki, H. Takara, Yukio Tsukishima, T. Yoshimatsu, Takayuki Kobayashi, K. Yonenaga, e M. Jinno. Optical path aggregation for 1-tb/s transmission in spectrum-sliced elastic optical path network. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22(17):1315–1317, Sept 2010. 42
- [78] H. Takara, B. Kozicki, Y. Sone, T. Tanaka, A. Watanabe, A. Hirano, K. Yonenaga, e M. Jinno. Distance-adaptive super-wavelength routing in elastic optical path

- network (slice) with optical ofdm. In *2010 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2010. 42
- [79] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, T. Yoshimatsu, T. Kobayashi, Y. Miyamoto, K. Yonenaga, A. Takada, O. Ishida, e S. Matsuoka. Demonstration of novel spectrum-efficient elastic optical path network with per-channel variable capacity of 40 gb/s to over 400 gb/s. In *ECOC 2008. 34th European Conference on Optical Communication*, pages 1–2, Sept 2008. 42
- [80] R. Ryf, Y. Su, L. Moller, S. Chandrasekhar, D.T. Neilson, e C.R. Giles. Data rate and channel spacing flexible wavelength blocking filter. In *OFC 2004 Optical Fiber Communication Conference*, volume 2, pages 3 pp. vol.2–, Feb 2004. 43
- [81] R. Ryf, Yikai Su, L. Moller, S. Chandrasekhar, Xiang Liu, D.T. Neilson, e C.R. Giles. Wavelength blocking filter with flexible data rates and channel spacing. *Journal of Lightwave Technology*, 23(1):54–61, Jan 2005. 43
- [82] Gangxiang Shen e Qi Yang. From coarse grid to mini-grid to gridless: How much can gridless help contentionless? In *2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, pages 1–3, March 2011. 43
- [83] Xi Wang, Qiong Zhang, Inwoong Kim, P. Palacharla, e M. Sekiya. Blocking performance in dynamic flexible grid optical networks - what is the ideal spectrum granularity? In *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2011. 43
- [84] Qi Yang, William Shieh, e Y. Ma. Bit and power loading for coherent optical ofdm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20(15):1305–1307, Aug 2008. 43
- [85] Jin Y. Yen. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, 17(11):712–716, 1971. 44, 62, 84
- [86] Xiang Zhou, Wei Lu, Long Gong, e Zuqing Zhu. Dynamic rmsa in elastic optical networks with an adaptive genetic algorithm. In *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 2912–2917, Dec 2012. 45, 55, 57, 58
- [87] T. Hashimoto, K.-i. Baba, e S. Simojo. A study on routing, modulation level, and spectrum allocation algorithms for elastic optical path networks. In *2012 IEEE 3rd International Conference on Photonics (ICP)*, pages 395–399, Oct 2012. 45, 55, 57, 58
- [88] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, B. Kozicki, A. Hirano, e M. Jinno. Dynamic routing and frequency slot assignment for elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3, March 2011. 45, 47, 53

- [89] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, T. Tanaka, B. Kozicki, Y. Sone, e M. Jinno. Algorithms for maximizing spectrum efficiency in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation. In *2010 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2010. 45, 53
- [90] M. Klinkowski, K. Walkowiak, e M. Jaworski. Off-line algorithms for routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. In *2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–6, June 2011. 45, 55, 57, 58
- [91] H. Beyranvand e J.A. Salehi. A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(18):3043–3054, Sept 2013. 45
- [92] Xiaosong Yu, Jie Zhang, Yongli Zhao, Tiantian Peng, Yun Bai, Dangjiang Wang, e Xuefeng Lin. Spectrum compactness based defragmentation in flexible bandwidth optical networks. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3, March 2012. 46
- [93] Xi Wang, Inwoong Kim, Qiong Zhang, P. Palacharla, e M. Sekiya. A hitless defragmentation method for self-optimizing flexible grid optical networks. In *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2012. 46
- [94] Rui Wang e B. Mukherjee. Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks. In *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 2907–2911, Dec 2012. 47
- [95] W. Fadini e E. Oki. A subcarrier-slot partition scheme for wavelength assignment in elastic optical networks. In *2014 IEEE 15th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, pages 7–12, July 2014. 47
- [96] C. Rottondi, M. Tornatore, A. Pattavina, e G. Gavioli. Routing, modulation level, and spectrum assignment in optical metro ring networks using elastic transceivers. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 5(4):305–315, April 2013. 48, 55, 57, 58
- [97] O. A. Gerstel. Flexible use of spectrum and photonic grooming. In *Silicon and Nanophotonics and Photonics in Switching Integrated Photonics Research*. OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America), paper PMD3, 2010. 48
- [98] Zilong Ye, A.N. Patel, P.N. Ji, e Chunming Qiao. Distance-adaptive and fragmentation-aware optical traffic grooming in flexible grid optical networks. In *2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology*, pages 355–356, July 2014. 49, 55, 56, 57, 58, 59, 82
- [99] Xiaosong Yu, Yongli Zhao, e Jie Zhang. Optical grooming with spectrum engineering (og-se) in flexi-grid networks. In *2014 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3, March 2014. 49, 55, 57, 58

- [100] P. S. Khodashenas, J. Comellas, S. Spadaro, e J. Perelló. Dynamic source aggregation of sub-wavelength connections in elastic optical networks. *Photonic Network Communications*, 26:2–3, 2013. 49, 55, 57, 58, 60, 65, 92
- [101] A.N. Patel, P.N. Ji, J.P. Jue, e Ting Wang. Survivable transparent flexible optical wdm (fwdm) networks. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pages 1–3, March 2011. 51
- [102] Lei Liu, T. Tsuritani, I. Morita, R. Casellas, R. Martinez, e R. Munoz. Control plane techniques for elastic optical networks: Gmpls/pce vs openflow. In *2012 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 352–357, Dec 2012. 52
- [103] L. Liu, Wei-Ren Peng, R. Casellas, T. Tsuritani, I. Morita, R. Martinez, R. Munoz, M. Suzuki, e S.J. Yoo. Dynamic openflow-based lightpath restoration in elastic optical networks on the geni testbed. *Journal of Lightwave Technology*, PP(99):1–1, 2015. 52
- [104] Cen Chen, Xiaoliang Chen, Shoujiang Ma, e Zuqing Zhu. Openflow-controlled online spectrum defragmentation in software-defined elastic optical networks. In *2014 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, pages 1–4, Nov 2014. 52
- [105] Ke Wen, Xinran Cai, Yawei Yin, D.J. Geisler, R. Proietti, R.P. Scott, N.K. Fontaine, e S.J.B. Yoo. Adaptive spectrum control and management in elastic optical networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(1):39–48, January 2013. 52
- [106] Jiawei Zhang, Jie Zhang, Yongli Zhao, Hui Yang, Xiaosong Yu, Lei Wang, e Xihua Fu. Experimental setup for openflow-based elastic lightpath provisioning in flexi-grid optical networks. In *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC)*, pages 1–3, Sept 2012. 53
- [107] Shoujiang Ma, Cen Chen, Shengru Li, Mingyang Zhang, Suoheng Li, Yan Shao, Zuqing Zhu, Lei Liu, e S.J.B. Yoo. Demonstration of online spectrum defragmentation enabled by openflow in software-defined elastic optical networks. In *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3, March 2014. 53