



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

# Avaliação de Desempenho de Métricas de Fragmentação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas

Kaio Alexandre da Silva

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
conclusão do Mestrado em Informática

Orientador  
Prof. Dr. André Costa Drummond

Brasília  
2018

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

SSI586a Silva, Kaio Alexandre da  
Avaliação de Desempenho de Métricas de Fragmentação de  
Espectro em Redes Ópticas Elásticas / Kaio Alexandre da  
Silva; orientador André Costa Drummond. -- Brasília, 2018.  
80 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Informática) --  
Universidade de Brasília, 2018.

1. Fragmentação de Espectro. 2. Redes Ópticas Elásticas.  
3. Métricas de Fragmentação de Espectro. 4. Avaliação de  
Desempenho. 5. RSA. I. Drummond, André Costa, orient. II.  
Título.



# Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai, Marcos da Silva, e a minha mãe, Ana Luiza Gonçalves da Silva, que me apoiaram ao longo dessa jornada.

Dedico aos colegas do Grupo de Pesquisa em Engenharia de Tráfego em Redes Ópticas que contribuíram com meu crescimento até o presente momento.

Dedico ao meu primeiro orientador da graduação, professor Michel da Silva, que me apoio durante toda a fase acadêmica, me possibilitando a chegar aqui.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao professor André Costa Drummond por ter me recebido no programa de pós-graduação, me orientado e por sempre me mostrar que posso fazer melhor. Agradeço aos meus pais, Marcos e Ana Luiza, por me apoiarem e não me deixarem desistir deste sonho. Aos professores de informática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - *campus* Porto Velho Calama pelo apoio prestado diretamente e indiretamente. Agradeço a minha namorada, Yasmayara, por todo apoio, paciência e compreensão nos momentos difíceis.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - *campus* Porto Velho Calama por disponibilizar a infra-estrutura do Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (Sala IFRO-CIMNE).

Aos amigos Lucas Costa Rodrigues, Paulo Júnior e Ítalo Barbosa, por me ajudarem e compartilharem seus conhecimentos.

A Isangela de Souza Duarte, Rodrigo Moreira e Marcos Aparecido, por me ajudarem a finalizar essa etapa da minha formação.

# Resumo

O crescimento emergente do tráfego da Internet e a necessidade do aumento no desempenho das tecnologias de transmissão em fibra óptica fazem com que a rigidez das tecnologias de redes Wavelength Division Multiplexing (WDM) tradicionais não acomode as novas demandas, pois impõe taxas fixas para as transmissões, o que leva a redução da eficiência na utilização dos recursos da rede. O conceito de Elastic Optical Network (EON) surge como solução na literatura, por prover taxas de transmissões flexíveis que se adaptam às demandas. Nas Redes Ópticas Elásticas, Elastic Optical Network (EON), caminhos ópticos podem ser estabelecidos no momento da chegada de uma requisição ajustando-se da melhor forma à capacidade requerida, o que leva a criação de canais com largura de banda variada na rede. O processo de chegadas e partidas de requisições gera a fragmentação do espectro disponível, o que leva a uma distribuição não contínua de porções ociosas do espectro, resultando na diminuição das oportunidades de reutilização dos recursos de transmissão da rede. Esta dissertação discute o conceito de fragmentação de espectro em EON, apresenta e analisa as métricas propostas na literatura a fim de realizar a mensuração da fragmentação de espectro. Por fim, apresenta os resultados do estudo de avaliação de desempenho sobre a efetividade das mesmas em realizar a mensuração da fragmentação de espectro na EON.

**Palavras-chave:** Fragmentação de Espectro, Redes Ópticas Elásticas, Métricas de Fragmentação de Espectro, Avaliação de Desempenho, RSA

# Abstract

The emerging growth of Internet traffic and the need for increased performance of fiber-optic transmission technologies mean that the rigidity of traditional Wavelength Division Multiplexing (WDM) networks does not accommodate the new demands as it imposes fixed charges for transmissions, which leads to reduced efficiency in the use of network resources. The concept of Elastic Optical Network (EON) emerges as a solution in the literature, by providing flexible transmission rates that adapt to the demands. In optical elastic networks, optical paths can be established at the moment of arrival of a request, adjusting itself to the required capacity, which leads to the creation of channels with varied bandwidth in the network. The process of arrival and departure of requests generates the fragmentation of the available spectrum, which leads to a non-continuous distribution of idle portions of the spectrum, resulting in a decrease in the opportunities for re-use of network transmission resources. This dissertation discusses the concept of spectrum fragmentation in EON, presents and analyzes the metrics proposed in the literature in order to perform the measurement of spectrum fragmentation. Finally, it presents the results of the performance evaluation study on their effectiveness in performing the measurement of spectrum fragmentation in the EON.

**Keywords:** Spectral Fragmentation, Elastic Optical Networks, Spectrum Fragmentation Metrics, performance evaluation, RSA

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	4
1.2	Objetivos . . . . .	5
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	5
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	5
1.3	Organização do Documento . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Redes Ópticas Elásticas</b>	<b>6</b>
2.1	Princípio da Optical-OFDM . . . . .	7
2.2	Sistema OFDM . . . . .	9
2.3	Vantagens e Desvantagens da Optical-OFDM . . . . .	11
2.4	Optical-OFDM . . . . .	12
2.5	Arquitetura da rede EON . . . . .	13
2.5.1	<i>Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects</i> BV-WXC . . . . .	13
2.5.2	<i>Bandwidth-Variable Transponder</i> BVT . . . . .	16
2.6	Representação do Espectro . . . . .	17
2.7	Formato de Modulação e Distância Adaptativa . . . . .	18
2.8	<i>Routing and Spectrum Assignment (RSA) &amp; Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment (RMLSA)</i> . . . . .	20
2.8.1	Complexidade do RSA . . . . .	21
2.8.2	Definição do Problema SRA . . . . .	22
2.8.3	Teorema 1: O Problema SRA é NP-Completo . . . . .	22
2.9	Tráfego Estático e Dinâmico . . . . .	23
2.10	Fragmentação de Espectro . . . . .	23
2.10.1	Técnicas de desfragmentação . . . . .	24
2.10.2	Políticas de Alocação de Espectro . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Fragmentação em Redes Ópticas Elásticas</b>	<b>28</b>
3.1	Contexto clássico da fragmentação em ciências da computação . . . . .	28



3.2	Fragmentação em <i>Elastic Optical Network (EON)</i> . . . . .	31
3.3	Notação Geral . . . . .	40
3.4	Métricas que quantificam a fragmentação de espectro geral na EON . . . . .	41
3.4.1	Ciente do Maior Bloco de <i>slots</i> . . . . .	43
3.4.2	Ciente dos Recursos disponíveis . . . . .	44
3.4.3	Ciente da Entropia . . . . .	45
3.5	Métricas que quantificam a fragmentação de espectro no caminho óptico . . . . .	46
3.5.1	Ciente da Demanda . . . . .	47
3.5.2	Consideram Apenas os Recursos Disponíveis . . . . .	49
3.6	Resumo Conclusivo . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Avaliação de Desempenho das Métricas de Fragmentação de Espectro</b>	<b>51</b>
4.1	Metodologia para Avaliação de Desempenho . . . . .	52
4.2	Resultados de Simulação . . . . .	54
4.2.1	Banda de Guarda e Granularidades . . . . .	54
4.2.2	Políticas de Alocação de Espectro . . . . .	61
4.2.3	Métricas de Fragmentação de Espectro Geral na EON . . . . .	63
4.2.4	Métricas de Fragmentação de Espectro Geral Aplicadas no Caminho . . . . .	66
4.2.5	Métricas de Fragmentação de Espectro no Caminho Óptico . . . . .	68
4.3	Resumo Conclusivo . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Considerações Finais e Trabalhos Futuros</b>	<b>72</b>
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	75
	<b>Referências</b>	<b>77</b>

# Lista de Figuras

1.1	Demonstração de canais de transmissão com grade fixa para rede WDM. . .	1
1.2	Comparação entre canais de transmissão com grade fixa e flexível. . . . .	3
2.1	Diferenças entre a alocação de canais ópticos em WDM e EON. . . . .	7
2.2	Domínio do tempo por símbolos Optical-OFDM. . . . .	8
2.3	Exemplo de banda de guarda. . . . .	8
2.4	Diagrama de funcionamento. . . . .	11
2.5	Classificação do Optical-OFDM. . . . .	12
2.6	Arquitetura Optical-OFDM com a utilização de BVT e BV-WXC. . . . .	14
2.7	Representação do Bandwidth-Variable Spectrum-Selective Switch (BV-SSS). . . . .	14
2.8	Arquiteturas do BV-WXC . . . . .	15
2.9	Utilização de subportadoras. . . . .	16
2.10	Funcionamento do BVT e do SBVT. . . . .	17
2.11	Abordagens de representação dos <i>slots</i> . . . . .	17
2.12	Representação da alocação de espectro com subportadoras representadas por <i>slots</i> . . . . .	18
2.13	Relação entre modulação e alcance. . . . .	20
2.14	Exemplo de Alocação de caminhos. . . . .	21
2.15	Técnicas de desfragmentação. . . . .	25
2.16	Comportamento das políticas de alocação de espectro para uma demanda de dois <i>slots</i> . . . . .	27
3.1	Exemplo de fragmentação em memória. . . . .	29
3.2	Alocação com a política <i>First-Fit</i> . . . . .	30
3.3	Alocação com a política <i>Exact-Fit</i> . . . . .	30
3.4	Diferença entre a utilização de memória e utilização de espectro. . . . .	32
3.5	Exemplo de topologia. . . . .	33
3.6	Utilização do espectro por <i>enlace</i> . . . . .	34
3.7	Ocupação dos <i>slots</i> nas rotas candidatas para a requisição com origem no nó 1 e destino no nó 4. . . . .	35

3.8	Utilização do espectro por <i>enlace</i> . . . . .	37
3.9	Utilização do espectro por <i>enlace</i> . . . . .	40
3.10	Mesclagem dos <i>enlaces</i> que compõem a rota. . . . .	41
3.11	Rede de exemplo com a utilização do espectro. . . . .	42
4.1	Topologia NSFNET. . . . .	53
4.2	Topologia USANET. . . . .	53
4.3	Topologia PanEuro. . . . .	54
4.4	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	55
4.5	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de dois <i>slots</i> . . . . .	55
4.6	Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	56
4.7	Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de dois <i>slots</i> . . . . .	56
4.8	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	57
4.9	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de dois <i>slots</i> . . . . .	57
4.10	Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	58
4.11	Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de dois <i>slots</i> . . . . .	58
4.12	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	59
4.13	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de dois <i>slots</i> . . . . .	59
4.14	Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	60
4.15	Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de dois <i>slots</i> . . . . .	60
4.16	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	61
4.17	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	62
4.18	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	62
4.19	Estratégia da predição de fragmentação de espectro geral na EON. . . . .	63
4.20	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	64
4.21	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	65
4.22	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	65
4.23	Estratégia: Ciente da fragmentação de espectro no caminho com as métricas de fragmentação de espectro geral. . . . .	66
4.24	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	67
4.25	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	67
4.26	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	68
4.27	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	69
4.28	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	70
4.29	Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um <i>slot</i> . . . . .	70

# Lista de Tabelas

2.1 Relação da capacidade do canal e alcance de cada modulação para um <i>slot</i> de 12,5 GHz . . . . .	20
--	----

# Lista de Abreviaturas e Siglas

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

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

**BVT** Bandwidth-Variable Transponder.

**CIC** Departamento de Ciência da Computação.

**CP** Prefixo Cíclico.

**DFT** Discrete Fourier transform.

**ENE** Departamento de Engenharia Elétrica.

**EON** Elastic Optical Network.

**FDM** Frequency Division Multiplexing.

**GB** Guard Band.

**GI** Guard Interval.

**ICI** Inter-Carrier Interference.

**IDFT** Inverse Discrete Fourier Transform.

**ISI** Inter-Symbol Interference.

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

**KSP** K-Shortest Path.

**LPF** Low-Pass Filter.

**LTE** Long Term Evolution.

**MCM** Multi-Carrier Modulation.

**OFDM** Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.

**OSNR** Optical Signal-to-Noise Ratio.

**PAPR** Peak to Average Power Ratio.

**PLI** Programação Linear Inteira.

**PSK** Phase Shift Keying.

**QAM** Quadrature Amplitude Modulation.

**QoT** Quality of Transmission.

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

**RSA** Routing and Spectrum Assignment.

**SBVT** Sliceable Bandwidth-Variable Transponder.

**SLE** Static Lightpath Establishment.

**SNR** Signal-to-Noise Ratio.

**SP** Shortest Path.

**SRA** Static Spectrum Allocation.

**UnB** Universidade de Brasília.

**WDM** Wavelength Division Multiplexing.

**WRN** Wavelength Routed Network.

**WSS** Wavelength-Selective Switch.

# Capítulo 1

## Introdução

O novo perfil de consumo dos serviços disponíveis na *Internet*, tais como aplicações de fluxo multimídia, transmissões de alta definição de vídeo, computação em nuvem e aplicações de rede em tempo real fizeram com que o tráfego de dados nas redes de transmissão crescesse de forma exponencial nos últimos anos e as previsões indicam que este crescimento continuará [1].

As redes ópticas baseadas na tecnologia de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM) utilizam canais de comunicação por comprimento de onda e possuem altas taxas de transmissão de *bits*, como 10 Gb/s, 40 Gb/s e 100 Gb/s. Cada comprimento de onda deve possuir um espaçamento de 50 GHz ou 100 GHz [2] evitando, assim, a colisão ou interferência entre os mesmos [3], porém com um espaçamento relativamente grande entre dois canais de comunicação [2]. Por tratar de comprimentos de onda com tamanho fixo, a transmissão de granularidades diferentes é um problema constante em WDM [4]. Além de que cada canal de transmissão possui o mesmo tamanho, independente da taxa de dados que está sendo transmitida, gerando um desperdício na utilização do espectro da fibra. A imagem Figura 1.1 apresenta a utilização da grade fixa pela tecnologia WDM [5].

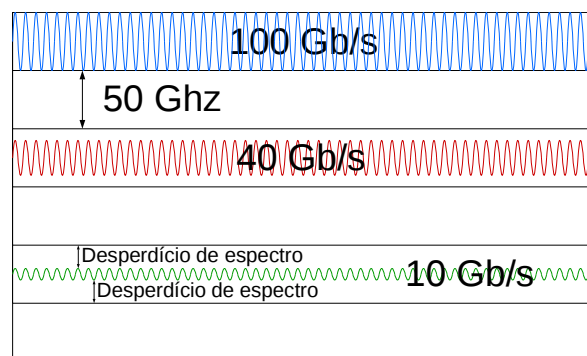


Figura 1.1: Demonstração de canais de transmissão com grade fixa para rede WDM.

As Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Network* - EON) surgem como uma solução para substituir a WDM [6]. A tecnologia WDM fornece comprimentos de ondas com alta taxa de *bits*, porém, esses comprimentos de ondas têm uma rigidez na taxa de transmissão, o que dificulta transmitir taxas mais altas de *bits* por longas distâncias [4]. Além disso, a utilização eficiente dos recursos é um requisito fundamental que deve ser seguido pela rede de transporte sob pena de degradação do uso espectral da fibra, o que pode resultar em uma alta probabilidade de bloqueio da demanda requisitada. [4]. A EON surge como uma solução para os mais variados tipos de demanda de tráfego, como fluxo de vídeo e transmissões de ultra definição para televisão [5], tendo a capacidade de diminuir a diferença entre a granularidade da demanda do cliente e a largura de banda provida nos canais de transmissão na rede de transporte [4].

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.

A Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) é uma classe especial do esquema de modulação de portadoras múltiplas (Multi-Carrier Modulation (MCM)) que transmite dados a uma alta velocidade e os divide em canais ortogonais (subportadoras) de baixa velocidade de dados [2]. 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 Long Term Evolution (LTE), a tecnologia OFDM foi amplamente adotada na literatura sobre EON [7].

Optical-OFDM é a tecnologia que permite alcançar a eficiência dos recursos espectrais ópticos por meio de da formação de supercanais, os quais consistem na união de subcanais e 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.

A EON se utiliza de recursos do espectro da fibra óptica, que são divididos adaptativamente para atender a largura de banda que as requisições necessitam, gerando canais de comunicação com comprimentos variados e exatos de acordo com as necessidades do fluxo de transmissão [4] e [2]. Para isso, a EON se utiliza de tecnologias como a *Optical-Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)* e modulações avançadas que melhoraram a eficiência espectral da rede e sua flexibilidade. Com isso, ao invés de ter o espectro dividido por comprimentos de ondas, tem-se o espectro dividido por *slots* de frequência estreitas, garantindo uma utilização eficiente dos recursos da rede em comparação com a WDM, como mostrado na Figura 1.2 [6, 8, 2].



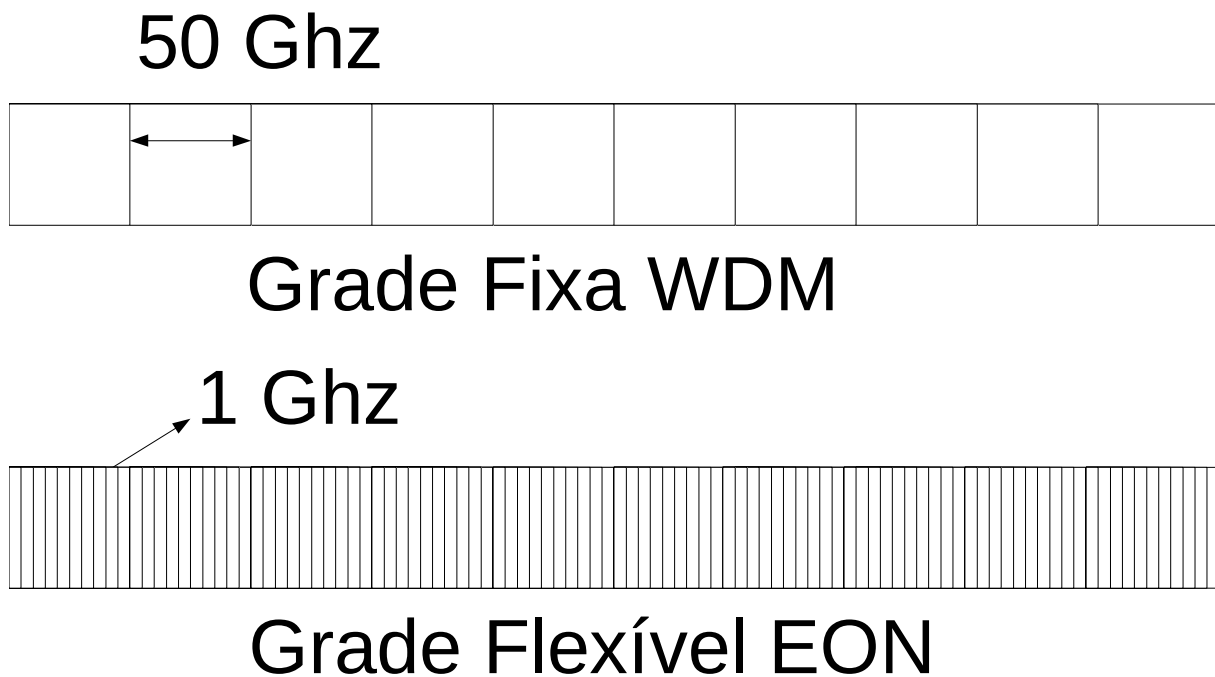


Figura 1.2: Comparação entre canais de transmissão com grade fixa e flexível.

A EON traz características como segmentação da largura de banda, agregação da largura de banda, acomodação eficiente de múltiplas taxas de dados, variação elástica dos recursos alocados, alcance adaptativo de acordo com a modulação, economia de energia e virtualização da rede [2]. Embora a EON apresente muitas vantagens, também surgem novos desafios. Em EON, a atribuição de caminhos ópticos em um cenário dinâmico pode resultar em alocações de canais com tamanhos variados e sua remoção gera a distribuição de fragmentos não contínuos no espectro, gerando um aumento na probabilidade de rejeitar uma requisição, mesmo que tenham *slots* sobrando na composição do *enlace*, resultando na premissa de quanto maior a fragmentação, maior será a probabilidade de bloquear uma requisição [9, 10].

Esse problema em EON é chamado de Roteamento e Atribuição de Espectro, *Routing and Spectrum Assignment (RSA)*, o qual propõe a alocação do espectro em uma rota que esteja de acordo com as restrições de continuidade e contiguidade de *slots*. Com a flexibilização da modulação, o problema torna-se o Roteamento e Atribuição de Espectro e Nível de Modulação, *Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment (RMLSA)*, o qual deve seguir as restrições de continuidade e contiguidade de *slots* utilizando modulação adaptativa. Ambos levam ao problema da fragmentação de espectro, que é semelhante ao problema de fragmentação de memória em arquitetura de computadores, o qual à medida que são alocados e liberados espaços dos blocos de memória, os espaços livres da memória

tornam-se fragmentados em pequenas partes, não permitindo assim a alocação de blocos maiores que os tamanhos dos espaços livres disponíveis.

## 1.1 Motivação

A EON surge como uma proposta capaz de diminuir o desperdício de espectro que a tecnologia WDM impõe. Para isto o espectro é dividido adaptativamente para atender de forma ideal as requisições de banda, gerando canais com largura variável de acordo com as necessidades dos fluxos que devem ser transmitidos. Essa evolução se faz necessária, pois com o rápido crescimento do tráfego da *Internet* e a difusão cada vez maior de aplicações de fluxo multimídia, transmissão de alta definição de vídeo, computação em nuvem e aplicações de rede em tempo real, exige-se uma tecnologia de transmissão de fibra óptica mais rápida, flexível e escalável que possa aproveitar de forma eficiente os recursos disponíveis da rede.

A EON emerge como uma forte aposta para o futuro, por prover caminhos ópticos que podem contrair-se ou expandir-se para acomodar o fluxo requisitado, sendo possíveis taxas de transmissão de 400 Gb/s ou 1 Tb/s sob diversos formatos de modulação [2].

Em virtude da EON ser considerada como a próxima geração de redes para transmissão de dados em fibras ópticas [11], este documento propõe um estudo a respeito do problema da fragmentação de espectro em redes ópticas elásticas, proporcionando uma visão das métricas que foram propostas na literatura, com o objetivo de tratar sobre a efetividade das métricas em quantificar a fragmentação de espectro e comprovar a premissa acerca do problema de fragmentação. O problema da fragmentação de espectro que aparece em cenários dinâmicos faz com que o problema RSA seja considerado *NP-Hard* [2]. Por este fato, quantificar a fragmentação não se torna uma atividade trivial.

Uma boa métrica de fragmentação deve ser capaz de expressar a correlação entre a taxa de fragmentação da rede e a taxa de bloqueio, demonstrando o aumento desta conforme a fragmentação da rede aumenta. De forma que à medida que se consiga diminuir a taxa de fragmentação da rede, a taxa de bloqueio também seja diminuída.

Retratar uma métrica que efetivamente possa estabelecer a correlação entre taxa de fragmentação de espectro e taxa de bloqueio de banda pode estabelecer um novo paradigma para o desenvolvimento de algoritmos de roteamento, podendo assim maximizar a utilização dos recursos da rede EON.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a efetividade do uso das métricas de fragmentação de espectro propostas na literatura, na solução do problema de Routing and Spectrum Assignment (RSA) em redes Elastic Optical Network (EON).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar e analisar as métricas de fragmentação de espectro para EON presentes na literatura;
- Propor a classificação das métricas de fragmentação de espectro;
- Avaliar o desempenho das métricas de fragmentação de espectro presentes na literatura.

## 1.3 Organização do Documento

O restante deste documento está organizado da seguinte forma: Capítulo 2, descreve os fundamentos da arquitetura das redes ópticas elásticas. Capítulo 3, aborda a fragmentação em EON, a revisão e análise da literatura a respeito das métricas de fragmentação de espectro para redes ópticas elásticas. Capítulo 4, apresenta a proposta deste trabalho e os resultados obtidos na avaliação de desempenho. O Capítulo 5, traz as considerações finais e trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

## Capítulo 2

# Redes Ópticas Elásticas

Este capítulo apresenta os conceitos básicos das redes Elastic Optical Network (EON) baseadas em multiplexação *Optical-Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)* para melhor compreensão deste trabalho.

O padrão de canais de transmissão estabelecido pela *International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)* baseia-se no uso de grades de frequência de tamanho fixo, operando geralmente com granularidades de 50 GHz por comprimento de onda para a acomodação das conexões [8]. Neste padrão, para cada demanda de tráfego uma grade inteira precisa ser alocada para sua acomodação, mesmo que ela seja inferior a capacidade do canal, provocando o desperdício dos recursos espectrais. Caso a demanda seja maior que a capacidade do canal, a mesma é separada e transmitida por canais distintos, tendo então transmissões distintas.

A partir da limitação do uso eficiente do espectro e das taxas de transmissão fixas, 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 requisitadas [5].

A EON baseada em *Optical-OFDM* possui 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, podendo alocar um canal óptico de tamanho variado sendo expandido ou contraído de acordo com a necessidade das novas demandas de conexão, conseguindo assim um canal de tamanho mais apropriado para cada demanda [12].

A Figura 2.1 [5] apresenta as diferenças entre os canais 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 da modulação pode chegar a taxa de transferência de até 100 Gb/s. Obtendo desperdício de espectro para cada requisição menor que 100 Gb/s. Por outro lado, o canal

com grade flexível, utilizado na rede EON, oferece o recurso de adaptar sua capacidade de transmissão, permitindo a alocação de espectro conforme a demanda do tráfego.

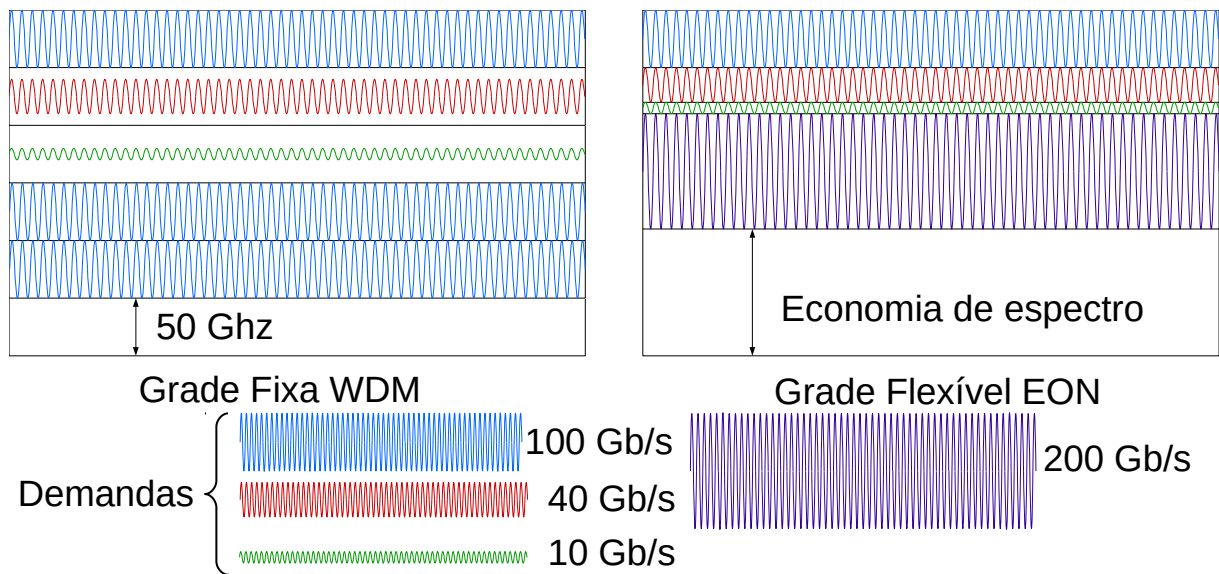


Figura 2.1: Diferenças entre a alocação de canais ópticos em WDM e EON.

## 2.1 Princípio da Optical-OFDM

A tecnologia que permite que os canais ópticos da rede EON tenham a capacidade de se ajustar conforme a demanda do tráfego requisitado é o *Optical-Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)*. A técnica de transmissão Optical-OFDM surgiu como uma evolução da convencional técnica de Multiplexação por Divisão de Frequência, Frequency Division Multiplexing (FDM), a Optical-OFDM ao invés de utilizar bandas de guarda para a separação das subportadoras na recepção do sinal, utiliza uma sobreposição espectral de subportadoras [2, 6, 13].

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 outras subportadoras do canal, não interferindo portanto na comunicação. A ortogonalidade leva ao uso mais eficiente dos recursos espectrais, que é limitado para a maioria dos meios de comunicação [6].

O sinal no domínio do tempo é uma síntese de múltiplas formas de onda de subportadoras e consiste de um fluxo contínuo de símbolos Optical-OFDM que têm um período de símbolo normal, como pode ser observado na Figura 2.2 [6, 13].

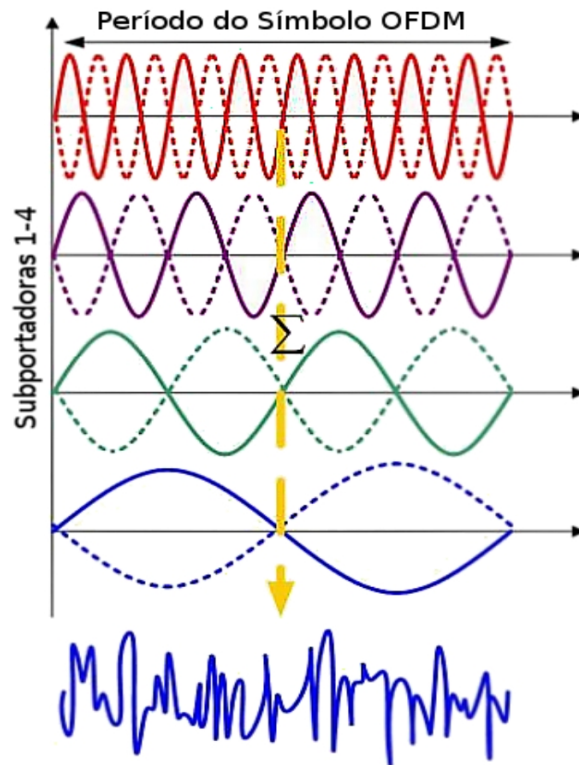


Figura 2.2: Domínio do tempo por símbolos Optical-OFDM.

A transmissão de um símbolo Optical-OFDM por uma longa distância, pode causar o fenômeno de dispersão chamado de Interferência Entre Símbolos, *Inter-Symbol Interference (ISI)*, que faz com que a transmissão cruze o limite de um símbolo vizinho, causando interferência. Uma das técnicas que permite a resolução do problema é a inserção de uma banda de guarda. O intervalo da banda de guarda é projetado de tal forma que um símbolo Optical-OFDM não possa interferir na recepção do símbolo Optical-OFDM vizinho, Figura 2.3 [6, 14].

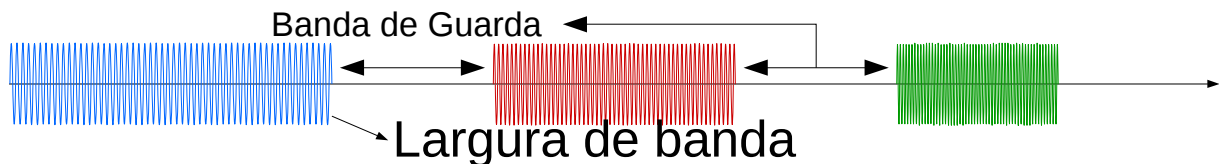


Figura 2.3: Exemplo de banda de guarda.

O Optical-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 [6, 15, 13]:

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

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

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

$c_{ki}$  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:

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

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

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

Isso significa que esse conjunto de subportadoras ortogonais, com frequências espaçadas em múltiplos do inverso do período de símbolos podem ser recuperadas por meio de filtros da Equação 2.4 sem interferência, apesar da forte sobreposição espectral [6].

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. O valor discreto do sinal Optical-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 [6, 13].

## 2.2 Sistema OFDM

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 percorre pela fibra, ocorre o fenômeno de dispersão, ou seja, existe um atraso de propagação.

Um símbolo OFDM com grande atraso, por percorrer uma longa distância na fibra, poderá cruzar o limite de outro símbolo OFDM adjacente, causando uma interferência. Essa interferência é chamada de Inter-Symbol Interference (ISI). O atraso de propagação e a interferência entre símbolos OFDM, resultam em uma penalidade de uma interferência entre subportadoras, denominada de Inter-Carrier Interference (ICI), que não garante a ortogonalidade das subportadoras [6, 13].

Um das técnicas que permite contornar esses problemas é a inserção de um intervalo de guarda (Guard Interval (GI)) e um prefixo cíclico (CP) [15, 16]. Para lidar com a ISI o intervalo de guarda é projetado para 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.

A ICI pode ser reduzida por meio da inserção de um CP para o intervalo 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 [16, 13].

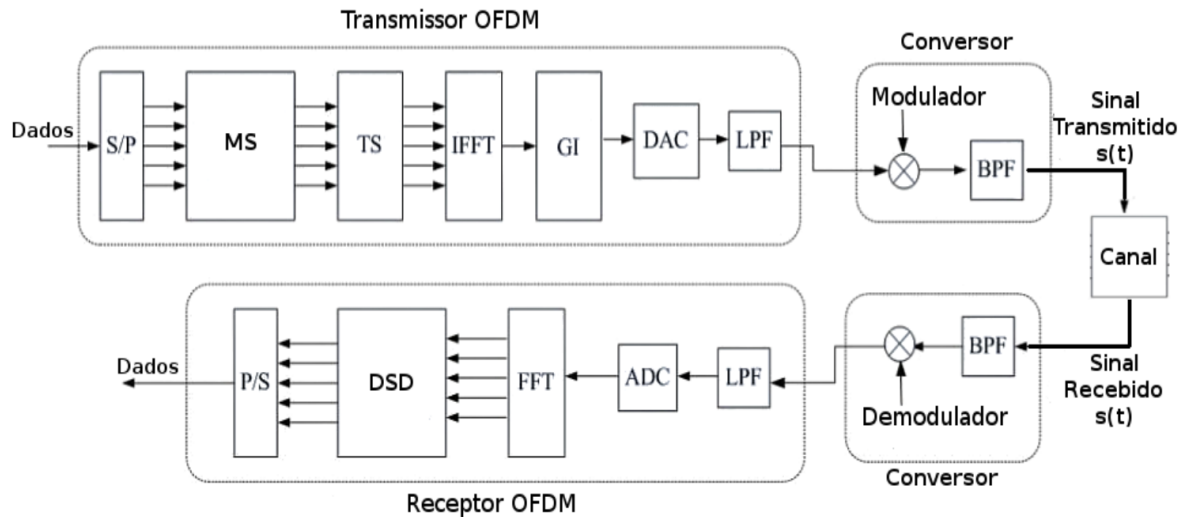
O funcionamento de sistema OFDM começa no transmissor, os dados são convertidos de serial para paralelo pelo conversor S/P, onde cada sinal é mapeado em símbolos (MS) de informação para as subportadoras OFDM. Os símbolos são inseridos para a estimativa do canal (TS) e posteriormente são inseridos paralelamente em subportadoras ortogonais e convertidos no sinal OFDM no domínio do tempo por meio de um IFFT.

Um intervalo de guarda (GI) e um prefixo cíclico (CP) são adicionados para evitar dispersão do canal, então o sinal é convertido de digital para analógico (DAC) e um filtro anti-aliasing (Low-Pass Filter) 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 Quadrature Amplitude Modulation (QAM), ou Phase Shift Keying (PSK), 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 por meio 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 por meio do P/S. O diagrama da figura Figura 2.4 apresenta o esquema de funcionamento [13].



Legenda:

S/P: Serial para Paralelo

MS: Mapeamento em Símbolos

TS: Estimativa do Canal

IFFT: Transformada Rápida de Fourier Inversa

GI: Guard Interval

DAC: Conversão Digital para Analógico

LPF: Filtro Anti-Aliasing

BPF: Filtro de Banda Passante

ADC: Conversão Analógico para Digital

FFT: Transformada Rápida de Fourier

DSD: Módulo de Decisão de Símbolo

P/S: Paralelo para Serial

Figura 2.4: Diagrama de funcionamento.

## 2.3 Vantagens e Desvantagens da Optical-OFDM

A tecnologia Optical-OFDM oferece vantagens que são essenciais para os sistemas de transmissão da *Internet* do futuro. São elas [6, 17]:

1. Solução efetiva para casos de interferência entre símbolos causada por um canal dispersivo com alta robustez;
2. Alta flexibilidade para migração de novas abordagens de transmissão de dados devido as características das subportadoras;
3. Aumento da capacidade de transmissão;
4. Eficiência no uso do espectro devido a sobreposição de subportadoras e modulação adaptativa QAM ou PSK;

5. Eficiência energética por meio do melhor uso de recursos da rede.

As desvantagens apresentadas pela Optical-OFDM, são [6, 17]:

1. Alta distorção no sinal transmitido, Peak to Average Power Ratio (PAPR): 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;
2. Restrição de ortogonalidade, mais sensível a ruídos do canal de transmissão.

## 2.4 Optical-OFDM

A tecnologia Optical-OFDM permite alcançar a eficiência dos recursos espectrais ópticos por meio do uso da tecnologia OFDM em meio óptico [18, 17]. As subportadoras são combinadas tornando a largura de banda do caminho óptico variável [6]. O Optical-OFDM é altamente eficiente em relação ao formato de modulação de espectro, fornece comprimentos de ondas escaláveis e flexíveis por meio da granularidade.

Existem diversas formas de implementações e classificações do Optical-OFDM. A Figura 2.5 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 [18, 13].

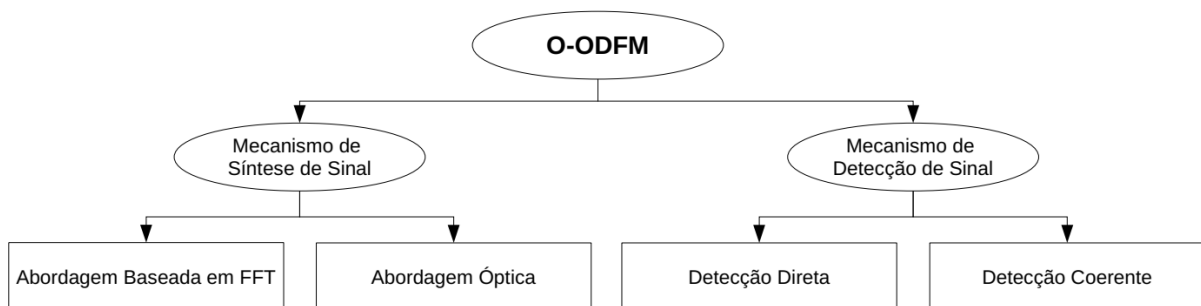


Figura 2.5: Classificação do Optical-OFDM.

Cada esquema é dividido em duas abordagens e cada abordagem é descrita a seguir [13]:

**Abordagem Baseada em FFT** As subportadoras são geradas no domínio digital usando uma IFFT. O transmissor Optical-OFDM converte o sinal elétrico para o sinal óptico e o receptor converte o sinal óptico para o sinal elétrico usando uma FFT. A

abordagem tem por vantagem ser simples, no entanto bandas de guarda introduzem sobrecarga ao sistema [16];

**Abordagem Óptica** O sinal Optical-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 [16];

**Detecção Direta** *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 [15];

**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 contenham 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 [15].

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.

## 2.5 Arquitetura da rede EON

A rede EON tem como objetivo principal prover o transporte eficiente de dados por meio de caminhos ópticos estabelecidos utilizando-se algum algoritmo RSA [12, 17]. A arquitetura EON baseada em Optical-OFDM é composta por *transponders* de banda variável, *Bandwidth-Variable Transponder (BVT)*, e por comutadores, *Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects (BV-WXC)*, que permitem o estabelecimento de caminhos ópticos com grade flexível [12, 17], a arquitetura é apresentada na Figura 2.6.

### 2.5.1 *Bandwidth-Variable Wavelength Cross-Connects BV-WXC*

BV-WXCs são responsáveis por comutar um caminho óptico fim-a-fim com largura de banda necessária para acomodar os recursos espectrais estabelecidos pelos BVTs. Quando

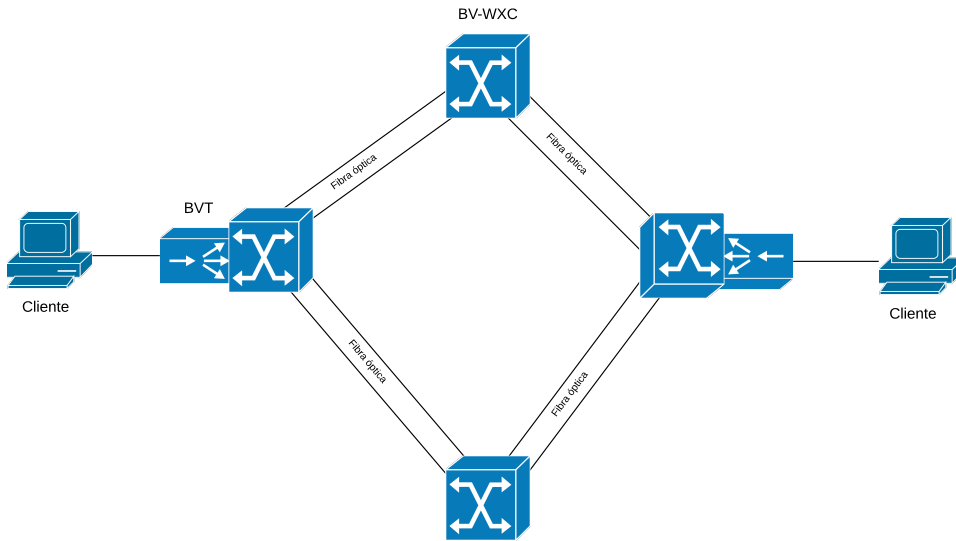


Figura 2.6: Arquitetura Optical-OFDM com a utilização de BVT e BV-WXC.

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 [6]. A Figura 2.6, apresenta a arquitetura da rede EON com o uso dos BVTs e BV-WXC, os BVTs localizam-se nas bordas da rede, tendo a responsabilidade de estabelecer os caminhos ópticos de acordo com a demanda requisitada, enquanto os BV-WXC encontram-se no núcleo da rede, são responsáveis por comutar o caminho óptico fim-a-fim [12, 17].

O tradicional filtro seletivo de comprimento de onda (Wavelength-Selective Switch (WSS)) utilizado nas redes WDM não poderá mais atender as exigências da rede EON, pois o WSS foi projetado para um espaçamento de canal fixo [12]. 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 2.7 [12, 13].

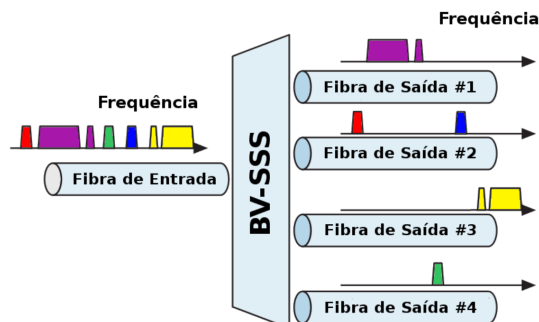


Figura 2.7: Representação do Bandwidth-Variable Spectrum-Selective Switch (BV-SSS).

Através dos BV-SSSs, o BV-WXC pode ser construído. O BV-WXC pode assumir dois tipos de arquitetura [12, 13]:

1. difusão e seleção (*broadcast-and-select*), apresentado na Figura 2.8a;
2. não difusão e seleção (*non-broadcast-and-select*), apresentado na Figura 2.8b.

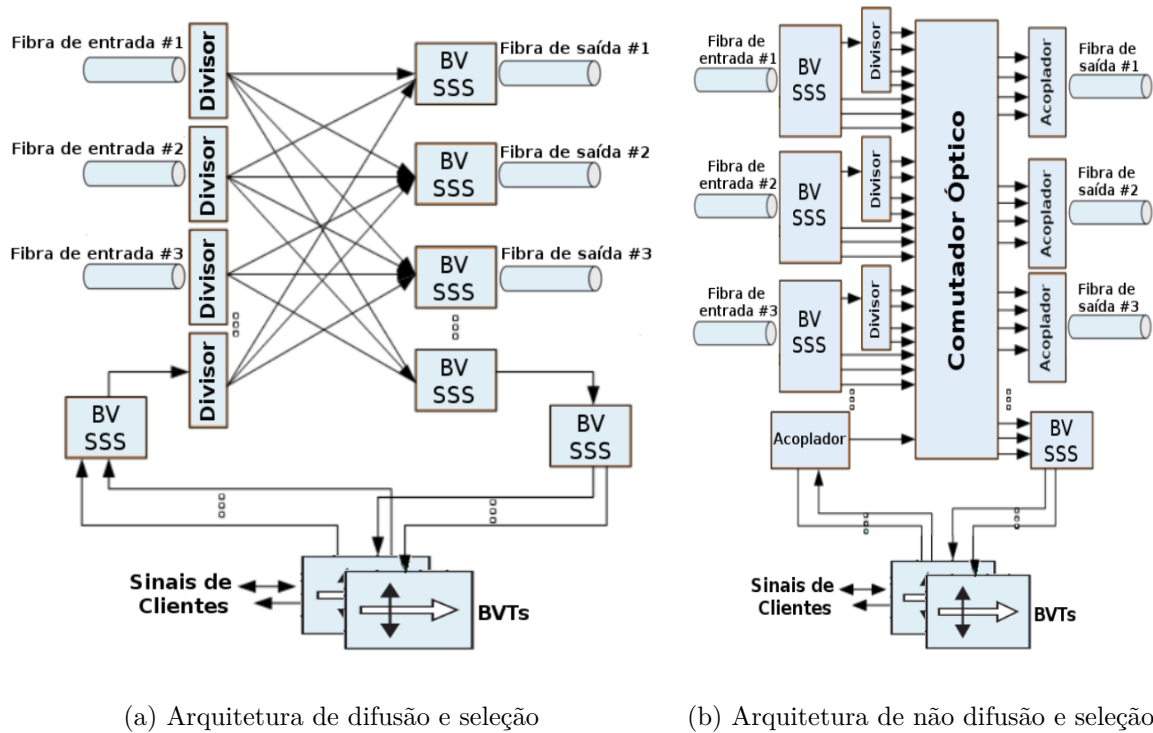


Figura 2.8: Arquiteturas do BV-WXC

A estrutura do BV-WXC precisa suportar as seguintes características [7, 13, 17]:

1. Retirada e inclusão para todos os comprimentos de onda (*colorless*);
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, os sinais de entrada são transmitidos para todas as portas de saída e os canais adequados são selecionados em cada porta de saída por meio do filtro BV-SSS. Na arquitetura de não difusão e seleção, 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 [12, 7, 13].

### 2.5.2 *Bandwidth-Variable Transponder BVT*

BVTs são responsáveis por alocar espectro suficiente para acomodar cada demanda. Várias subportadoras Optical-OFDM podem ser fundidas para formar um super canal de transmissão, transportando 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 [6].

Um caminho óptico elástico pode transmitir múltiplas taxas de dados, por conta de seu tamanho, a ser alocado de acordo com a demanda requisitada pelo cliente através do ajuste do número de subportadoras utilizadas, apresentado na Figura 2.9. Logo quanto maior a demanda requisitada, maior será a quantidade de subportadoras utilizadas [18, 12, 6].

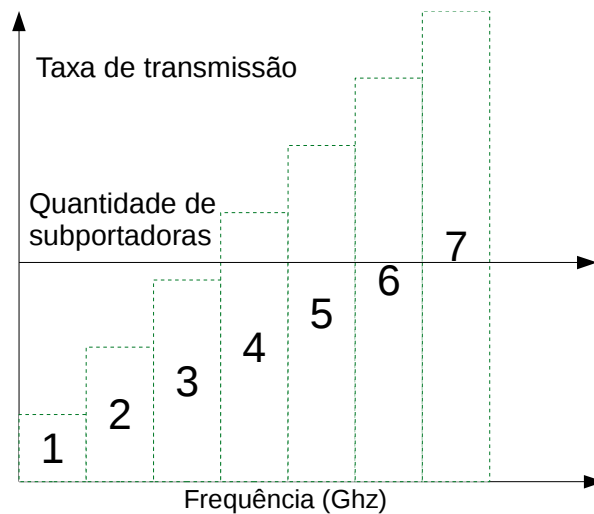


Figura 2.9: Utilização de subportadoras.

Os BVTs possuem uma capacidade máxima de utilização de subportadoras, quando o BVT opera com um número de subportadoras menor que sua capacidade máxima seus recursos são desperdiçados [12, 6]. O Sliceable Bandwidth-Variable Transponder (SBVT) foi apresentado como a tecnologia promissora para os transmissores EON [12, 6].

O 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. O *SBVT* gera múltiplos fluxos ópticos, que podem ser flexivelmente associados com o tráfego a partir das camadas superiores de acordo com a exigências. Desse modo, os fluxos ópticos podem ser agregados ou divididos em função das necessidades de tráfego, apoiando o uso de múltiplas taxas de *bits*, múltiplos formatos de modulação e taxas de código adaptativos [12, 13]. A Figura 2.10 mostra a distinção das funcionalidades do BVT e do SBVT.

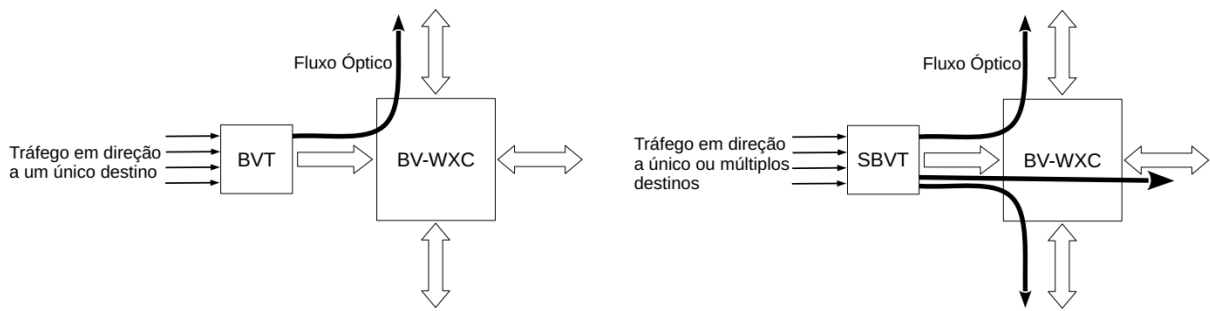


Figura 2.10: Funcionamento do BVT e do SBVT.

## 2.6 Representação do Espectro

A abordagem flexível necessita de uma especificação de espectro com bloco (*slot*) flexível para acomodar de forma eficiente o volume de tráfego heterogêneo das aplicações emergentes obtendo uma maior flexibilidade na alocação deste recurso. Essa especificação eleva o potencial do padrão G.694.1 da ITU-T, dividindo o espectro óptico em um certo número de *slots* contínuos de frequência, em que cada *slot* representa a largura do espectro de uma subportadora Optical-OFDM [19, 6]. Essa especificação possui duas propostas, apresentadas na Figura 2.11, para a especificação flexível [19]: a abordagem de *slot* único, *single slot on the grid*, e a *slot* dividido, *double-sided half slot*.

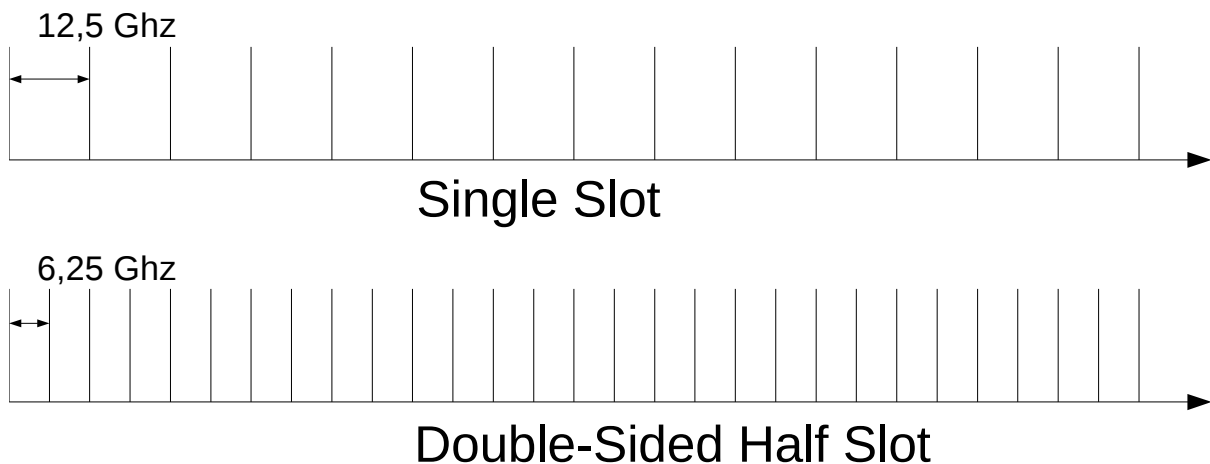


Figura 2.11: Abordagens de representação dos *slots*.

A abordagem de *slot* único fornece a frequência central e granularidade de 12,5 GHz para um *slot*. Essa abordagem utiliza o padrão de frequência da ITU-T, totalmente compatível com a grade de espectro atual. Enquanto a abordagem de *slot* dividido fornece a granularidade de 6,25 GHz por *slot*, que não é compatível com o padrão ITU-T, pois

esta abordagem prevê uma maior flexibilidade para a alocação de banda, aumentando o número de arranjos de subportadoras Optical-OFDM [19, 6].

A representação do espectro por meio de *slots* de frequência é desenvolvida pela divisão do espectro em um número de *slots* com tamanho igual ao número de subportadoras Optical-OFDM, onde cada *slot* representa uma subportadora. Um caminho óptico, por sua vez, utiliza um número arbitrário de *slots* contíguos de modo a aumentar a eficiência do espectro. Uma banda de guarda com  $G$  *slots* deve separar os caminhos ópticos do domínio do espectro para atender as limitações da tecnologia Optical-OFDM, a Figura 2.12 mostra a representação de três canais ópticos estabelecidos, com a distância da banda de guarda aplicada.

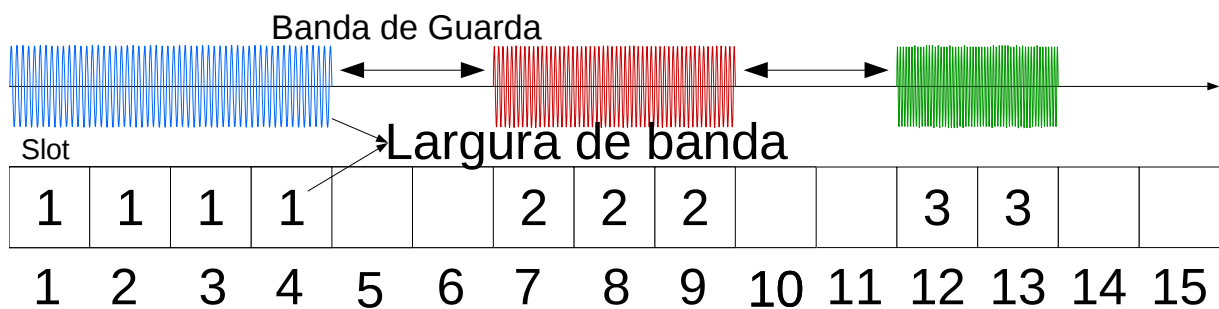


Figura 2.12: Representação da alocação de espectro com subportadoras representadas por slots.

## 2.7 Formato de Modulação e Distância Adaptativa

A distância adaptativa em rede EON vem do formato de modulação utilizado em cada subportadora Optical-OFDM, que pode ser modulada individualmente utilizando uma modulação diferente para cada transmissão [18]. A escolha do nível de modulação deve levar em consideração a qualidade de transmissão, *Quality of Transmission* - QoT, representada pela tolerância na relação sinal-ruído óptico, *Optical Signal-to-Noise Ratio* - OSNR [6, 18].

A literatura indica como referência para a QoT o uso da distância de transmissão do caminho óptico como fator mais relevante [6, 18, 19, 20]. Logo, dado um tamanho de caminho óptico pode-se encontrar o nível de modulação mais adequado para obter a melhor eficiência de espectro sem afetar a qualidade de transmissão, fazendo a correlação de que caminhos ópticos mais curtos são capazes de utilizar níveis de modulação mais altos, pelo preço de um alcance menor, enquanto caminhos mais longos utilizam níveis de modulação mais baixos, mas que, podem alcançar longas distâncias.



Segundo a Lei de Shannon [21], é possível determinar um limite superior teórico sobre a taxa de informações transmitidas em um meio, chamada de capacidade de canal, 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. A capacidade de um canal em *bits* por segundo  $C$  é dada de acordo com a Equação 2.6.  $B$  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)) [13].

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.6)$$

A banda passante de um canal está relacionada ao tamanho do espectro de cada subportadora OFDM e a modulação adotada. Na Equação 2.7,  $B$  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, a relação SNR do nível de modulação adotado. Ou seja,  $M$  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 [13].

$$B = \frac{C}{\log_2 M} \quad (2.7)$$

A Tabela 2.1 apresenta a relação entre a modulação, a capacidade de banda passante e a distância alcançada de acordo com a literatura pesquisada para rede EON [19, 22, 23, 24, 25]. Observa-se que quanto maior a banda passante, menor é seu alcance de transmissão, assim como é exposto na Figura 2.13. O regime de atribuição de espectro com distância adaptativa permite aumentar a eficiência do espectro aumentando o número de *bits* modulados por símbolo.

Na arquitetura BVT, o caminho óptico deve utilizar o mesmo nível de modulação para todas as suas subportadoras, independentemente da quantidade necessária, ao longo de todo o seu percurso [12]. No entanto, na arquitetura SBVT, esta restrição não é aplicável, o caminho óptico pode utilizar diferentes níveis de modulação para cada subportadora, de acordo com as limitações físicas do SBVT [12, 13].

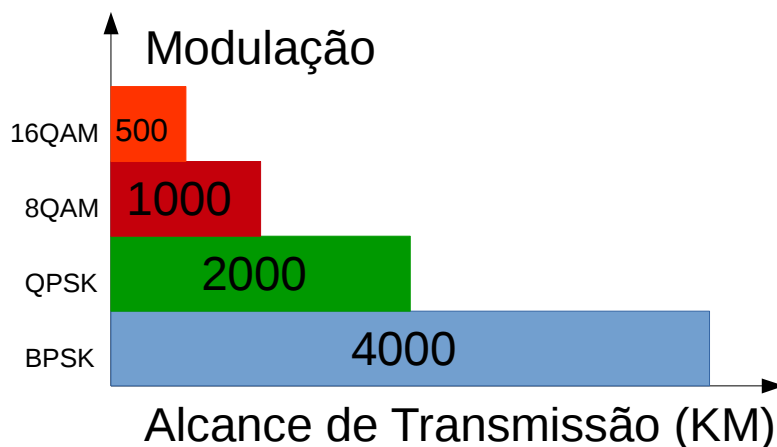


Figura 2.13: Relação entre modulação e alcance.

Tabela 2.1: Relação da capacidade do canal e alcance de cada modulação para um *slot* de 12,5 GHz

Modulação	<i>Bits</i> por símbolo	Capacidade do Canal (Gb/s)	Alcance (KM)
BPSK	1	12,5	4000
QPSK	2	25	2000
8QAM	3	37,5	1000
16QAM	4	50	500
32QAM	5	62,5	250
64QAM	6	75	125

## 2.8 *Routing and Spectrum Assignment (RSA) & Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment (RMLSA)*

Os algoritmos de Routing and Spectrum Assignment (RSA) e Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment (RMLSA), requerem novos mecanismos na rede EON para que se possa estabelecer os caminhos ópticos [12, 7].

Tanto nas soluções de RSA e RMLSA, existem duas restrições que devem ser tratadas para que seja estabelecido o caminho óptico: as restrições de contiguidade e continuidade. Os algoritmos devem procurar por rotas que contenham subportadoras contíguas e que utilizem a mesma faixa de espectro durante toda a rota. Ou seja, a contiguidade diz respeito a escolha de subportadoras (*slots*) que sejam adjacentes, formando um bloco com *slots* sequenciais. Já a continuidade diz respeito à disponibilidade do conjunto de *slots* escolhido ao longo dos *enlaces* da rota definida. Para cada caminho óptico é alocado

um intervalo de frequência denominado de banda de guarda. De forma a evitar interferências entre transmissões simultâneas, as bandas de guarda podem ser compartilhadas por caminhos ópticos adjacentes [2, 7, 26], na Figura 2.14 três caminhos ópticos indicam suas rotas e suas subportadoras, observa-se a configuração composta dos *enlaces* tomando como base o caminho  $N1 - N2 - N3$ .

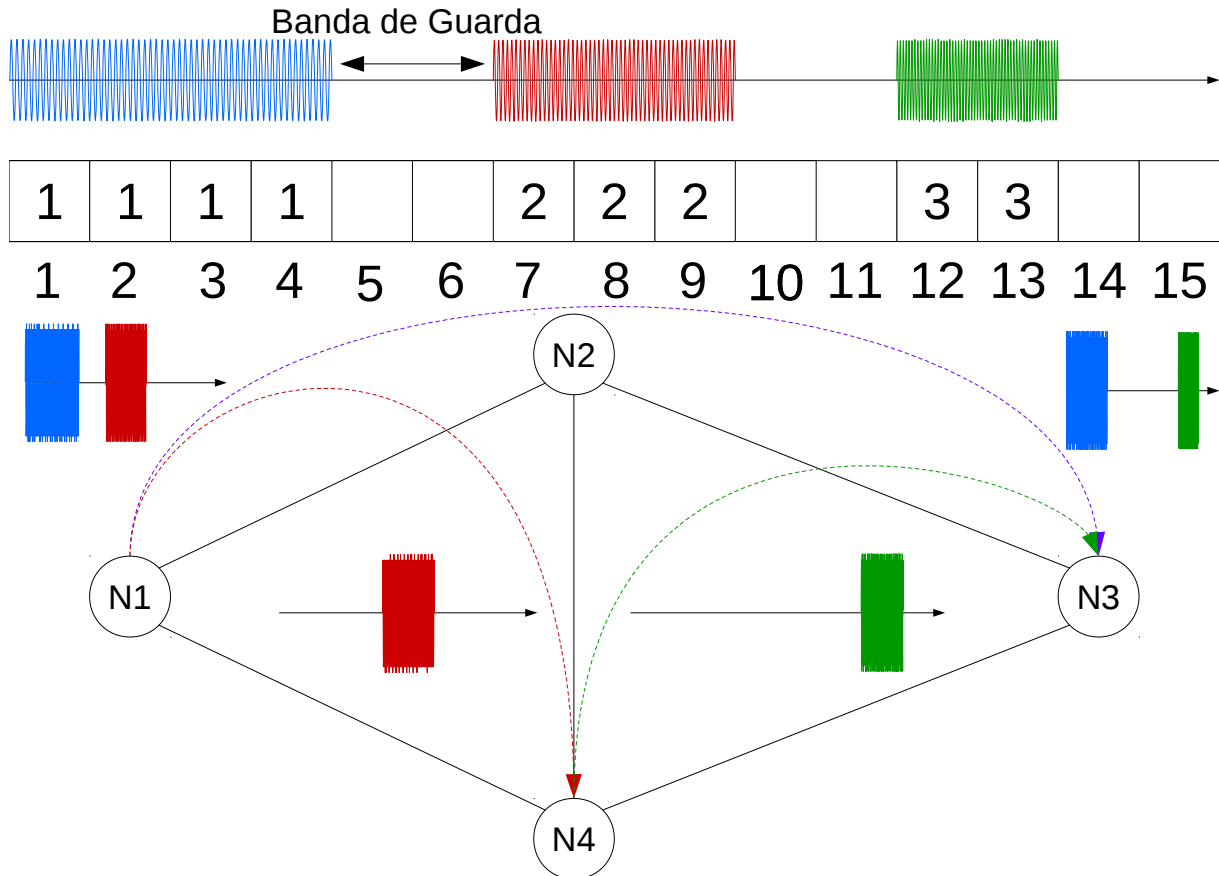


Figura 2.14: Exemplo de Alocação de caminhos.

No problema RMLSA adiciona-se a escolha da modulação que melhor atenda a requisição de banda entre uma dada origem e destino, permitindo a flexibilidade de escolher de acordo com a distância a ser transmitida, ou quantidade de largura de banda necessária para aquela requisição [26, 2, 18].

### 2.8.1 Complexidade do RSA

Para analisar a complexidade do problema RSA é necessário analisar o roteamento e a alocação de subportadoras contíguas no espectro. Se o roteamento é conhecido, ou pré

determinado, o RSA se transforma no problema de alocação de espectro estático (*Static Spectrum Allocation (SRA)*) [2, 13].

O objetivo é provar que o problema SRA é NP-Completo por meio da ligação com o problema tradicional de estabelecimento de caminhos ópticos estático (*Static Lightpath Establishment (SLE)*) em *Wavelength Routed Network (WRN)*, que é NP-Completo [2, 13]. 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  $|P| = \phi$ .

## 2.8.2 Definição do Problema SRA

Dado um grafo  $G(V, E, P)$ , 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? [13]

## 2.8.3 Teorema 1: O Problema SRA é NP-Completo

Para provar o Teorema 1 basta provar que SRA é NP e que SLE é redutível a SRA.

### 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 e 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  $\phi$ .
2. Verifica se cada  $p_i$  é separado por bandas de guarda entre qualquer outro  $p_j$  que compartilha o mesmo canal.
3. Se os itens 1 e 2 forem aceitos, então a demanda  $p_i$  será aceita, caso contrário, será rejeitada.

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

### O problema SLE é redutível ao problema SRA:

Dado um problema SLE 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 [13]:

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 zero, 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.

Provado o Teorema 1, conclui-se que o problema SRA é NP-Completo. A partir das provas, pode-se observar que o problema de alocação de espectro é difícil. O problema RSA é mais desafiador, uma vez que a decisão de roteamento deve ser considerada em conjunto. Para provar que o problema RSA é NP-Difícil, basta reduzi-lo a um problema NP-Completo, nesse caso, o problema SRA. Como o problema RSA é redutível ao problema SRA quando a rota já é definida, então o problema RSA é NP-Difícil [2, 13].

## 2.9 Tráfego Estático e Dinâmico

As abordagens de tráfego utilizadas pelos algoritmos de alocação de espectro podem ser classificadas de acordo com o tipo de aplicação. A abordagem de tráfego estático trata do roteamento e alocação de recursos durante a fase de planejamento da rede, onde uma matriz de tráfego fornecida e as operações de roteamento e atribuição de espectro são realizadas de maneira *off-line* [12, 6, 17].

Entretanto, o tráfego dinâmico trata do roteamento e alocação das demandas dinamicamente, a medida em que as solicitações de tráfego chegam na rede, realizando as operações de roteamento e atribuição de espectro de forma *on-line* [12, 6].

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, entretanto, eles podem levar a uma maior complexidade computacional [17, 13].

Heurísticas oferecem uma alternativa para reduzir a complexidade computacional das soluções ao custo de não se obter uma solução ótima [8]. No geral, heurísticas são mais utilizadas no planejamento dinâmico devido a menor complexidade computacional.

## 2.10 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 [27, 6]. Esse problema é muito parecido com o problema de fragmentação de memória em arquitetura de computadores, 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 tamanho suficiente [18, 9, 8].

Como na fragmentação de memória, a fragmentação de espectro causa a ineficiência do uso dos recursos da rede, proporcionando uma degradação do desempenho da rede, estabelecendo uma correlação entre a fragmentação e probabilidade de bloqueio em cenários dinâmicos [9, 27, 10].

O problema de fragmentação de espectro é dado quando os recursos espectrais estão divididos em partes pequenas, o que não está diretamente relacionado com a utilização do espectro, mas como a proporção da utilização do espectro pela quantidade total do recurso espectral [9].

Para tentar resolver o problema de fragmentação de espectro, na literatura são realizadas pesquisas divididas entre:

- Métricas para calcular a fragmentação de espectro;
- Técnicas de desfragmentação;

No Capítulo 3 serão exploradas as métricas de fragmentação de espectro.

### 2.10.1 Técnicas de desfragmentação

Mecanismos de desfragmentação de espectro tem o objetivo de reorganizar os caminhos ópticos existentes com o intuito de liberar espaço para futuras demandas de tráfego. De modo geral, reorganizar o espectro envolve a interrupção do tráfego, o que se torna uma prática custosa. Para evitar o problema, a literatura investiga técnicas para tratar a não interrupção dos serviços durante a fase de reconfiguração [10, 8, 13]. A Figura 2.15, apresenta as quatro principais técnicas de desfragmentação de espectro propostas pela literatura.

São elas:

- (a) Reotimização** - visa agrupar o máximo de *slots*, desfragmentando significativamente o espectro do canal, aumentando a possibilidade de atribuir as novas conexões com o custo de interromper os serviços [8];
- (b) Make-Before-Break** - aloca os mesmo recursos de banda em uma rota alternativa de acordo com a demanda que se deseja realocar. Após a alocação dos recursos alternativos, faz-se a liberação dos recursos antigos. Esse procedimento evita a

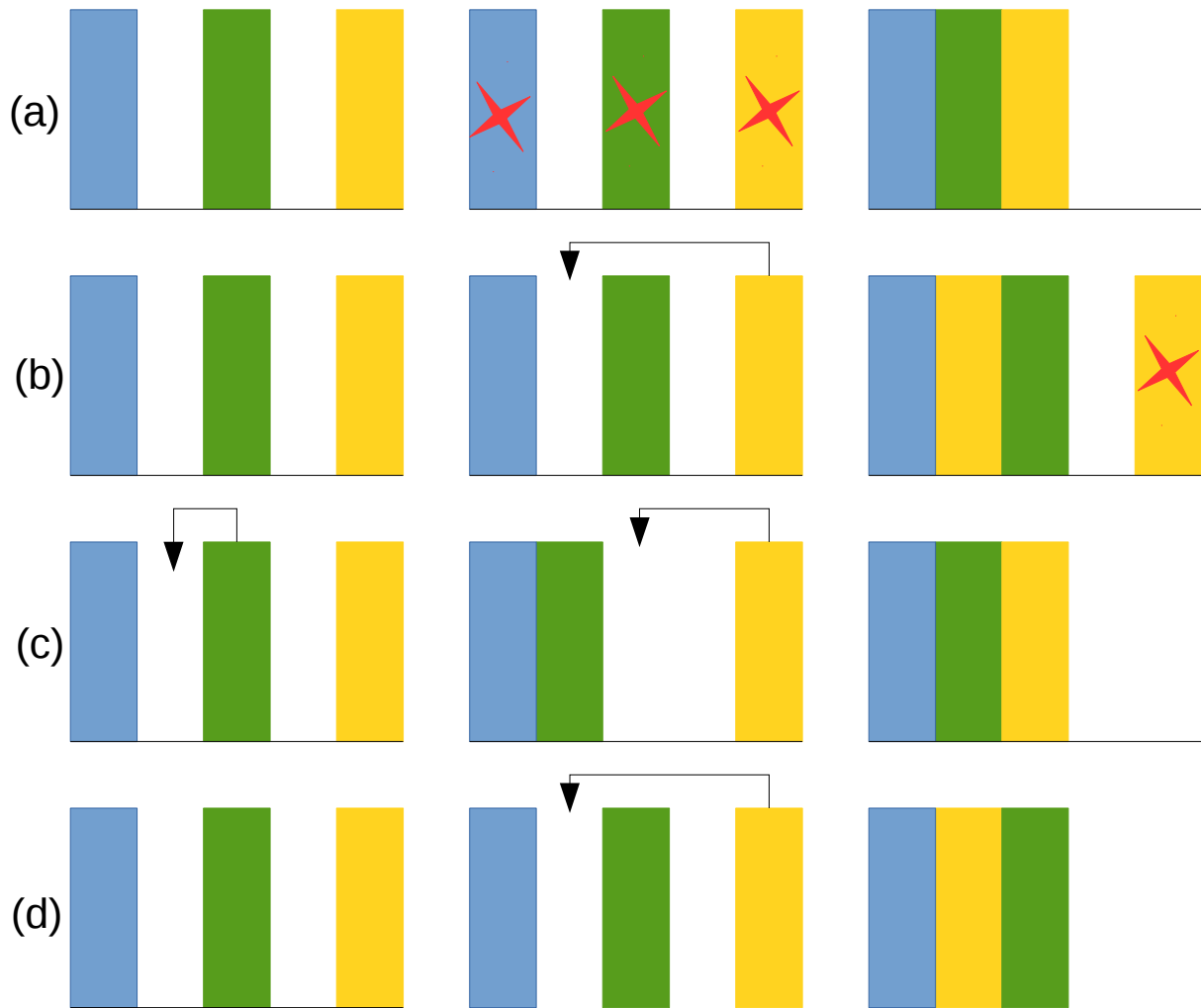


Figura 2.15: Técnicas de desfragmentação.

interrupção do serviço, pois a alocação é realizada antes da liberação do recurso [28];

(c) **Push-and-Pull** - desloca o espectro que será realocado até o espectro adjacente de maneira que sua rota não seja alterada. O deslocamento é realizado por uma remodulação do espectro pelo BVT ao longo do tempo [29];

(d) **Hop Tuning** - uma evolução das duas técnicas anteriores. Faz um deslocamento de forma oportunista, evitando o deslocamento de todas as conexões do canal usando os recursos da técnica *Make-Before-Break* [8].

As técnicas de desfragmentação podem ser classificadas em reativas ou proativas. Técnicas reativas são usadas quando a taxa de bloqueio começa a aumentar na rede, enquanto técnicas proativas realizam a alocação de espectro preservando faixas de espectro para usos

futuros seguindo alguma métrica de fragmentação ou realizando técnicas de desfragmentação periódica [8]. Outra tática com o objetivo de minimizar a fragmentação de espectro é o uso de políticas de alocação de espectro.

## 2.10.2 Políticas de Alocação de Espectro

As políticas de alocação de espectro são utilizadas para otimizar o uso do espectro, alocando as demandas dos canais de transmissão de maneira que possa atender a maior quantidade de requisições possível [6, 2], as principais técnicas de políticas são descritas a seguir. A Figura 2.16 apresenta a alocação de espectro para uma demanda de dois *slots* ( $D$ ) para os vários tipos de políticas de alocações, as hachuras indicam os *slots* ocupados:

***First Fit*** - Nesta política de alocação são utilizados os primeiros *slots* disponíveis, que sejam contíguos e contínuos, de tamanho suficiente para atender a requisição. A técnica do *First Fit* é considerada uma das melhores políticas de alocação, pois mantém uma baixa probabilidade de bloqueio de chamadas e baixa complexidade computacional [2, 9];

***Last Fit*** - De maneira semelhante ao *First Fit*, contudo nesta política são escolhidos os últimos *slots* disponíveis, que sejam contíguos e contínuos, de tamanho suficiente que atenda a requisição [30, 2];

***Random Fit*** - Nesta política a escolha dos *slots* contíguos e contínuos é feita de forma aleatória. A escolha aleatória garante que os recursos espectrais tenham a mesma chance de serem utilizados, não restringindo a probabilidade de escolha para apenas alguns *slots* [2, 9];

***First-Last Fit*** - Esta política de alocação divide o espectro em um número de subconjuntos. Nos subconjuntos ímpares é utilizada a política de alocação *First Fit*, enquanto nos subconjuntos pares é utilizada a política de alocação *Last Fit* [31, 2];

***Least Used*** - Esta política de alocação tenta espalhar as cargas uniformemente em todas as faixas de espectro, a partir da alocação dos *slots* menos usados do espectro. Quando há uma igualdade de utilização, faz-se uso dos primeiros *slots* [2];

***Most Used*** - Semelhante a política de alocação *Least Used*, porém a alocação acontece a partir dos *slots* mais utilizados, fazendo com que o reuso de *slots* seja maximizado, assim como na proposta anterior, quando há um empate, faz-se o uso dos primeiros *slots* [2];



**Exact Fit** - Faz a procura por um bloco contíguo e contínuo de tamanho exato ao requisitado pela conexão, caso seja encontrado, o caminho é estabelecido, caso contrário é utilizado a política de alocação *First Fit* [9, 2];

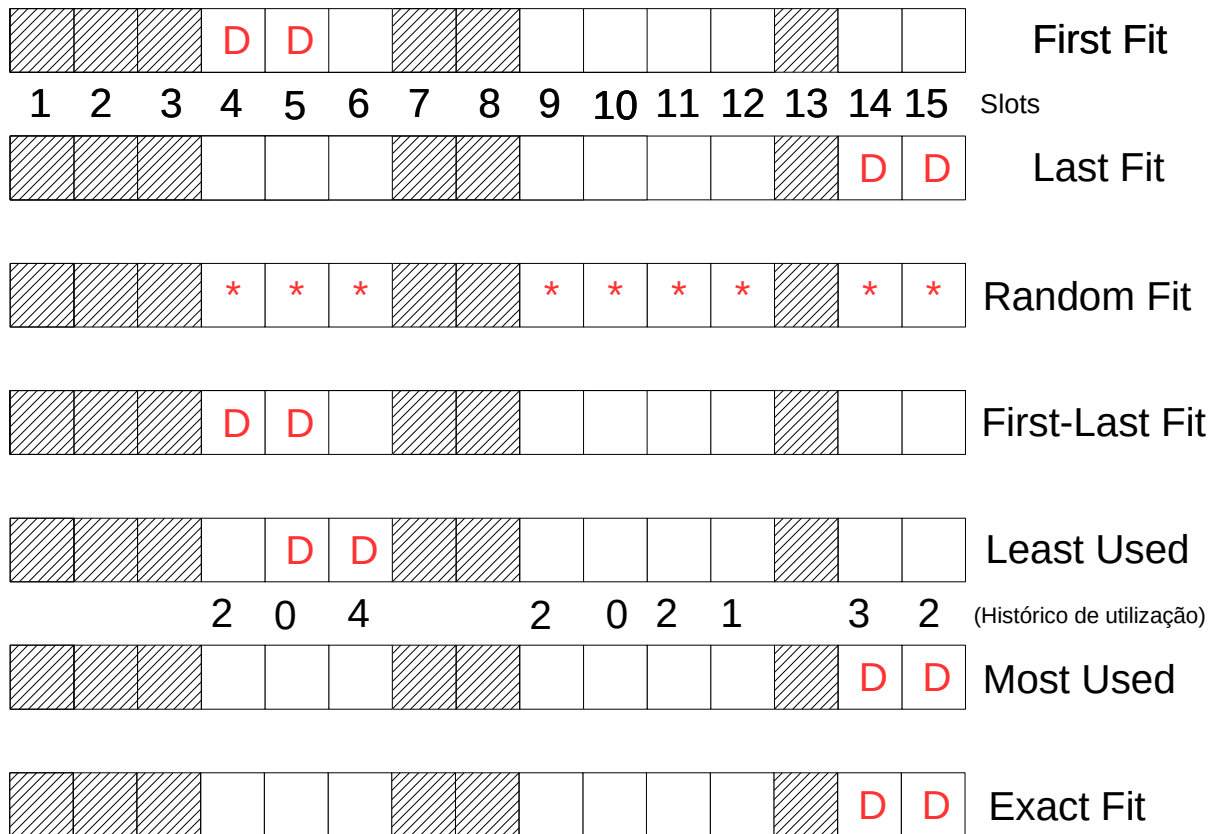


Figura 2.16: Comportamento das políticas de alocação de espectro para uma demanda de dois *slots*.

# Capítulo 3

## Fragmentação em Redes Ópticas Elásticas

Em ciência da computação, fragmentação de memória é a incapacidade de uso de memória livre de um sistema. Esse problema ocorre, geralmente, durante o processo de alocação e liberação de memória acionadas pelas aplicações, o que faz com que a memória livre se disperse em pequenos blocos descontínuos, tornando-os insuficientes para atender futuras requisições. As características pertencentes a *Elastic Optical Network (EON)* fazem com que o conceito básico de fragmentação não possa ser aplicado.

Este capítulo trata sobre a definição de fragmentação de espectro na *Elastic Optical Network* e apresenta duas propostas: (i) elenca características importantes que devem ser consideradas no processo de elaboração de uma boa métrica de fragmentação de espectro; (ii) classifica as métricas de fragmentação de espectro existentes na literatura. Ao final, apresenta-se a análise crítica das métricas de fragmentação de espectro propostas na literatura.

### 3.1 Contexto clássico da fragmentação em ciências da computação

A fragmentação é, por definição, a incapacidade de utilizar um espaço livre em relação ao espaço total [32]. Em ciência da computação, esse problema aparece principalmente na utilização de memória em um sistema e ocorre durante o processo de alocação e liberação da memória [32]. Ela acontece quando existem espaços livres pequenos entre os espaços utilizados. A Figura 3.1 expõe um exemplo de fragmentação, existem quatro espaços livres, dois do tamanho de um *slot* e um do tamanho de dois *slots*. A fragmentação, neste caso, depende das requisições futuras, isto é, considerando apenas requisições do

tamanho de um *slot*, nota-se que não há problema de fragmentação devido ao fato de que essa demanda pode ser alocada em todos os espaços livres. Mas, ao considerar requisições do tamanho de dois *slots*, o problema de fragmentação é demonstrado por possibilitar a alocação de apenas uma requisição, impossibilitando a alocação de requisições futuras, mesmo possuindo dois *slots* livres. O mesmo acontece para requisições maiores do que dois *slots*, ou seja, por mais que existam quatro espaços vazios, a alocação é impossibilitada devido aos espaços não estarem dispostos de maneira contígua.

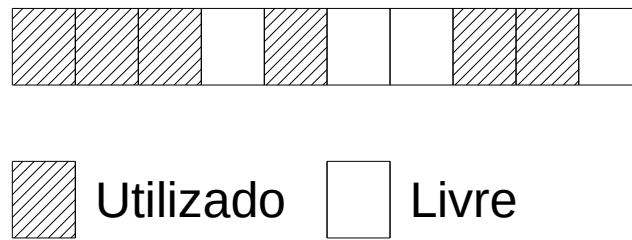


Figura 3.1: Exemplo de fragmentação em memória.

Esse tipo de fragmentação, chamada de *Fragmentação Externa* [32], ocorre quando blocos livres da memória estão disponíveis para alocação, mas não podem ser utilizados para satisfazer as requisições das aplicações, pois são muito pequenos, ou seja, não têm tamanho suficiente para acomodar os objetos.

A fragmentação depende de vários fatores, como o tamanho das requisições, a ordem de chegada das requisições e a política de alocação utilizada. Neste contexto a escolha da política de alocação tem um impacto considerável para agravar ou diminuir a fragmentação. Partindo de um estado inicial apresentado em Figura 3.1, na Figura 3.2 existem três requisições, duas do tamanho de um *slot* e uma do tamanho de dois *slots*. No exemplo, é ilustrado duas ordens de chegada das requisições. Foi utilizado a política de alocação *First-Fit*. Neste exemplo, a ordem de chegada das requisições é importante, pois o algoritmo de alocação *First-Fit* faz a avaliação do espaço disponível em relação a demanda, de forma que *slots* maiores podem ser subtraídos pelo tamanho da demanda, o que faz com que a possibilidade de fragmentação aumente, resultando em não atendimento de outras demandas.

Logo, utilizar uma política de alocação adequada pode ajudar a minimizar o problema da fragmentação. A Figura 3.3 expõe o mesmo problema anterior, porém a política de alocação utilizada é a *Exact-Fit*, que avalia os espaços possíveis de alocação da demanda em relação ao seu tamanho, buscando alocar a requisição no espaço de tamanho exato, ou de tamanho mais próximo da demanda possível. Neste exemplo, independente da ordem, todas as requisições são atendidas.

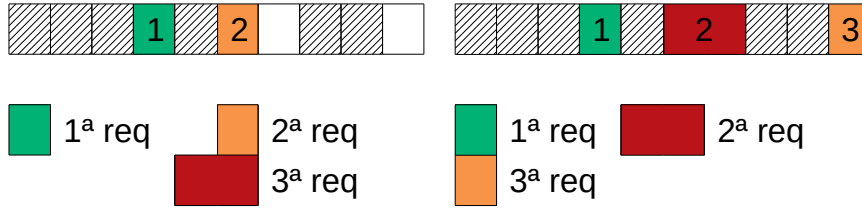


Figura 3.2: Alocação com a política *First-Fit*.

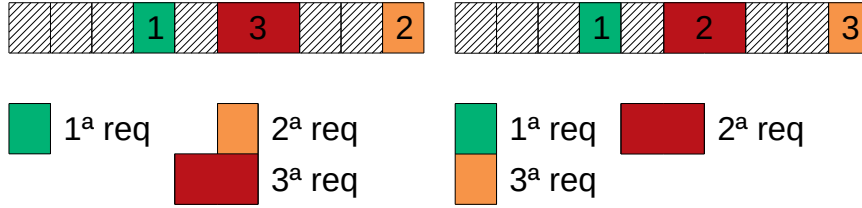


Figura 3.3: Alocação com a política *Exact-Fit*.

A política de alocação *First-Fit* é geralmente utilizada por ter um desempenho de tempo superior as demais, mas não significa que ela seja a melhor opção. No contexto da ciência da computação, a fragmentação é analisada em camada única, o que facilita a criação de métricas de fragmentação eficientes. As duas principais métricas de fragmentação propostas por [32] são:

1. Fragmentação Externa: realiza a razão entre o maior bloco de *slots* contíguos livre e a quantidade total de *slots* livres, Equação 3.1. Essa métrica expressa a fragmentação total da camada, por exemplo, na Figura 3.1 a fragmentação é de 50%. Na Equação 3.1 *MaiorBlocoLivre* representa o maior bloco de *slots* contíguos livre e *TotalSlotsLivre* representa a quantidade total de *slots* livre.

$$F_{ext} = 1 - \frac{MaiorBlocoLivre}{TotalSlotsLivre} \quad (3.1)$$

2. Fragmentação Relativa: expõe a fragmentação realizando uma razão entre a requisição, a quantidade de alocações possíveis para a demanda e a quantidade de *slots* disponíveis. Nessa métrica a fragmentação é relativa à demanda solicitada, isto é, no segundo caso da Figura 3.2, para a primeira requisição, do tamanho de um *slot*, a fragmentação relativa seria de 0%, para a segunda requisição, do tamanho de dois *slots*, neste momento a fragmentação relativa seria de 33.33%, devido que neste momento há três *slots* livres, divididos em dois *slots* contíguos livre e um *slot* livre sozinho. Na Equação 3.2  $c$  representa a demanda,  $Livre(c)$  é a função que retorna

a quantidade de requisições simultâneas que podem ser alocadas de tamanho  $c$  e  $TotalSlotsLivre$  representa a quantidade total de *slots* livre.

$$F(c) = 1 - \frac{c \times Livre(c)}{TotalSlotsLivre} \quad (3.2)$$

## 3.2 Fragmentação em *Elastic Optical Network (EON)*

Em um cenário dinâmico de rede, conexões são alocadas, desde que atendam as restrições do problema RSA, e desalocadas de forma aleatória, fazendo com que sejam introduzidos espaços entre os recursos espectrais que geram o, então chamado, problema da fragmentação de espectro [8].

O problema da fragmentação de espectro conduz a ineficiente utilização dos recursos da rede e uma degradação na sua performance, isto é, aumenta a probabilidade de bloqueio de largura de banda, por conta dos *slots* livres estarem dispersos no espectro. Em muitos casos, esses *slots* livres não estão contíguos de maneira que possam ser agrupados para atender uma nova conexão de canal óptico [8].

Vários autores afirmam que quanto maior a fragmentação de espectro, maior é a probabilidade de bloqueio de largura de banda [9, 8, 10]. Estabelecer uma relação entre a fragmentação de espectro e a probabilidade de bloqueio de largura de banda é o tema de várias pesquisas relacionadas à EON.

Contudo, o problema da fragmentação de espectro é tratado como semelhante à fragmentação de memória em arquitetura de computadores [9], isso leva a criação de métricas de fragmentação de espectro ineficazes, pois a fragmentação de memória é avaliada em uma única camada e a fragmentação de espectro deve ser avaliada nas diferentes camadas que são compostas pela ligação dos *enlaces* que compõem a rede.

A rede EON é representada por um grafo não dirigido e conexo, cada vértice representa um nó e cada aresta representa um *enlace*. Essa representação difere do contexto clássico da fragmentação em memória, pois a fragmentação de espectro deve ser avaliada em todos os *enlaces* que compõem a rede, além disso, a utilização de espectro é gerada por meio dos canais ópticos estabelecidos, que geralmente são compostos por mais de um *enlace*, de maneira que o espectro seja utilizado de maneira diferente em cada *enlace*, pois além de possuírem tamanhos variados, devem atender as restrições de contiguidade e continuidade de espectro. A Figura 3.4 apresenta a diferença entre as duas situações. É possível avaliar a fragmentação em memória com precisão através da métrica de fragmentação externa, apresentada na Equação 3.1, ou calcular a fragmentação relativa da memória utilizando a Equação 3.2. Contudo apresentar o valor da fragmentação de es-

pectro não é uma tarefa simples, pois a possibilidade de continuidade de espectro não uniforme faz com que a forma de avaliar a fragmentação de espectro deva ser revisada.

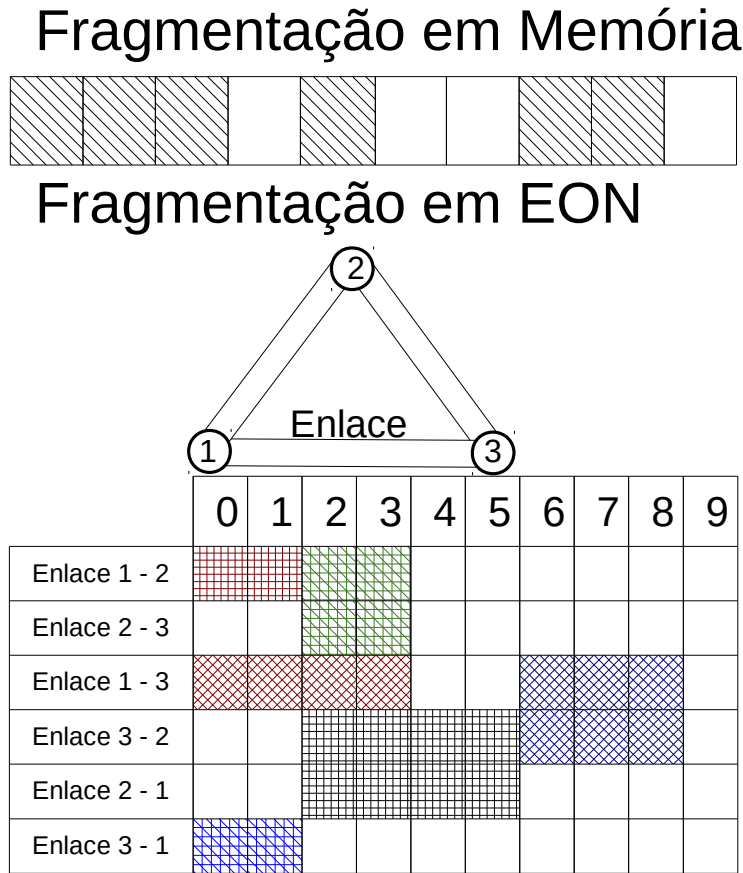


Figura 3.4: Diferença entre a utilização de memória e utilização de espectro.

Dessa forma, o desafio é expressar as restrições de continuidade e contiguidade, por meio de uma métrica de fragmentação de espectro. Isto é, uma boa métrica deve considerar a continuidade de espectro, observando as várias formas de conexões que existem em uma rede, e deve considerar a contiguidade de espectro disponível, observando as possíveis requisições da rede. Assim sendo, as características que uma boa métrica de fragmentação de espectro deve considerar são:

- **Contiguidade que represente os *slots* livres e as possibilidades de alocação das granularidades demandantes**

Muitas métricas de fragmentação de espectro fazem a sua avaliação individualizando os *enlaces* da rede, fazendo com que o problema de fragmentação de espectro assemelhe-se ao problema de fragmentação em memória, o que leva a identificação de falsa fragmentação de espectro, pois cada *enlace* mostra a utilização de espectro

entre dois nós, que estão diretamente ligados. A fragmentação de espectro deve expressar a proporção de espectro que não pode ser utilizada. Usando a rede de exemplo da Figura 3.5 e considerando que a utilização de espectro é igual em cada *enlace* bidirecional, obtém-se as seguintes fragmentações externa de espectro apresentada na Figura 3.6, (Equação 3.1) para os *enlaces*:

- A: 67%,
- B: 50%,
- C: 33% e
- D, E: 0%.

Porém, esses valores não expressam a fragmentação de espectro de forma eficaz, pois ao considerar que a demanda do tamanho de 1 *slot* pode ser alocada em qualquer *enlace*, conclui-se que não existe o problema de fragmentação de espectro. Logo, para representar a fragmentação de espectro, deve-se considerar todas as granularidades demandantes e as suas possibilidades de alocação em todos os subconjuntos de *slots* contíguos no *enlace*, como apresentado na Figura 3.6, apresenta as possibilidades de alocações simultâneas para diferentes granularidades.

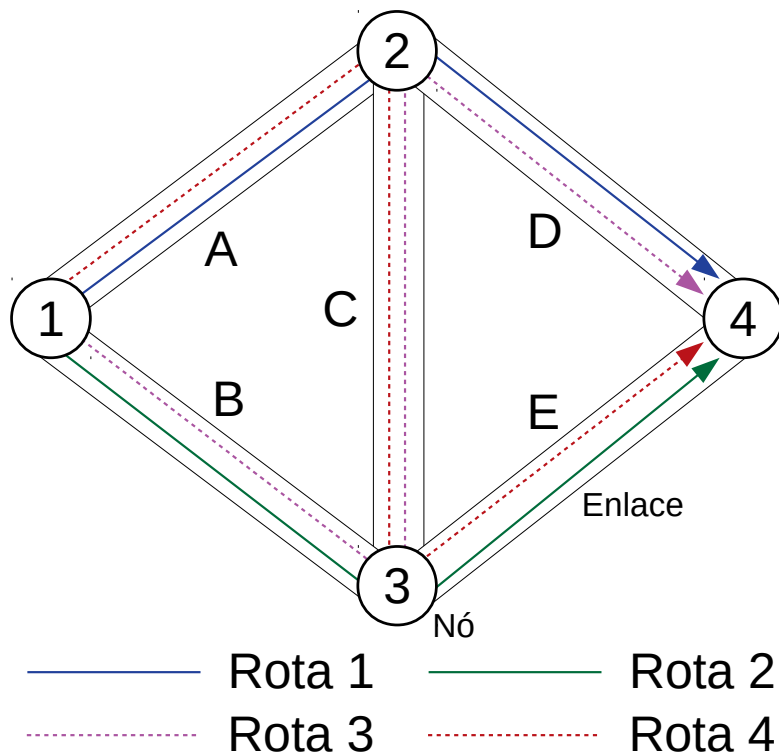


Figura 3.5: Exemplo de topologia.

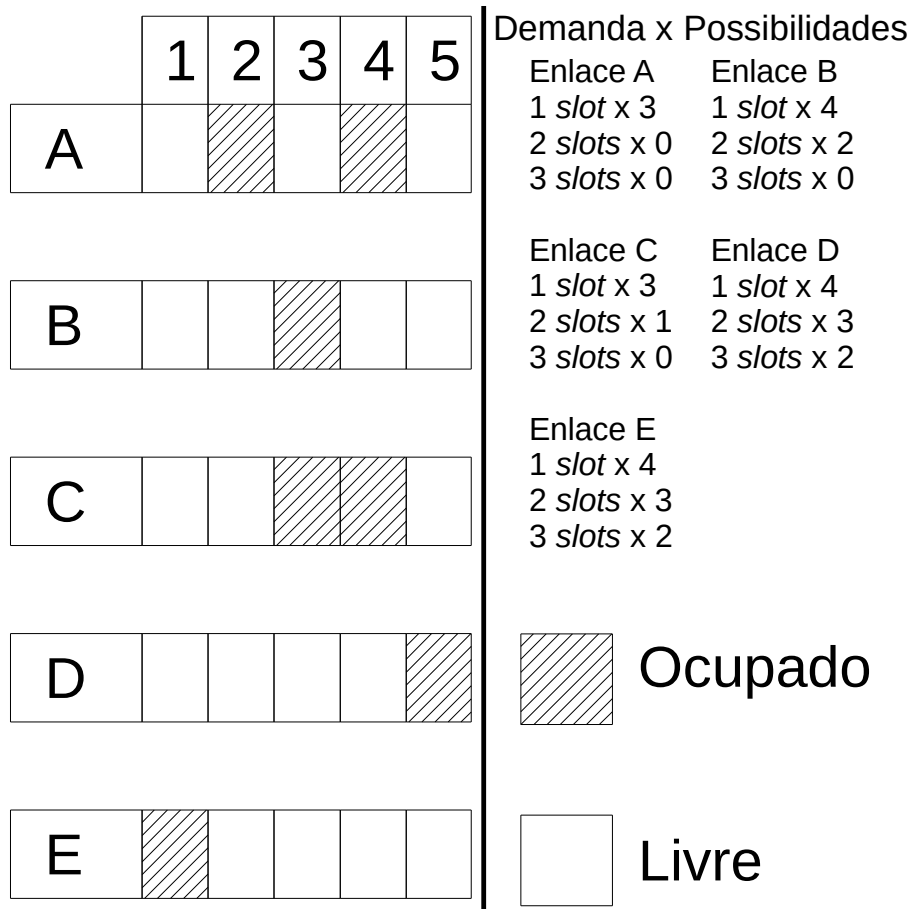


Figura 3.6: Utilização do espectro por *enlace*.

- **Continuidade que represente a organização do espectro e as possibilidades de alocação das granularidades demandantes**

O principal desafio para uma métrica de fragmentação de espectro é representar a continuidade de espectro, pois as requisições geralmente levam a caminhos que são compostos por mais de um *enlace*. Dessa forma, a avaliação de continuidade de espectro torna-se uma atividade complexa, mas essencial para uma boa representação de fragmentação. A alocação do canal óptico, independente da quantidade de enlaces que possua, pode resultar em um desalinhamento do espectro entre os *enlaces*, impedindo que outras requisições sejam alocadas por decorrência desse fato. O desalinhamento do espectro é o resultado da quebra de continuidade do espectro livre. Esse fenômeno pode gerar uma alta taxa de bloqueio das demandas solicitadas, levando a uma redução das possibilidades de alocações identificadas na análise de contiguidade (Figura 3.6). É importante que a métrica tenha ciência de todas as granularidades demandantes na rede. Por exemplo, a Figura 3.7 ilustra as rotas possíveis para uma requisição que tenha origem no nó 1 e destino no nó 4, para



a topologia apresentada na Figura 3.5 e a utilização de espectro apresentado na Figura 3.6. Cada rota possui uma utilização de espectro diferente, o que impossibilita a alocação de granularidades altas. Por exemplo, o *enlace A* possui canais ópticos alocados que levam a uma baixa organização do espectro livre, ou seja, a disposição dos canais ópticos alocados no *enlace A*, faz com que exista poucos *slots* contínuos na rota 1.

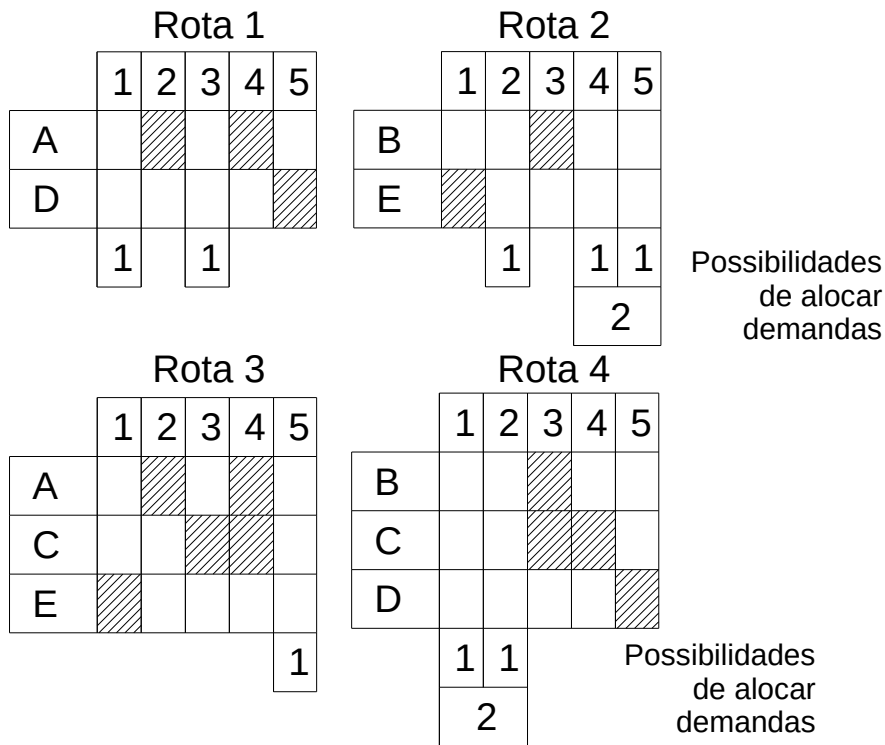


Figura 3.7: Ocupação dos *slots* nas rotas candidatas para a requisição com origem no nó 1 e destino no nó 4.

Calcular a continuidade de espectro para todos os *enlaces* da rede é uma tarefa custosa, pois é necessário verificar todos os *slots*, em todos os caminhos possíveis para cada nó. A Equação 3.3 expõe a complexidade de tempo, que seria gasto por essa verificação. Contudo, realizar uma verificação de continuidade de espectro para a rede como um todo faz com que caminhos longos sejam avaliados, sendo que esses caminhos dificilmente tornam-se uma alternativa válida para a alocação do canal óptico, devido à distância entre a origem e o destino. Ressalta-se que o cálculo da rota depende do algoritmo de roteamento escolhido para atender a proposta de solução RSA, por exemplo, o algoritmo de roteamento de menor caminho, somente considerará a continuidade de espectro no menor caminho, enquanto o algoritmo de

roteamento de  $k$  menores caminhos, considerará a continuidade de espectro nos  $k$ 's menores caminhos.

$$O\left(\frac{|\text{Nós}| (|\text{Nós}| - 1)}{2} \times |\text{Slots}| \times |\text{Enlaces}|\right) \quad (3.3)$$

Logo, uma alternativa para a avaliação da continuidade de espectro, é quantificar a quebra de continuidade para os *enlaces* adjacentes do *enlace* avaliado, assim, o resultado apresentará uma organização de canais ópticos que possibilitem uma continuidade de espectro maior e rotas mais curtas, conseqüentemente rotas que, na realidade, são mais propensas a serem utilizadas. Cada *enlace* poderia ser avaliado, no pior caso, em uma complexidade de tempo quadrática em relação ao grau do nó, quando o grau do nó de origem é igual ao grau do nó de destino, assim como é apresentado pela Equação 3.4.

$$O((\text{Grau}(\text{origem}) - 1) \times (\text{Grau}(\text{destino}) - 1)) \quad (3.4)$$

- **Não utilizar estratégias de cálculo de média, ou produto, envolvendo *enlaces* a fim de realizar uma boa representação de fragmentação de espectro**

Representar a fragmentação de espectro utilizando cálculos como média, ou produto, é ineficaz. Uma boa métrica de fragmentação deve considerar os dois pontos tratados anteriormente, o que torna inviável a utilização dessas estratégias de cálculos, já que calcular a fragmentação de espectro em cada *enlace*, considerando unicamente a contiguidade de espectro, leva a sobreposição dos *enlaces*, podendo indicar que não existe fragmentação de espectro, mesmo que não possa ser alocado nenhum canal óptico, que necessite de uma rota composta por mais de um *enlace*. A Figura 3.8 elucidada o exemplo de avaliação da média de fragmentação de espectro por *enlace*, através da Equação 3.1, cada *enlace* possui 0% de fragmentação de espectro, pois o tamanho do maior bloco contíguo de *slots* livres é igual a quantidade de *slots* livres. Ao realizar a média, o resultado continuará indicando 0% de fragmentação de espectro, contudo não são consideradas as granularidades das demandas e nem é considerada a continuidade de espectro, o que leva ao bloqueio de qualquer requisição que necessite de uma rota composta por mais de um *enlace*, ou de qualquer requisição de granularidade alta, por exemplo, requisições de três *slots* não podem ser alocadas em nenhum *enlace* dessa rede.

Outro fator importante é o significado do resultado da métrica, pois resultados de 0% e 100% de fragmentação de espectro devem condizer com a utilização de espectro. De

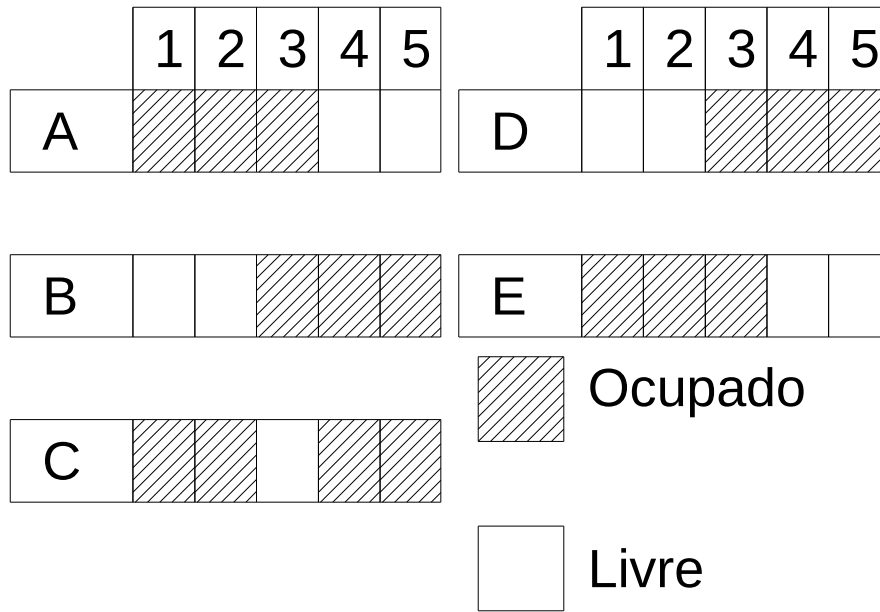


Figura 3.8: Utilização do espectro por *enlace*.

fato, é esperado que uma representação de 0% indique que é possível a alocação de qualquer granularidade, para qualquer origem e destino, enquanto que um resultado de 100% de fragmentação de espectro espera-se que seja impossível alocar qualquer granularidade, para qualquer origem e destino. Por isso, é importante que seja incorporado à métrica a ciência das granularidades demandadas na rede, pois ao analisar as possibilidades de alocação é possível estabelecer uma confiança entre o estado de utilização do espectro na rede e a fragmentação de espectro de fato. Por exemplo, o estado de utilização do espectro na Figura 3.8 e com rotas de apenas um *enlace*, podemos ter as seguintes situações:

1. Para granularidade de apenas um *slot*: é correto indicar 0% de fragmentação de espectro, pois é possível alocar qualquer requisição de um *slot*, em qualquer *enlace* da rede;
2. Para granularidades de um e dois *slots*: é incorreto indicar 0% de fragmentação de espectro, pois o *enlace C* mesmo indicando 0% de fragmentação de espectro, não poderá atender uma demanda de dois *slots*, ou seja, 20% da rede não pode atender uma das granularidades;
3. Para granularidades de um, dois e três *slots*: é incorreto indicar 0% de fragmentação de espectro, pois em nenhum *enlace* é possível alocar uma demanda de três *slots*, sendo ainda que o *enlace C* não pode alocar, também, demandas de dois *slots*, nessa situação, apenas a granularidade de um *slot* pode ser

atendida por todos os *enlaces*, a granularidade de dois *slots* pode ser atendida por 80% dos *enlaces* e a granularidade de três *slots* não pode ser atendida por nenhum *enlace* da rede.

Desta forma, é importante para uma boa métrica de fragmentação de espectro considerar em sua avaliação as restrições de continuidade e contiguidade de espectro. Para que isso seja possível, é imprescindível que a métrica tenha conhecimento das granularidades que serão atendidas na rede.

Estabelecer uma relação entre a fragmentação de espectro e a probabilidade de bloqueio de largura de banda é o tema de várias pesquisas relacionadas a EON, sendo que diversos pesquisadores propõem métricas para quantificar a fragmentação de espectro. O estudo realizado sobre essas propostas levaram à proposição de duas classes de métricas de fragmentação de espectro:

1. **Métricas que quantificam a fragmentação de espectro geral na EON:** expressam a fragmentação de espectro considerando todos os *enlaces* presente na EON, subdivididas em:

- **Ciente do Maior Bloco:** essa estratégia leva em consideração o maior bloco contíguo de *slots* livre presente por *enlace*, de forma que a fragmentação de espectro seja uma relação entre o maior bloco contíguo livre e a quantidade total de *slots* livre. Em geral, a utilização de métrica com esse tipo de proposta se torna falha quando vários *enlaces* são avaliados, pois analisam os *enlaces* como sendo camadas sobrepostas e independentes, tornando-se o principal erro dessa estratégia. Ao ignorar que a disposição dos slots livres pode não ser contínua entre as camadas, essa estratégia faz com que o resultado de 0% de fragmentação de espectro seja irreal.
- **Ciente dos Recursos disponíveis:** essa estratégia observa a quantidade de *slots* disponíveis em cada *enlace* e calcula quantos canais ópticos poderiam ser alocados. Porém, a previsão dos canais ópticos é obtida apenas na dimensão de contiguidade de espectro no *enlace*, não atendendo à característica de continuidade de espectro. Tornando a predição de alocação de espectro falha e irreal, pois, em muitos casos, a análise de contiguidade de espectro pode determinar que não existe fragmentação de espectro. Entretanto, nenhum canal óptico poderá ser alocado caso necessite de um caminho com mais de um *enlace*.
- **Ciente da Entropia:** nessa estratégia é levado em consideração a disposição dos *slots*, realizando, ao mesmo tempo, a análise de contiguidade de espectro e de organização do espectro, de forma que não é avaliada a continuidade

de espectro explicitamente. A característica principal dessa estratégia é a capacidade de analisar a organização do espectro, que seria a primeira etapa da análise de continuidade de espectro. Por este fator, espera-se que as métricas dessa subcategoria tenham resultados melhores que as demais.

**2. Métricas que quantificam a fragmentação de espectro no caminho óptico:** expressam a fragmentação de espectro presente no conjunto de *enlaces*, que formam a rota entre a origem e o destino, do canal óptico a ser alocado, subdivididas em:

- **Ciente da Demanda:** Possuem a característica de saber a quantidade de *slots* que o canal óptico irá necessitar, fazendo a relação entre a demanda e a capacidade disponível. Uma das características dessas equações é que caso uma demanda não possa ser alocada, elas retornam 100% de fragmentação no caminho, independente da quantidade de *slots* disponíveis no caminho;
- **Consideram Apenas os Recursos Disponíveis:** Quantificam os blocos de *slots* disponíveis para a futura alocação de canais ópticos, independente da demanda solicitada, logo quando essas equações informam 100% de fragmentação, significa dizer que não há nenhuma possibilidade de alocação para qualquer demanda.

As características elencadas para uma boa métrica de fragmentação de espectro em EON, tornam complexa a tarefa de quantificar a fragmentação de espectro geral na EON. A combinação dos fatores de análise da continuidade de espectro, análise das granularidades que serão atendidas pela rede e o tráfego dinâmico tornam praticamente impossível expressar a fragmentação de espectro geral presente na EON. Assim, comprovar a premissa de que quanto maior a fragmentação de espectro, maior será a probabilidade de bloqueio de largura de banda [9] implica em propor uma métrica que, ao diminuir a fragmentação de espectro, eleva a capacidade de alocação de recursos na rede. Por exemplo, a Figura 3.9 apresenta a utilização do espectro ao longo dos *enlaces* de forma organizada, ou seja, todos os *slots* livres estão alinhados de forma contínua, na mesma posição. Essa distribuição uniforme da utilização do espectro faz com que a fragmentação externa seja considerada como 0%. Contudo, se a menor requisição da rede for de três *slots*, nenhuma requisição poderá ser alocada na rede.

Por isso, quantificar a fragmentação de espectro geral na EON pode ser considerado ineficaz, pois mesmo que seja utilizada uma métrica para diminuir a fragmentação de espectro geral, não implicará no aumento da capacidade de alocação de largura de banda. Esse problema também ocorre com as métricas que quantificam a fragmentação de espectro no caminho óptico. Nesse contexto, o conjunto de *enlaces* é delimitado, diminuindo a

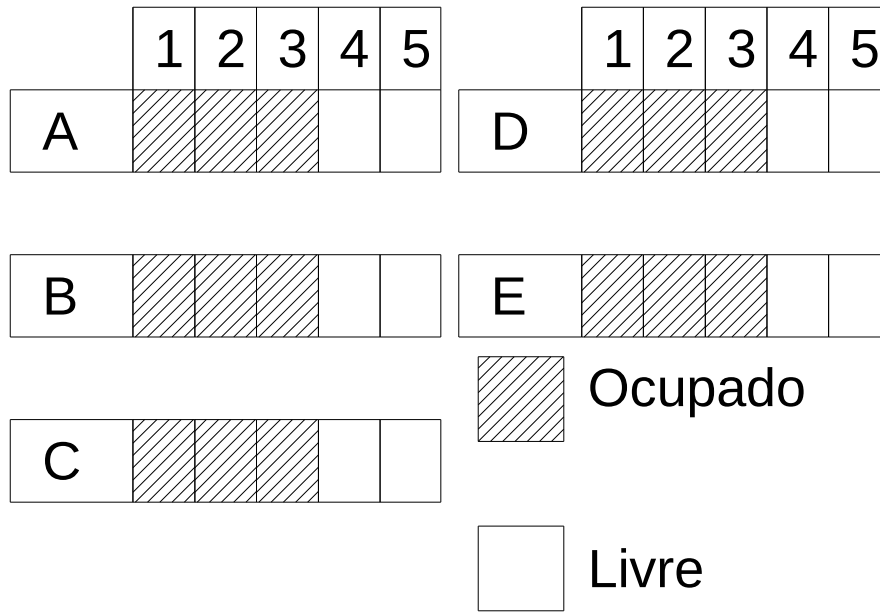


Figura 3.9: Utilização do espectro por *enlace*.

complexidade da análise de continuidade de espectro e tornando maior o peso das granularidades, porém o mesmo problema acontece, devido a incerteza das futuras requisições por conta do tráfego dinâmico.

Contudo, avaliar a fragmentação de espectro no caminho óptico é menos complexo, pois a principal estratégia é mesclar os *enlaces* que compõem a rota, fazendo com que seja visível a continuidade de espectro. Na Figura 3.10 as rotas 3 e 4 são compostas, respectivamente, pelos *enlaces*  $A - C - E$  e  $B - C - D$ , abaixo é apresentado a análise de continuidade de espectro dessas rotas.

Elaborar uma métrica que valide a hipótese do problema da fragmentação fornece novas possibilidades para o desenvolvimento de algoritmos RSA mais robustos, aumentando assim a capacidade de alocação de recursos na rede.

### 3.3 Notação Geral

As definições a seguir são importantes para o entendimento das métricas que serão aludidas:

- Bloco: conjunto de *slots* contíguos, podendo ser um conjunto de *slots* livres ou ocupados;
- Sub-bloco: subconjunto de *slots* do bloco principal;
- E: conjunto de *enlaces* da rede;

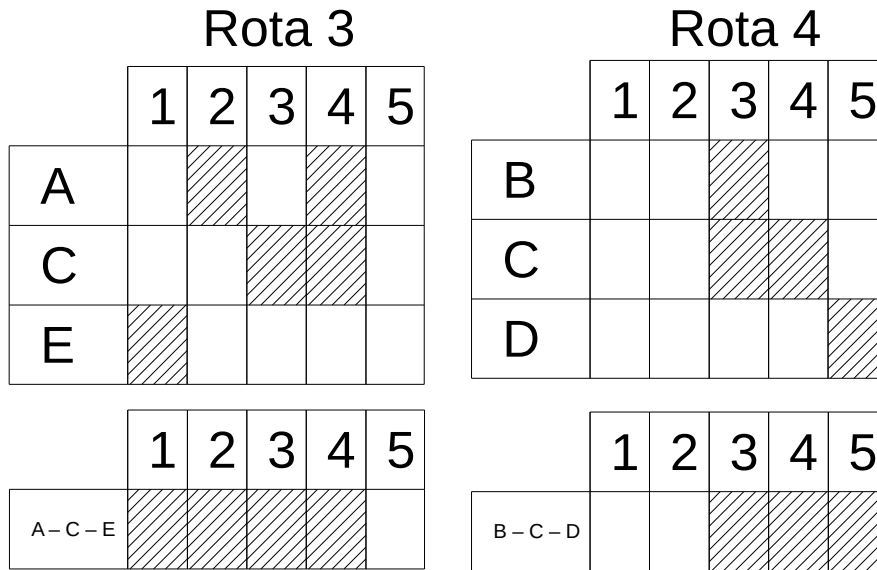


Figura 3.10: Mesclagem dos *enlaces* que compõem a rota.

- $L$ : quantidade de *enlaces* da rede;
- *MaiorBlocoLivre*: maior conjunto de *slots* contíguos livres;
- *TotalSlotsLivre*: somatório dos *slots* livres;
- *QuantidadeSlots*: quantidade de *slots* por *enlace*;
- *QuantidadeBlocosLivre*: quantidade de blocos livres em uma rota;

### 3.4 Métricas que quantificam a fragmentação de espectro geral na EON

A rede de exemplo é apresentada na Figura 3.11, onde todos os *enlaces* são bidirecionais, possuindo uma grade flexível de seis *slots*. A utilização do espectro é apresentada através das hachuras.

As métricas que avaliam a fragmentação de espectro da rede possuem a característica de observar a distribuição de canais ópticos em todos os *enlaces* da rede. Foram identificadas três estratégias distintas, por meio das métricas propostas na literatura, que levaram a proposição das subcategorias a seguir:

- **Ciente do Maior Bloco**: essa estratégia leva em consideração o maior bloco contíguo de *slots* livre presente por *enlace*, de forma que a fragmentação de espectro seja uma relação entre o maior bloco contíguo livre e a quantidade total de *slots*

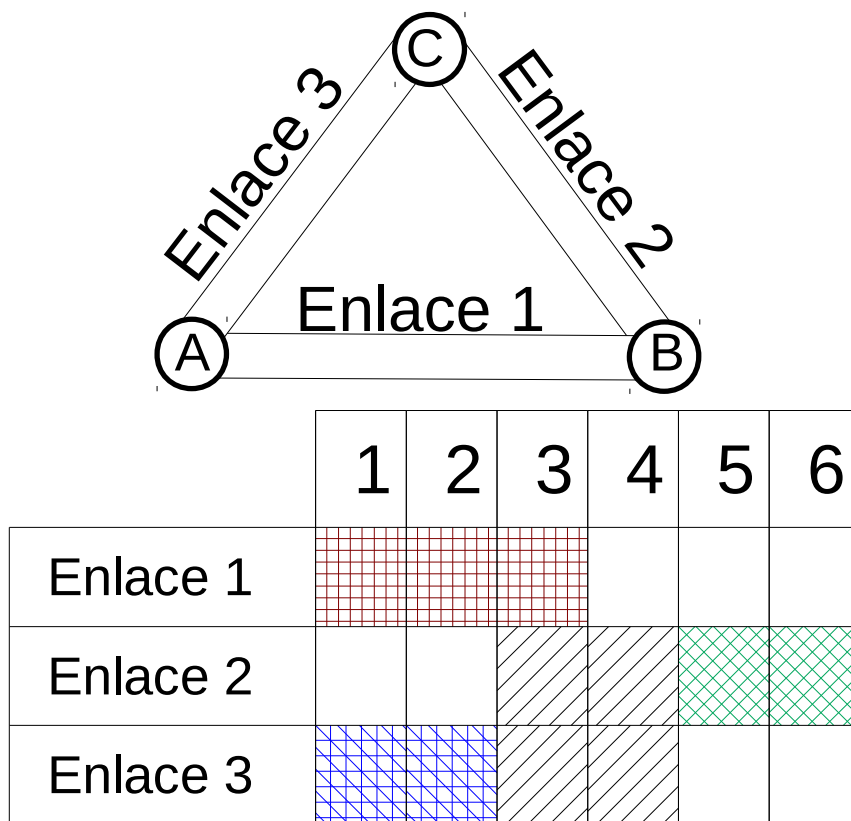


Figura 3.11: Rede de exemplo com a utilização do espectro.

livre. Em geral, a utilização de métrica com esse tipo de proposta se torna falha quando vários *enlaces* são avaliados, pois analisam os *enlaces* como sendo camadas sobrepostas e independentes, tornando-se o principal erro dessa estratégia. Ao ignorar que a disposição dos slots livres pode não ser contínua entre as camadas, essa estratégia faz com que o resultado de 0% de fragmentação de espectro seja irreal.

- **Ciente dos Recursos disponíveis:** essa estratégia observa a quantidade de *slots* disponíveis em cada *enlace* e calcula quantos canais ópticos poderiam ser alocados. Porém, a previsão dos canais ópticos é obtida apenas na dimensão de contiguidade de espectro no *enlace*, não atendendo à característica de continuidade de espectro. Tornando a predição de alocação de espectro falha e irreal, pois, em muitos casos, a análise de contiguidade de espectro pode determinar que não existe fragmentação de espectro. Entretanto, nenhum canal óptico poderá ser alocado caso necessite de um caminho com mais de um *enlace*.
- **Ciente da Entropia:** nessa estratégia é levado em consideração a disposição dos *slots*, realizando, ao mesmo tempo, a análise de contiguidade de espectro e de organização do espectro, de forma que não é avaliada a continuidade de espectro



explicitamente. A característica principal dessa estratégia é a capacidade de analisar a organização do espectro, que seria a primeira etapa da análise de continuidade de espectro. Por este fator, espera-se que as métricas dessa subcategoria tenham resultados melhores que as demais.

### 3.4.1 Ciente do Maior Bloco de *slots*

*Rosa et al. 2012* [9] e *ThieBen & Cavdar 2014* [24]: Apresentam a adaptação da tradicional métrica de fragmentação externa dos discos rígidos de [Wilson 1995], chamando-a de *Fragmentação Externa*, a Equação 3.5 realiza a razão entre o maior bloco livre e a quantidade total de *slots* livres presente no *enlace*. Observa-se que nesta equação não há investigação de blocos livres não contíguos e da continuidade do espectro, considerando o tamanho do maior bloco livre e a quantidade de *slots* livres, de forma que quando esses são iguais, para a equação, não há fragmentação de espectro. Para avaliar a fragmentação de espectro presente na rede, realiza-se a média da fragmentação de espectro obtida em cada *enlace*. Essa forma de avaliação é ineficaz, pois mesmo que os *enlaces* possuam 0% de fragmentação de espectro, como acontece no exemplo da Figura 3.11, nenhuma demanda de três *slots* pode ser alocada entre os nós *B* e *C*, ou entre os nós *A* e *C*, por não atenderem as restrições do problema RSA. Utilizar a essa equação para expressar a fragmentação de espectro geral na rede, pode levar a escolha de caminhos que não podem ser alocados.

$$f = \frac{1}{\text{QuantidadeEnlaces}} \times \sum_{l \in E} \left( 1 - \frac{\text{MaiorBlocoLivre}(l)}{\text{TotalSlotsLivre}(l)} \right) \quad (3.5)$$

*Wu et al. 2014* [33]: Propõem uma métrica para calcular o grau de continuidade de espectro através da métrica  $F_l$ , Equação 3.6.

$$F_{net} = \frac{1}{L} \sum_{l \in E} F_l = \frac{1}{L} \sum_{l \in E} \left( \frac{\text{MaiorBlocoLivre}(l)}{\text{TotalSlotsLivre}(l)} \times \frac{1}{b_l} \right) \quad (3.6)$$

$F_{net}$  denota o resultado final do grau de fragmentação da rede,  $L$  representa a quantidade de *enlaces* que a rede possui,  $E$  indica o conjunto de *enlaces* e  $b_l$  representa o somatório das bordas entre os *slots* ocupados que pode ser calculada pela Equação 3.7, o conceito de bordas instituído pelo autor são os *slots* adjacentes dos caminhos ópticos estabelecidos.  $S_l^k$  apresenta o estado do  $k$ -ésimo *slot* no *enlace*  $l$ , sendo o valor 1 quando o *slot* se encontra ocupado e 0 quando o *slot* está livre.

$$b_l = \left( \sum_{k=1}^s S_l^k \oplus S_l^{k+1} + 1 \right) / 2 \quad (3.7)$$

Na Equação 3.6,  $F_l$  é 1 quando todos os *slots* livres estão em um único bloco.  $F_l$  tende a 0 quando todos os *slots* livres estão espalhados em vários blocos não contíguos. Então quanto maior for o resultado para  $F_{net}$ , menor é a fragmentação de espectro geral na rede.

A proposta inicial dessa equação era de realizar a análise de continuidade de espectro, através da análise de contiguidade do espectro. Inicialmente essa equação pode aparentar ser uma solução melhor do que a anterior, porém, a inexistência da avaliação da continuidade de espectro faz com que o problema da métrica anterior continue, ou seja, é realizado a média de todos os *enlaces*, não efetivando a proposta de quantificar a continuidade de espectro. Assim como na métrica anterior, no caso da Figura 3.11, essa métrica também expressaria 0% de fragmentação de espectro, o que poderia levar a escolha de rotas que não poderiam ser alocadas.

### 3.4.2 Ciente dos Recursos disponíveis

*Wang et al. 2015* [34]: Definem uma métrica para a fragmentação de espectro que verifica todas as possibilidades de alocação em cada sub-bloco de *slots* contíguos e realiza o produtório destas possibilidades. Esta métrica é ciente da maior granularidade que pode ser atendida na rede, fazendo uma análise das possibilidades de alocação simultâneas, contudo, por ser ciente apenas da maior granularidade, a estratégia gera possibilidades de granularidades que não são demandadas. A métrica é dividida em duas equações, a Equação 3.8 é utilizada para quantificar as possibilidades de alocação em um bloco de *slot* livre, na qual  $n$  indica a quantidade de *slots* contíguos,  $m$  representa a maior granularidade que pode ser atendida em *slots* e  $A_n$  representa a quantidade de requisições que podem ser atendidas o bloco de tamanho  $n$ .

$$A_n = \begin{cases} 0, n = 0 \\ 1 + \sum_{i=1}^{n-i} A_{n-i}, 1 \leq n \leq m \\ \sum_{i=1} m A_{n-i}, n > m \end{cases} \quad (3.8)$$

A Equação 3.9 quantifica o grau de fragmentação do espectro realizando o produtório de cada  $A_n$ , na equação  $N$  representa o conjunto de todos os blocos livres na rede e  $n$  indica o tamanho de cada bloco Equação 3.8.

$$Frag = \prod_{n \in N} A_n \quad (3.9)$$

As alocações simuladas nessa métrica possuem apenas o *enlace* como referência, de forma que as possibilidades de alocação são maiores do que a real capacidade, ou seja, mesmo que a Figura 3.11 indique que existem dezesseis possibilidades de alocação, não é

possível alocar nenhum canal óptico que utilize os *enlaces 1 e 2* e *enlaces 2 e 3*. O que faz desta métrica uma solução ineficaz para o problema da fragmentação de espectro.

*Singh & Jukan 2016* [10]: Propõem uma métrica de fragmentação de espectro baseada na quantidade de requisições que podem ser atendidas em todos os blocos livres dividido pela quantidade de requisições que seriam atendidas caso o espectro livre estivesse totalmente contíguo, Equação 3.10. Diferente da proposta anterior, esta métrica utiliza-se da média dos *enlaces* para expressar a fragmentação de espectro. Contudo, essa métrica possui a mesma característica de realizar a previsão da alocação unicamente para o *enlace* avaliado e ao realizar a média dos *enlaces* faz com que o problema da sobreposição de camadas também apareça. Desta forma, espera-se que essa métrica não retrate com representatividade a fragmentação de espectro presente na rede, sendo sua utilização ineficaz para o problema.

$$Frag_{network} = \frac{1}{L} \times \sum_{l \in E} \left( 1 - \frac{\sum_{k=1}^{QuantidadeBlocosLivres} \binom{S_k+2}{3}}{\binom{TotalSlotsLivres+2}{3}} \right) \quad (3.10)$$

### 3.4.3 Ciente da Entropia

*Wright et al. 2015* [35]: Propõem a métrica para fragmentação de espectro baseada na entropia de *Shannon*, nesta equação são avaliados os blocos livres contíguos na rede em razão da capacidade total do *enlace*, multiplicado pelo logaritmo natural da mesma razão, Equação 3.11. Como essa equação não faz a avaliação por *enlaces*, para expressar a fragmentação de espectro na rede é realizado o somatório de todos os resultados, não considerando a organização de espectro, as possibilidades de alocação das demandas e nem os *enlaces* adjacentes. Contudo, como essa métrica não tem a abordagem por *enlace* e considera todos os sub-blocos contíguos na rede, faz com que o exemplo da Figura 3.11 não expresse a fragmentação de espectro de 0%, mas sim, indicando 40% de fragmentação de espectro da rede. Esse resultado demonstra que a estratégia proposta nesta equação, pode ter um desempenho melhor do que as equações das outras categorias.

$$H_{frag} = - \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{D} \ln \frac{D_i}{D} \quad (3.11)$$

*Altarawneh & Taebi 2015* [36] e *Sugihara et al. 2017* [37]: Utilizam a mesma métrica para quantificar o grau de fragmentação de espectro, chamada "*Entropia de Utilização*". A fragmentação de espectro da rede é calculada através da média de fragmentação de espectro dos *enlaces*, estabelecendo quatro passos para realizar este processo:

1. Para cada *slot* atribuir 1 caso esteja ocupado e 0 caso esteja livre;

2. Para cada par de *slot* contíguos, caso estejam ambos ocupados, ou livres, é atribuído o valor 0, caso apenas um deles esteja ocupado é atribuído 1;
3. Somar o resultado obtido na atribuição do passo (2);
4. Somatório do passo (3) em razão da quantidade de *slots* do *enlace*  $-1$ , Equação 3.12.

$$\frac{1}{L} \times \sum_{l \in E} \left( \frac{\text{passo3}(l)}{\text{QuantidadeSlots} - 1} \right) \quad (3.12)$$

A métrica expõe uma forma de quantificar a contiguidade de espectro, se mostrando como uma alternativa promissora, pois para o exemplo da Figura 3.11, ao invés de demonstrar 0% de fragmentação de espectro, consegue expressar uma fragmentação de espectro de 20%, indicando que de fato existe a fragmentação de espectro na rede, mesmo que os *enlaces* possuam o mesmo grau de fragmentação de espectro. Para essa métrica só é concebido 0% de fragmentação de espectro quando não há nenhum canal óptico na rede.

### 3.5 Métricas que quantificam a fragmentação de espectro no caminho óptico

As métricas que avaliam a fragmentação de espectro no caminho óptico têm a característica de avaliar a fragmentação de espectro em uma determinada rota, não conseguindo observar a fragmentação de espectro presente na rede. Para avaliar a fragmentação de espectro no caminho, geralmente os *enlaces* que formam a rota são mesclados, facilitando a avaliação da continuidade de espectro. As métricas que avaliam a fragmentação de espectro no caminho óptico podem ser divididas em:

- **Ciente da Demanda:** Possuem a característica de saber a quantidade de *slots* que o canal óptico irá necessitar, fazendo a relação entre a demanda e a capacidade disponível. Uma das características dessas equações é que caso uma demanda não possa ser alocada, elas retornam 100% de fragmentação no caminho, independente da quantidade de *slots* disponíveis no caminho;
- **Consideram Apenas os Recursos Disponíveis:** Quantificam os blocos de *slots* disponíveis para a futura alocação de canais ópticos, independente da demanda solicitada, logo quando essas equações informam 100% de fragmentação, significa dizer que não há nenhuma possibilidade de alocação para qualquer demanda.

### 3.5.1 Ciente da Demanda

*Rosa et al. 2012* [9]: Nesta equação, o grau de fragmentação de espectro em um caminho é relacionado com a largura de banda requisitada, de forma que quando um determinado caminho não possuir *slots* contíguos e contínuos para atender a uma requisição, a métrica indica que o caminho está com 100% de fragmentação de espectro. A fragmentação de espectro leva em conta a quantidade de canais ópticos, de mesmo tamanho e simultâneos, que podem ser alocados em um determinado caminho. Essa métrica é bastante difundida e faz a avaliação de contiguidade e continuidade, sendo uma opção viável para ser utilizada junto a algoritmos RSA. Na Equação 3.13,  $c$  denota a quantidade de *slots* requisitados pela largura de banda, enquanto  $Livre(c)$  é a função que retorna quantas requisições simultâneas de tamanho  $c$  podem ser realizadas no caminho.

$$F(c) = 1 - \frac{c \times Livre(c)}{TotalSlotsLivre} \quad (3.13)$$

*Yin et al. 2013* [38]: Propõem uma métrica de fragmentação de espectro que utiliza o custo de corte da contiguidade de um bloco, o custo do desalinhamento espectral que o caminho óptico poderá causar ao ser estabelecido e a capacidade espectral do caminho. Nesta equação é necessário saber, além da demanda, o primeiro *slot* do canal óptico, sendo assim esta é uma das métricas mais elaboradas, até o presente momento, do conjunto de métricas analisadas. Ela se mostra como uma das métricas mais robustas e pode ser utilizada para indicar qual o melhor *slot* para estabelecer o canal óptico. Por atender praticamente todas as características elencadas, essa métrica é a que possui a maior complexidade de tempo dentre as avaliadas, contudo por considerar as formas de contiguidade e continuidade de espectro, espera-se que possua a maior representatividade no resultado da fragmentação de espectro.

O custo do corte é calculado seguindo a Equação 3.14, referencia a quantidade de sub-blocos formados com a alocação deste caminho óptico. As entradas da função são:  $p$  é o vetor de *enlaces* que compõe o caminho,  $s$  é o índice do primeiro *slot* e  $c$  representa a quantidade de *slots* que serão utilizados na requisição. Na Equação 3.14 a função  $A_p(enlace)(slot)$  retorna 0 quando o *slot* no *enlace* está livre e 1 quando ele está ocupado.

$$Cuts(p, s, c) = \begin{cases} 0, s = 0 \vee s + c = QuantidadeSlots \\ \sum_{e \in p} (1 - A_p(e)(s - 1) \times (1 - A_p(e)(s + c))), 0 < s < QuantidadeSlots - c \end{cases} \quad (3.14)$$

O custo do desalinhamento (*Misalignment*) é calculado seguindo a Equação 3.15. Nesta função são verificados todos os *enlaces* adjacentes para cada nó que compõem

o caminho, então é verificado se os índices dos *slots* que compõe o caminho estão ocupados nos *enlaces* adjacentes, o retorno da função é a quantidade de *slots* livres que estão presentes nos adjacentes. Na Equação 3.15 a função  $source\_node(enlace)$  retorna o nó de origem do *enlace* enquanto a função  $out\_edges(node)$  retorna os *enlaces* que estão conectados ao nó pesquisado.

$$Misalignment(p, s, c) = \sum_{e \in p} \frac{\sum_{e_{adj} \in \{out\_edges(source\_node(e))\}} \sum_{i=s}^{s+c-1} 1 - A_p(e_{adj})(i)}{|out\_edges(source\_node(e))| - 1} \quad (3.15)$$

A capacidade espectral é definida pela quantidade de *slots* que o *enlace* possui. A Equação 3.16 demonstra a fórmula de como é o cálculo proposto entre a origem e o destino, *Vizinhos* representa a quantidade de *enlaces* adjacentes aos *enlaces* da rota principal e *H* representa a quantidade de saltos que o caminho utilizará.

$$F_{cnt} = Cuts(p, s, c) + \frac{Misalignment(p, s, c)}{c \times Vizinhos} + H \times \frac{c}{QuantidadeSlots} \quad (3.16)$$

*Wang et al. 2016* [39]: Propõem uma métrica de fragmentação de espectro por caminho que requer, além da demanda, o primeiro *slot* do canal óptico. É uma métrica de cálculo simples, levando em consideração apenas a quantidade de blocos livres em razão da quantidade de *slots* livres, porém é necessário realizar a diferença entre o estado atual do caminho óptico e o estado futuro, ou seja, a fragmentação de espectro para esta métrica é a diferença entre o caminho óptico sem o canal óptico e com o canal óptico estabelecido. Essa estratégia é muito utilizada por algoritmos cientes da fragmentação de espectro, podendo avaliar o impacto de alocar um determinado canal óptico. No primeiro passo, calcula-se o grau de fragmentação para cada *enlace* utilizando a Equação 3.17, armazenando o resultado em  $FD_{before}$ , após isso é alocado o caminho óptico e novamente é calculado para cada *enlace* o grau de fragmentação utilizando a Equação 3.17, armazenando em  $FD_{after}$ . O segundo passo é realizar a diferença assim como é mostrado Equação 3.18, ressaltando que em  $FD_{before}$  e  $FD_{after}$  são armazenados os somatórios de todos os *enlaces* envolvidos no caminho.

$$FD = \frac{QuantidadeBlocosLivre}{TotalSlotsLivre} \quad (3.17)$$

$$FDL = FD_{after} - FD_{before} \quad (3.18)$$

### 3.5.2 Consideram Apenas os Recursos Disponíveis

*Sócrates-Dantas et al. 2014* [40]: Propõem a métrica de fragmentação de espectro baseada em blocos livres ao longo de um caminho. Diferente das equações anteriores, não é necessário saber a demanda. Nessa proposta realiza-se a razão entre a quantidade de blocos livres e a quantidade total de *slots* livres. Pode, assim, expressar a fragmentação de espectro presente em um determinado caminho, contudo, essa é uma das métricas que se mostrou a mais imprecisa dentre as do conjunto avaliado por mostrar resultados imprecisos em seus exemplos no artigo de referência, não sendo avaliada como uma métrica recomendável de utilização. A Equação 3.19 calcula a quantidade total de blocos livres e o total de *slots* no espectro.

$$F_{gap} = 1 - \frac{\text{QuantidadeBlocosLivres}}{(\text{QuantidadeSlots} - 2)/2} \quad (3.19)$$

*Singh & Jukan 2016* [10]: A mesma métrica da sessão 3.4.2 aplicada ao caminho, ou seja, uma métrica de fragmentação de espectro baseada na quantidade de requisições que podem ser atendidas em todos os blocos livres dividido pela quantidade de requisições que seriam atendidas caso o espectro livre estivesse totalmente contíguo. Ao aplicar a métrica no caminho, gera-se um resultado mais representativo, pois as possibilidades de alocação, neste caso, considera a contiguidade e continuidade de espectro. A Equação 3.20 elucida o cálculo, onde  $S_k$  representa a quantidade de *slots* do  $k$ -ésimo bloco livre.

$$Frag_{path} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{\text{QuantidadeBlocosLivres}} \binom{S_k+2}{3}}{\binom{\text{TotalSlotsLivres}+2}{3}} \quad (3.20)$$

## 3.6 Resumo Conclusivo

Nesse capítulo, abordou-se o tema da fragmentação em *Elastic Optical Network*. Abordou-se ainda, as particularidades entre o contexto clássico da fragmentação em ciência da computação e a fragmentação de espectro em EON.

As métricas de fragmentação de espectro estudadas levaram a proposição das categorias e subcategorias apresentadas nas sessões anteriores e forneceram argumentos sólidos para a identificação das características elencadas para uma boa métrica de fragmentação de espectro: (i) Contiguidade que represente os *slots* livres e as possibilidades de alocação das granularidades demandantes; (ii) Continuidade que represente a organização do espectro e as possibilidades de alocação das granularidades demandantes; (iii) Não utilizar estratégias de cálculo de média, ou produto, envolvendo *enlaces* a fim de realizar uma boa representação de fragmentação de espectro. Mostrou-se evidente a necessidade de atender

as restrições de continuidade e contiguidade de espectro, de modo que ao ignorá-las, a métrica torna-se ineficaz.

O problema da fragmentação de espectro é, de fato, o principal desafio para a *Elastic Optical Network*. Como foi apresentado, a literatura determina que quanto maior a fragmentação de espectro, maior é a probabilidade de bloqueio na rede. Comprovar essa premissa por meio de uma métrica, que quantifique de forma precisa a fragmentação de espectro na EON é o objetivo de várias pesquisas, contudo não é uma atividade trivial. Entretanto, após a análise das propostas das métricas de fragmentação de espectro geral na EON e a evidenciação das falhas e induções erradas a cerca da fragmentação de espectro, levanta-se a indagação a respeito da sua efetividade.

Para as métricas da categoria de fragmentação de espectro no caminho óptico, a comprovação da premissa torna-se menos complexa e mais objetiva. Diminuir a fragmentação de espectro em um caminho óptico, isto é, em um conjunto de *enlaces*, aumenta a capacidade de alocação de largura de banda, entretanto não comprova a premissa do problema de fragmentação, pois ao diminuir a fragmentação de espectro em um determinado conjunto de *enlaces*, pode aumentar a fragmentação de espectro em vários outros conjuntos de *enlaces*.

Assim, é necessário que as métricas propostas sejam comparadas, a fim de avaliar a sua efetividade em relação a premissa do problema de fragmentação de espectro.



# Capítulo 4

## Avaliação de Desempenho das Métricas de Fragmentação de Espectro

No capítulo anterior, aprofundou-se o estudo sobre a fragmentação de espectro em Elastic Optical Network, no qual se tornaram evidentes as diferenças e singularidades em relação ao contexto clássico da fragmentação em ciências da computação. Apresentou-se, ainda, a revisão da literatura das métricas de fragmentação de espectro, propondo então as categorias e subcategorias:

1. Métricas que quantificam a fragmentação de espectro geral na EON

- Ciente do Maior Bloco;
- Ciente dos Recursos Disponíveis;
- Ciente da Entropia.

2. Métricas que quantificam a fragmentação de espectro no caminho óptico

- Ciente da Demanda;
- Ciente Apenas dos Recursos Disponíveis.

As métricas foram identificadas, analisadas e categorizadas de acordo com as suas características. Também foi observado que as propostas para fragmentação de espectro geral na EON, em muitos casos, não eram efetivamente avaliadas, ou seja, apenas havia a proposta de como mensurá-las. Para as métricas de fragmentação de espectro no caminho óptico, foi identificado que, em muitos casos, eram agregadas a outras estratégias e incorporadas no algoritmo RSA.

Neste contexto, este Capítulo apresenta a avaliação de desempenho das propostas de métricas de quantificação da fragmentação de espectro, em um cenário de simulação mais completo, a fim de comprovar a efetividade das métricas propostas na literatura.

## 4.1 Metodologia para Avaliação de Desempenho

A taxa de bloqueio de largura de banda (*Bandwidth Blocking Ratio - BBR*) é considerada a principal métrica na EON, em todos os estudos avaliados, porém, uma comparação entre fragmentação de espectro e taxa de bloqueio é inexistente. Desta forma, as métricas serão testadas de forma que sejam utilizadas como parâmetro de decisão para a alocação de recursos. Avaliando a eficiência dos resultados, para validar a hipótese de que quanto menor a fragmentação de espectro, menor a probabilidade de bloqueio de largura de banda [9]. O estudo de avaliação de desempenho foi dividido em duas partes:

- Avaliar a eficiência das métricas de fragmentação de espectro geral na EON, quando utilizadas para alocar canais ópticos que tenham o menor impacto na fragmentação de espectro geral na EON;
- Avaliar a eficiência das métricas de fragmentação de espectro no caminho óptico, quando utilizadas para identificar as rotas com menor índice de fragmentação de espectro.

Foi utilizado o *Optical Network Simulator WDM/EON - ONS*, simulador para redes ópticas elásticas [41]. Sendo implementados todos os algoritmos, e suas modificações, as políticas de alocação e as métricas de fragmentação de espectro.

Os *slots* foram utilizados seguindo o padrão de 12,5 GHz determinado pela ITU-T, contendo em cada *enlace* 400 *slots*. A modulação utilizada foi a *BPSK* com alcance de 4.000 KM, transmissão de um bit por símbolo e capacidade de banda de 12,5 Gb/s por *slot*. A capacidade máxima de cada BVT foi de 80 *slots*.

Cada simulação foi realizada cinco vezes utilizando o método de replicações independentes. Os resultados foram calculados com intervalos de confiança de 95% de confiabilidade. Em cada simulação foram gerada 100.000 requisições de conexão para diferentes níveis de carga na rede. O processo de chegada de requisições de tráfego seguiu a distribuição de *Poisson*.

Como solução para o problema de roteamento do RSA, os algoritmos escolhidos foram o *Shortest Path* (SP) e o *K-Shortest Path* (KSP), o peso é utilizado como a distância do *enlace*. O algoritmo SP gera a menor rota possível, entre o nó de origem e o nó de destino. Enquanto o algoritmo KSP gera as *k*'s menores rotas possíveis, entre o nó de origem e o nó de destino. O algoritmo SP foi considerado como referência de desempenho, enquanto o

algoritmo KSP foi modificado para ser utilizado nos experimentos, para que fosse possível a escolha da rota com menor índice de fragmentação de espectro. Como solução para o problema de alocação de espectro, foi utilizado a política de alocação *First-Fit*, por possuir o melhor desempenho com a menor complexidade de tempo, como é apresentado nas Figuras 4.16 a 4.18, corroborando com os trabalhos [9, 2] que também comprovam a eficiência desta política de alocação perante as demais.

Os cenários avaliados foram as principais topologias de rede ópticas, *NSFNET* e *USANET*, acrescida da topologia de rede *PanEuro*. A topologia *NSFNET* possui 14 nós e 42 *enlaces* (Figura 4.1), a topologia *USANET* possui 24 nós e 86 *enlaces* (Figura 4.2) e a topologia *PanEuro* possui 27 nós e 82 *enlaces* (Figura 4.3).

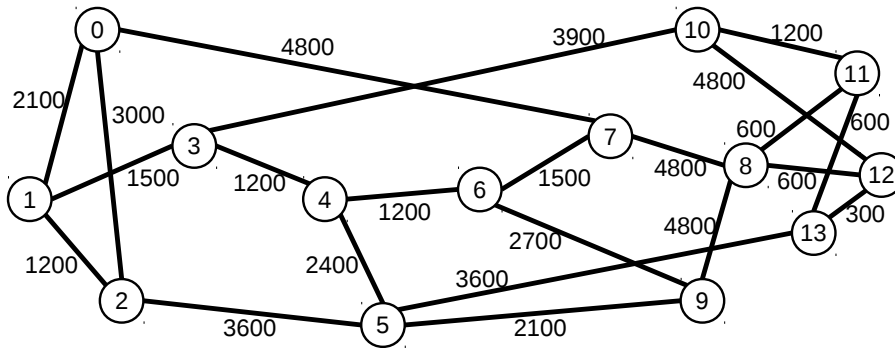


Figura 4.1: Topologia NSFNET.

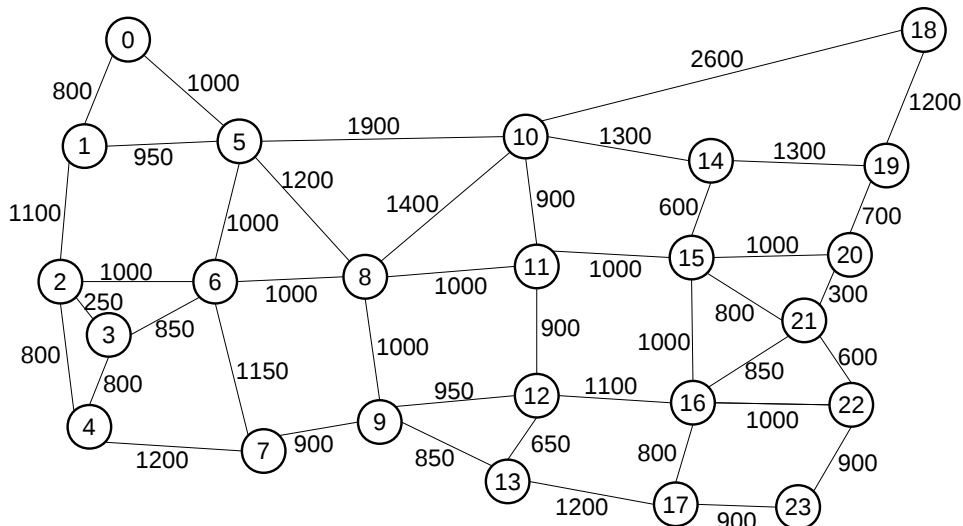


Figura 4.2: Topologia USANET.



quatro cenários avaliados, nota-se que quanto maior o valor de " $r$ ", maior é a capacidade de alocação de recursos na rede. Nota-se que o desempenho é próximo nas soluções com  $r$  maior que quatro e iguais a partir de oito, de forma que os próximos estudos são conduzidos observando principalmente esses casos.

Os resultados para topologia *NSFNET* são apresentados nas Figuras 4.4 a 4.7.

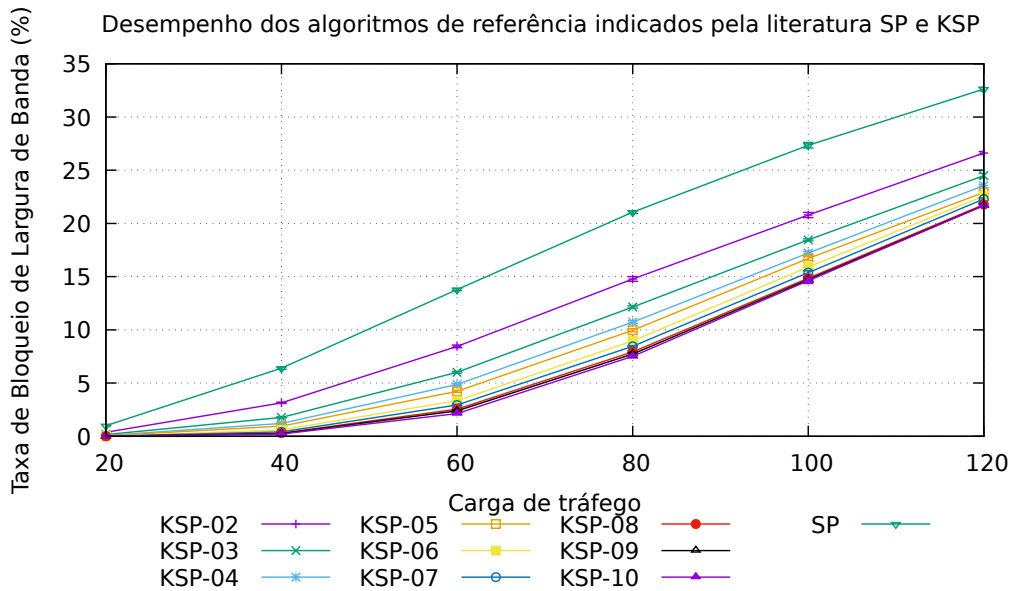


Figura 4.4: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

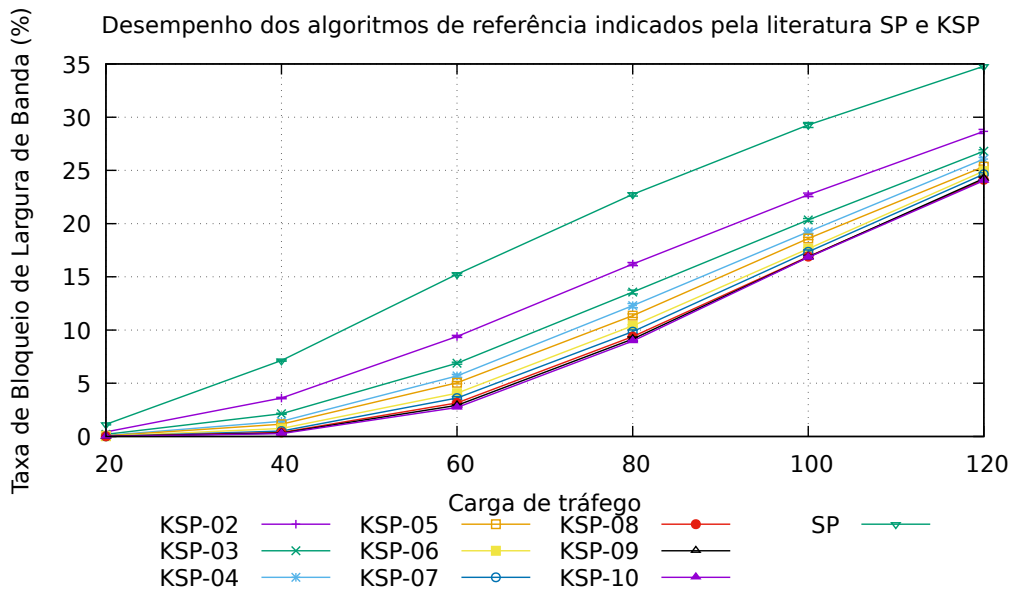


Figura 4.5: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de dois *slots*.

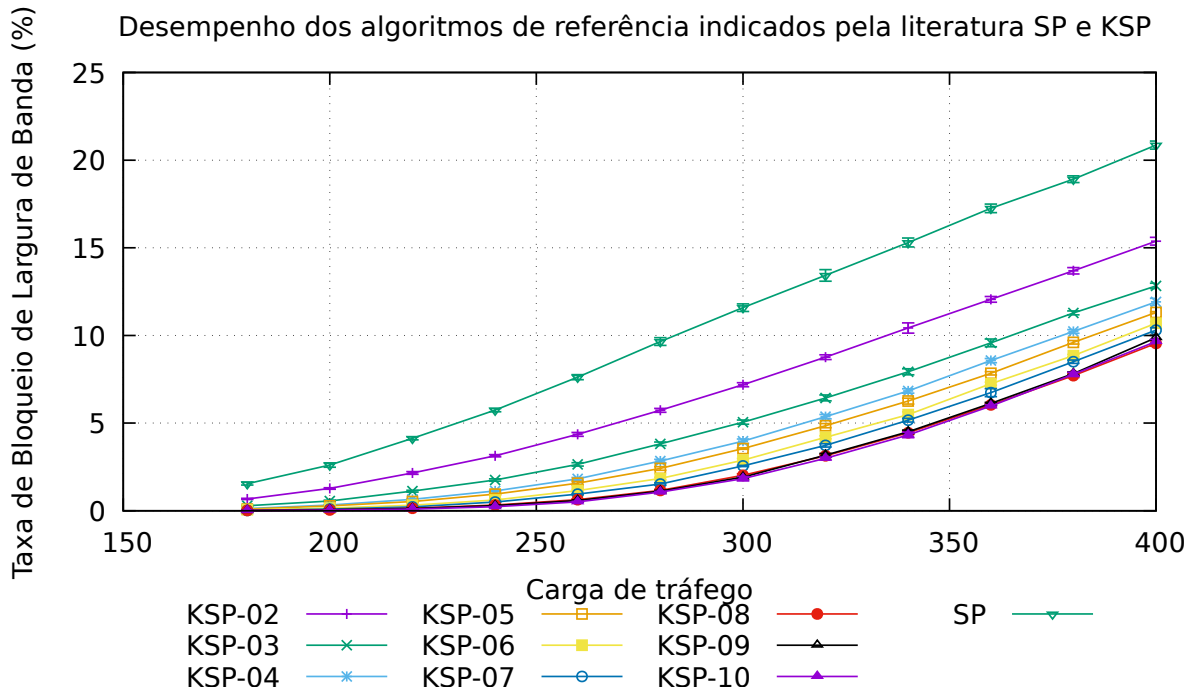


Figura 4.6: Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de um *slot*.

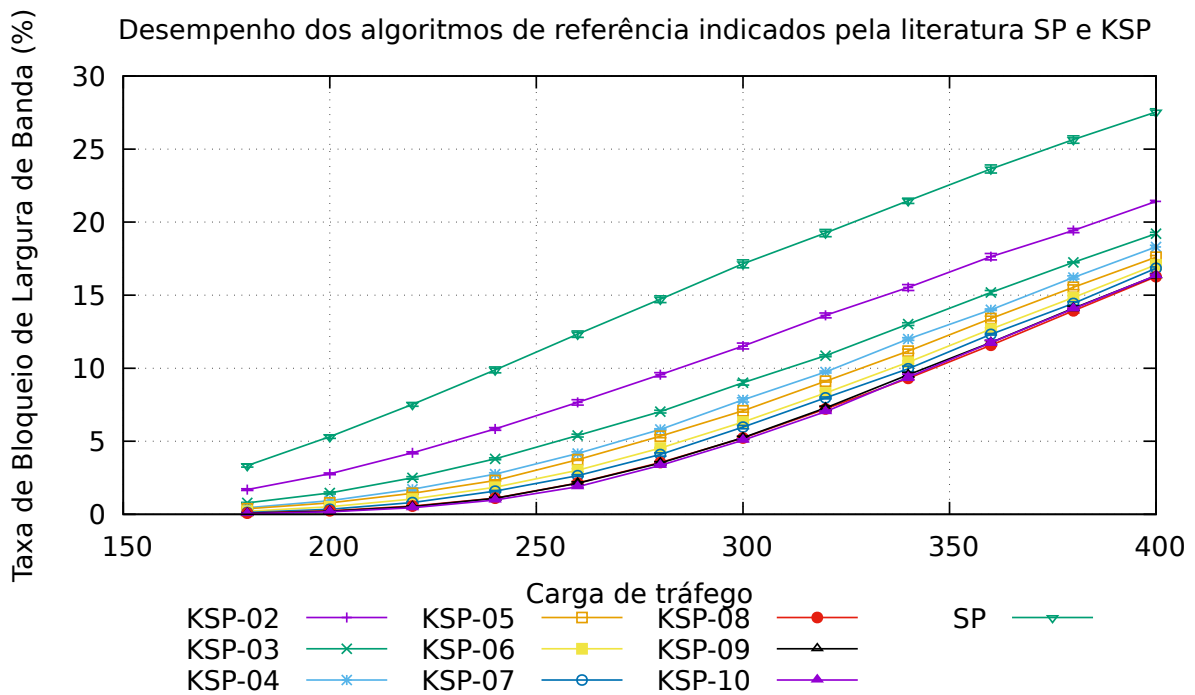


Figura 4.7: Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de dois *slots*.

Os resultados para topologia *PANEURO* são apresentados nas Figuras 4.8 a 4.11.

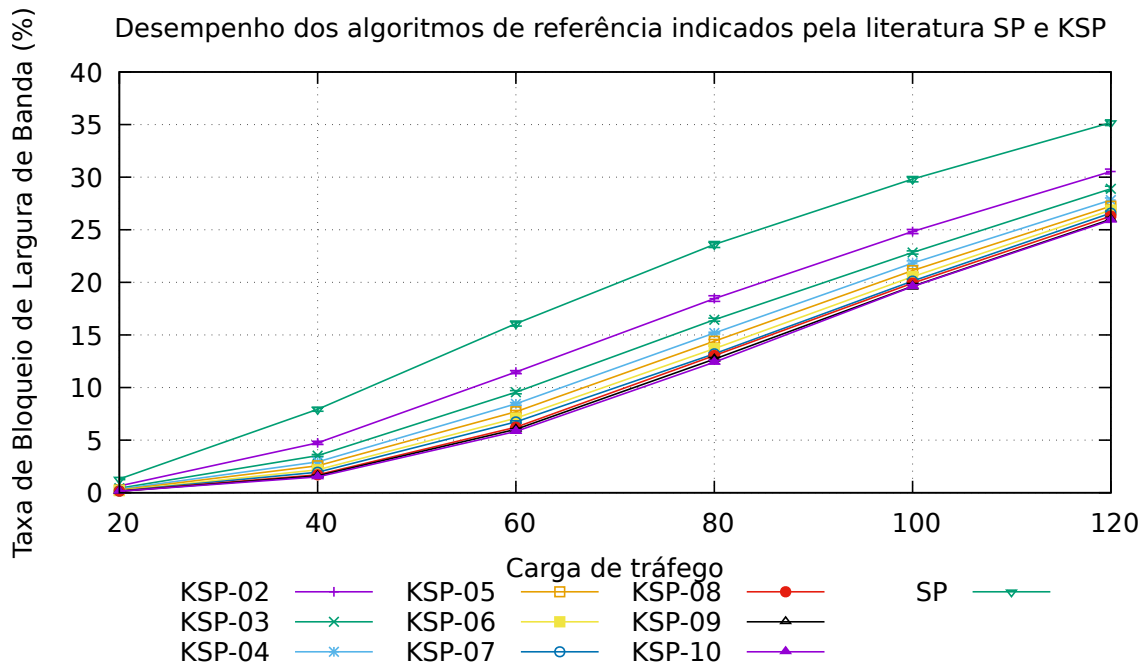


Figura 4.8: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

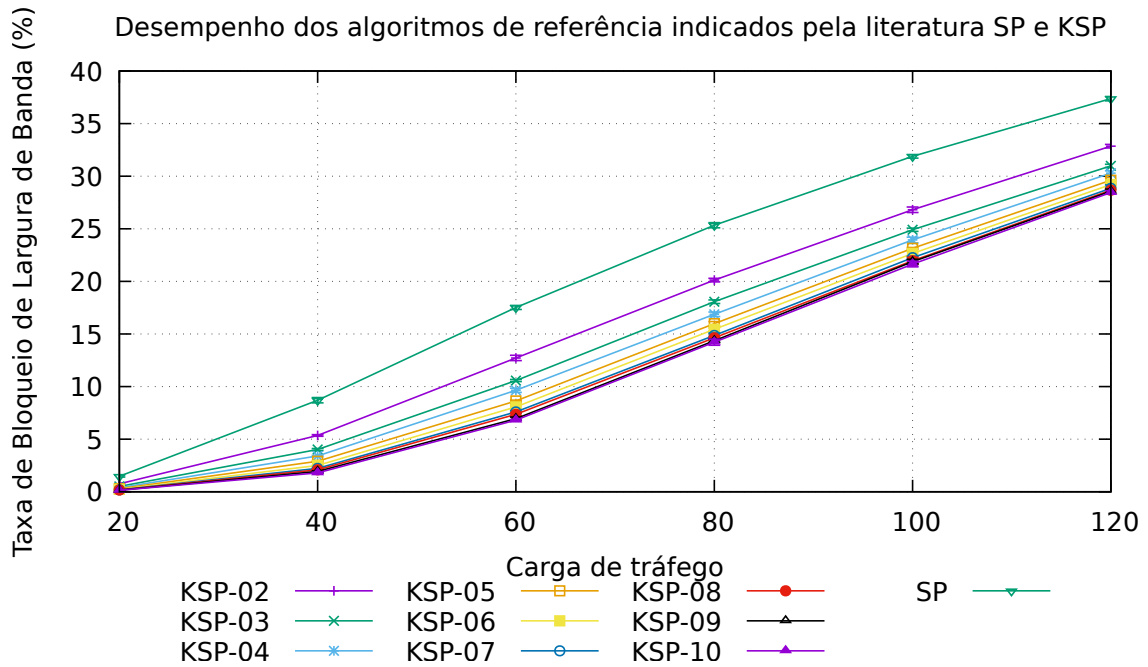


Figura 4.9: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de dois *slots*.

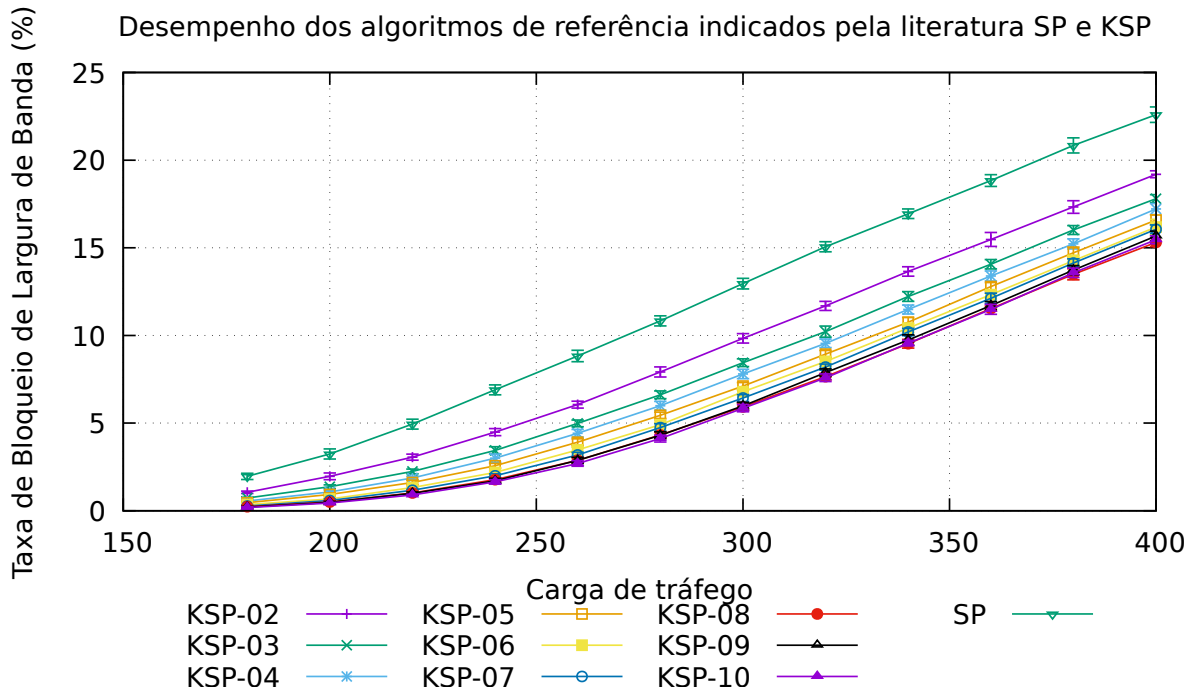


Figura 4.10: Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de um *slot*.

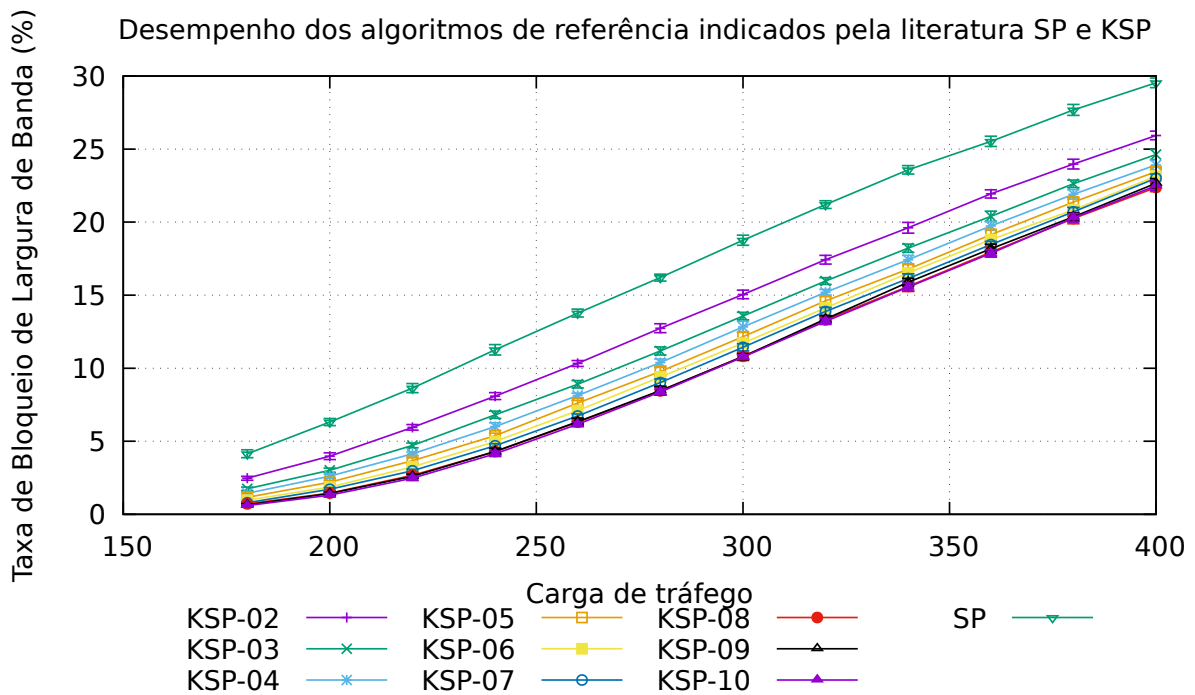


Figura 4.11: Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de dois *slots*.



Os resultados para topologia *USANET* são apresentados nas Figuras 4.12 a 4.15.

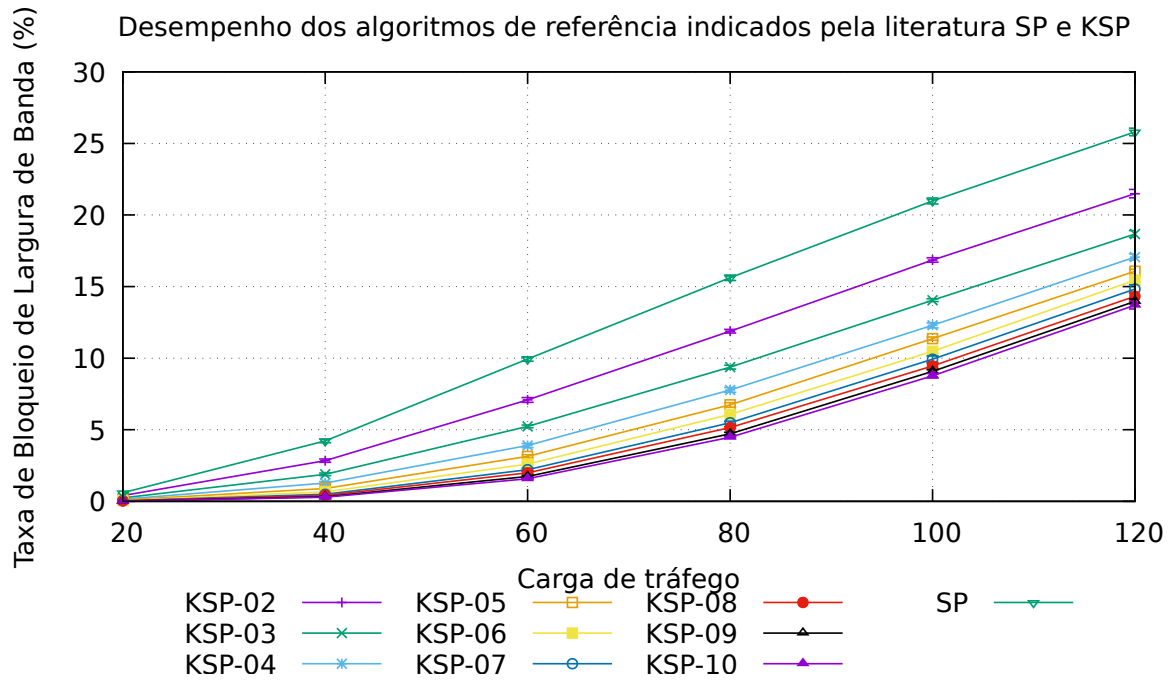


Figura 4.12: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

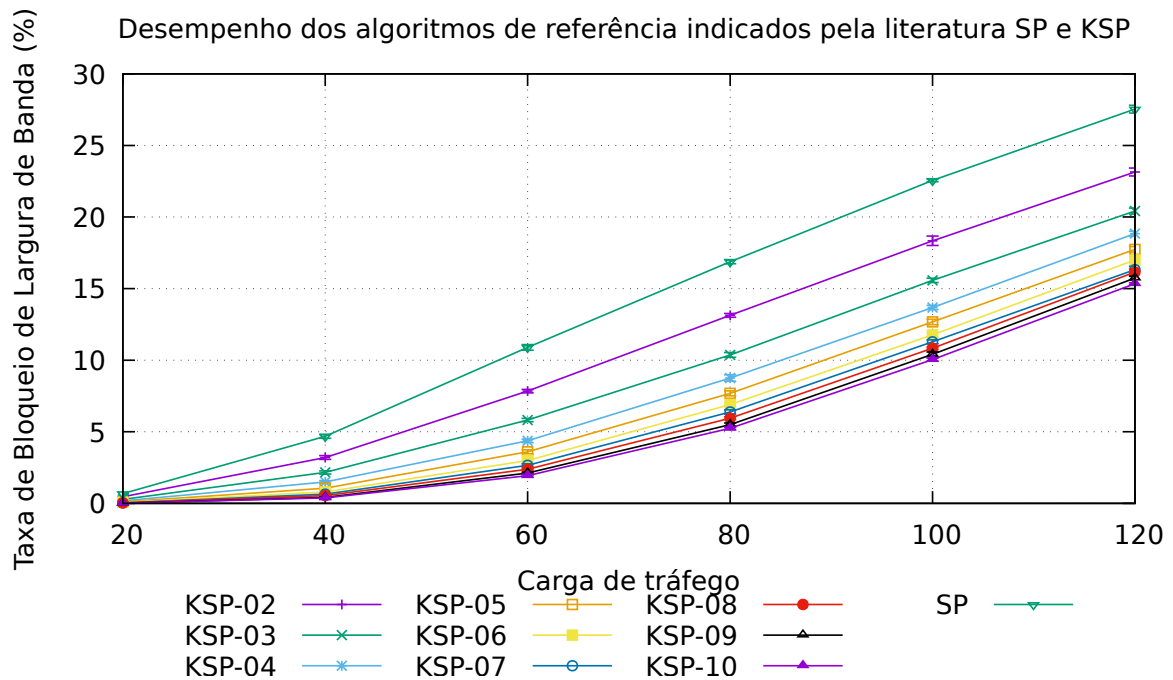


Figura 4.13: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de dois *slots*.

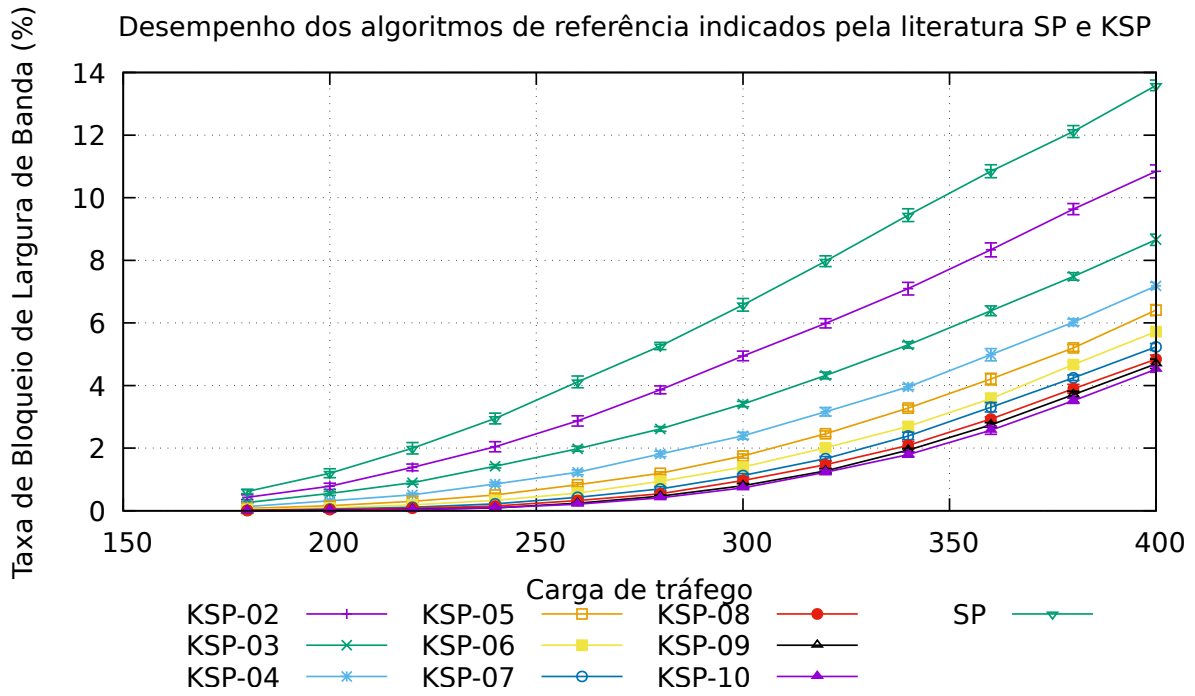


Figura 4.14: Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de um *slot*.

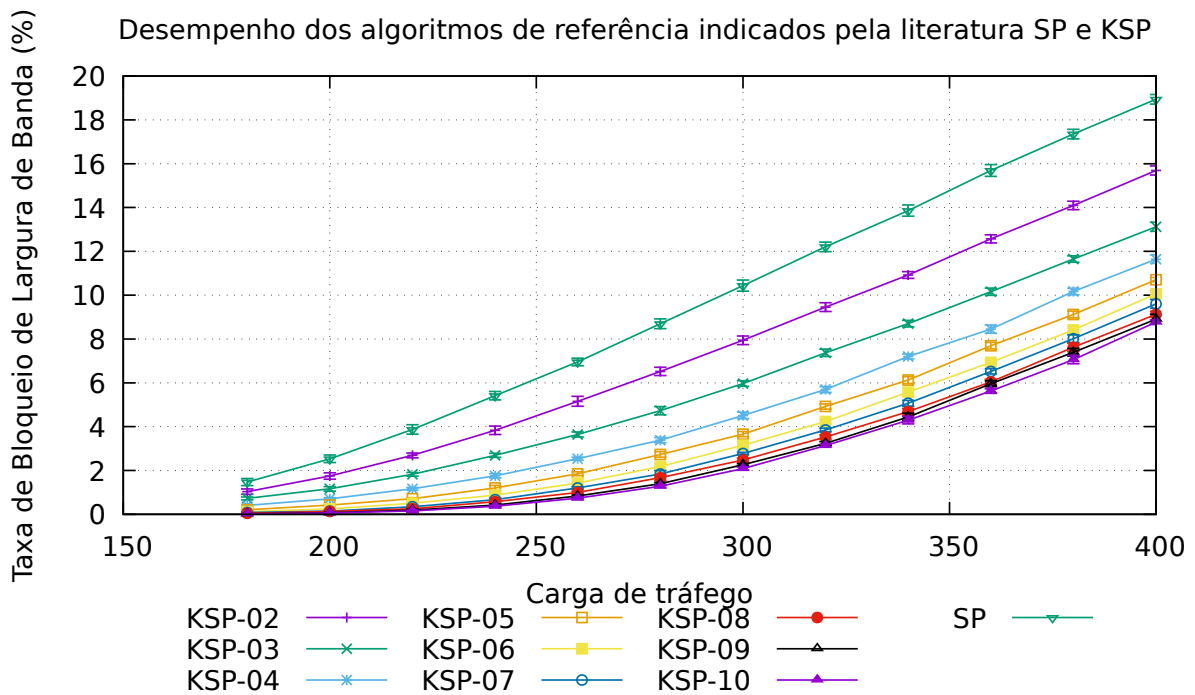


Figura 4.15: Resultado para a configuração de tráfego dois, com GB de dois *slots*.

As variações de granularidades não impactaram no desempenho das soluções, logo os demais resultados apresentados seguem o padrão de tráfego *T1* e com um *slot* de banda de guarda.

## 4.2.2 Políticas de Alocação de Espectro

A comparação das políticas de alocação de espectro foi realizada com o algoritmo de roteamento KSP. É demonstrado que as políticas de alocação *First Fit* e *Exact Fit* são equivalentes, porém o algoritmo de alocação *First Fit* possui complexidade de tempo inferior ao *Exact Fit*, o que faz dessa política de alocação a mais utilizada na literatura.

O desempenho do algoritmo *Exact Fit* na rede EON não é o mesmo quando aplicado ao problema de alocação de memória, devido ao fato de que na rede EON, a composição do caminho gera várias camadas sobrepostas, que nem sempre possuem continuidade de espectro do tamanho exato da demanda, levando o algoritmo a se comportar como o algoritmo *First Fit*, em muitos casos. Porém, com um custo de complexidade de tempo muito elevado.

Os resultados para topologia *NSFNET* são apresentados na Figura 4.16.

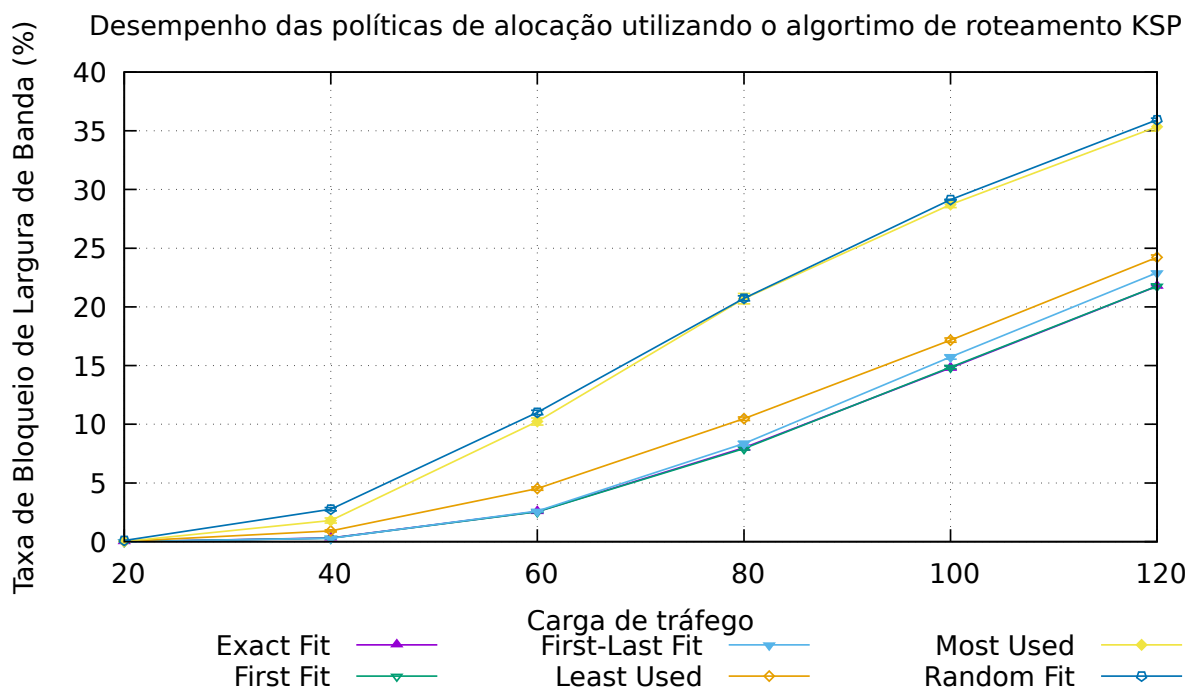


Figura 4.16: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

Os resultados para topologia *PANEURO* são apresentados na Figura 4.17.

Os resultados para topologia *USANET* são apresentados na Figura 4.18.

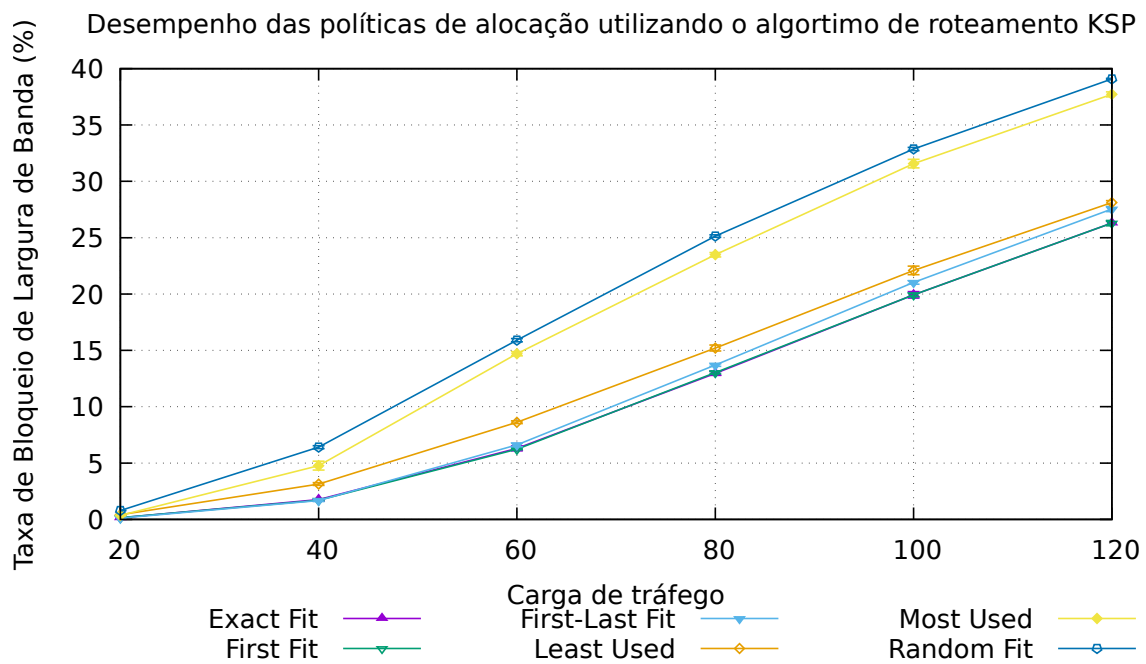


Figura 4.17: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

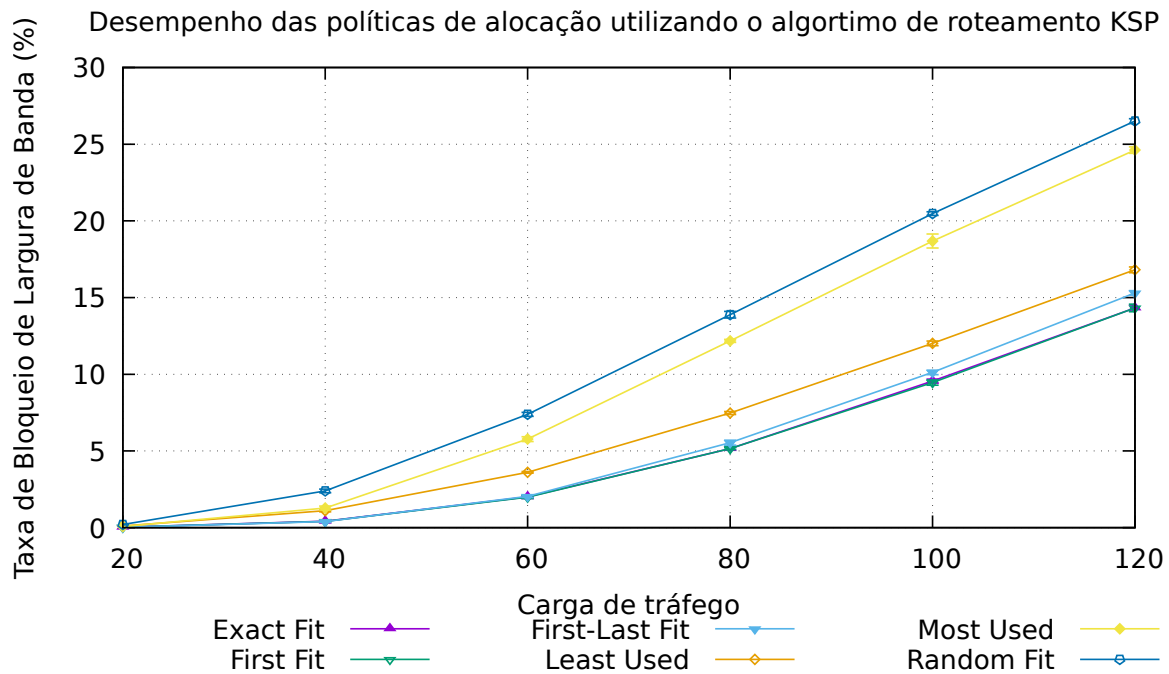


Figura 4.18: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

### 4.2.3 Métricas de Fragmentação de Espectro Geral na EON

O segundo estudo tratou das métricas de fragmentação de espectro geral na EON. O algoritmo RSA foi modificado para que através das  $r$ 's menores rotas, ele escolhesse a rota que impactaria menos a rede no ponto de vista da fragmentação de espectro para a métrica. O esquema da simulação é apresentado na Figura 4.19. Para facilitar a visualização, as propostas da literatura foram numeradas de acordo com a ordem expressa no Capítulo 3, referenciadas pelo termo "*PropX*", onde  $X$  representa o número seguindo a numeração:

#### Ciente do Maior Bloco

01. Rosa et al. 2012 [9] e Thießen & Çavdar 2014 [24];
02. Wu et al. 2014 [33];

#### Ciente dos Recursos Disponíveis

03. Wang et al. 2015 [34];
04. Singh & Jukan 2016 [10];

#### Ciente da Entropia

05. Wright et al. 2015 [35];
06. Altarawneh & Taebi 2015 [36] e Sugihara et al. 2017 [37].

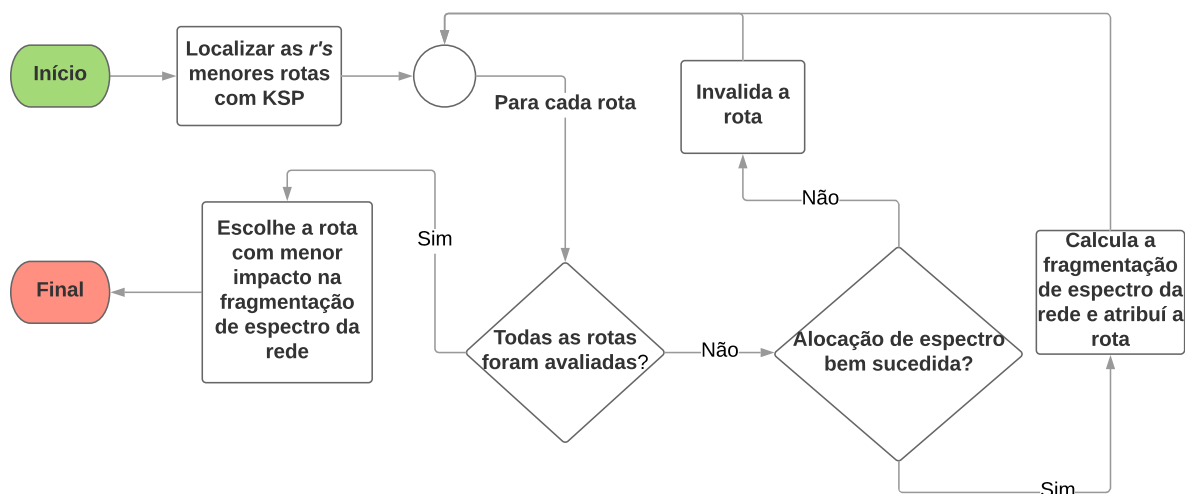


Figura 4.19: Estratégia da predição de fragmentação de espectro geral na EON.

As propostas da literatura não demonstraram uma diferença significativa ao KSP. Como os canais ópticos foram escolhidos para diminuir a fragmentação de espectro presente na rede, isso fez com que cada proposta previsse a fragmentação de espectro, sendo esperado uma melhora significativa na taxa de bloqueio de largura de banda, por essa estratégia liberar a maior quantidade de espectro possível. Os resultados apresentados da Figuras 4.20 a 4.22, tornam evidente que as métricas propostas da literatura para

quantificar a fragmentação de espectro geral na EON não obtiveram êxito, mostrando que utilizar a estratégia de rotas auxiliares, sem o adicional da fragmentação de espectro geral, é mais eficiente.

As propostas 2 e 3 das subcategorias *Ciente do Maior Bloco* e *Ciente dos Recursos Disponíveis*, mostraram um desempenho inferior ao *SP*. As propostas 2 e 3 comprovam que a inexistência da avaliação da continuidade de espectro, faz com que o problema de realizar a média, ou produtório, de todos os *enlaces*, leva a escolhas que degrada mais a rede. As propostas 1, 4 e 5 das subcategorias *Ciente do Maior Bloco*, *Ciente dos Recursos Disponíveis* e *Ciente da Entropia*, demonstraram que a forma de cálculo empregadas por elas, como foi analisado no Capítulo 3, não identifica com precisão a fragmentação de espectro na rede.

A métrica da entropia de utilização (*Prop06*), utilizada pelos autores Altarawneh & Taebi 2015 [36] e Sugihara *et al.* 2017 [37], obteve um resultado ligeiramente melhor que o *KSP*, em todas as topologias, esse resultado era esperado por ser considerado a organização do espectro em sua metodologia de cálculo, o que demonstra a importância da continuidade de espectro na elaboração de uma boa métrica para fragmentação de espectro, contudo os resultados são próximos, não indicado uma melhora significativa, visto o tempo adicional para calcular a fragmentação de espectro pela métrica.

Os resultados para topologia *NSFNET* são apresentados na Figura 4.20.

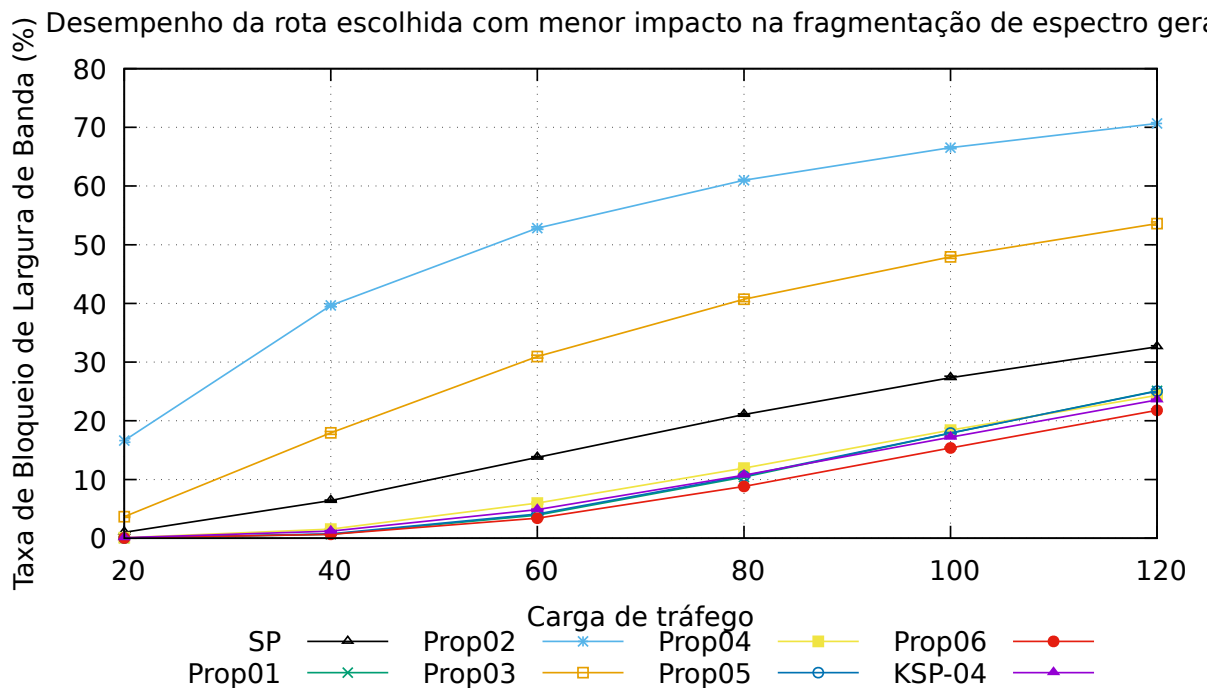


Figura 4.20: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

Os resultados para topologia *PANEURO* são apresentados na Figura 4.21.

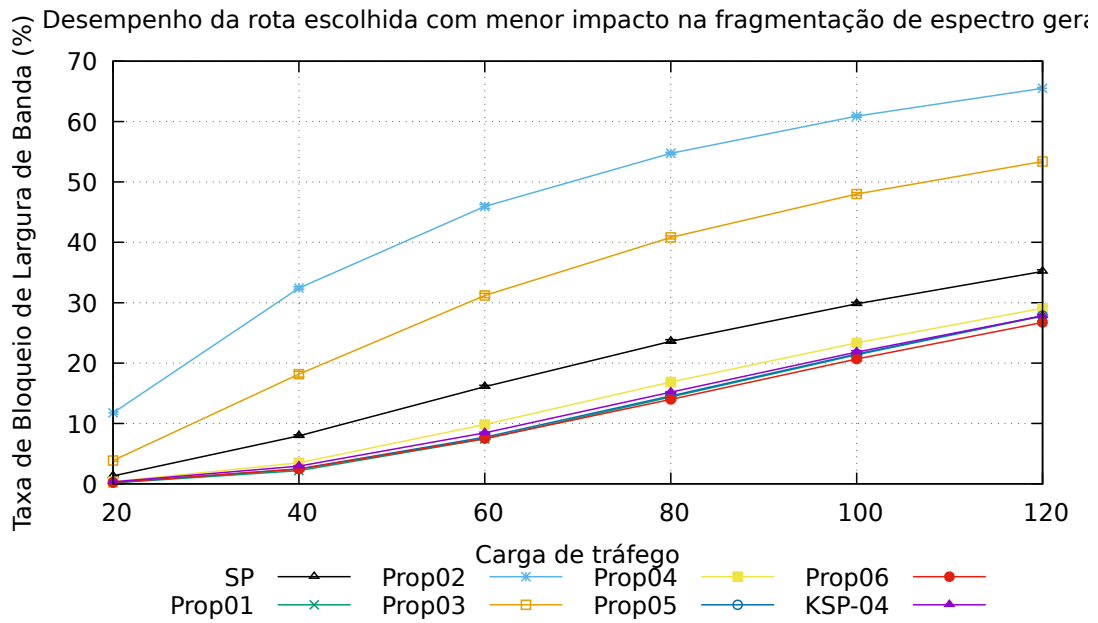


Figura 4.21: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

Os resultados para topologia *USANET* são apresentados na Figura 4.22.

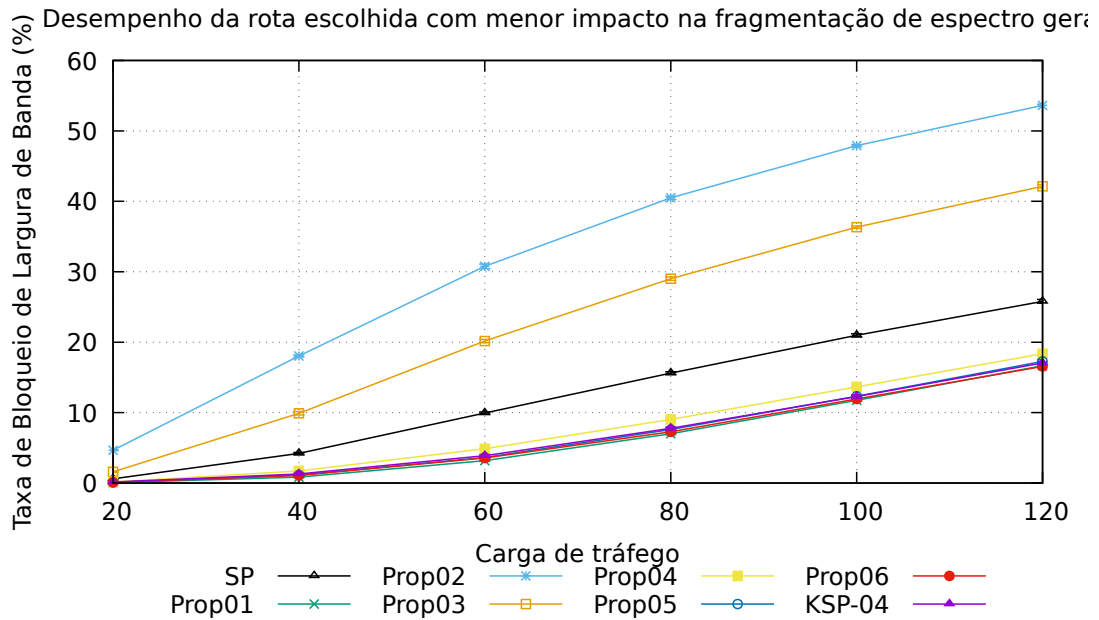


Figura 4.22: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

#### 4.2.4 Métricas de Fragmentação de Espectro Geral Aplicadas no Caminho

O terceiro estudo tratou das métricas de fragmentação de espectro geral na EON, utilizadas para quantificar a fragmentação de espectro presente no caminho óptico. O algoritmo RSA foi modificado para que calcule a fragmentação de espectro das  $r$ 's menores rotas, ordenando de acordo com o resultado. A tentativa de alocação de espectro é feita nas rotas de forma crescente. O esquema da simulação é apresentado na Figura 4.23.

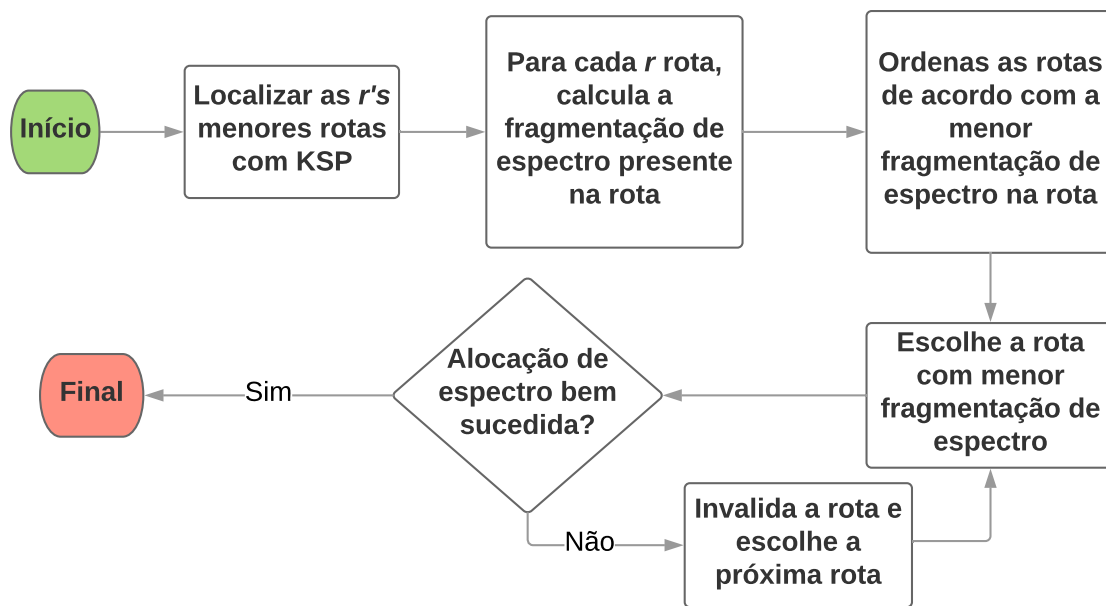


Figura 4.23: Estratégia: Ciente da fragmentação de espectro no caminho com as métricas de fragmentação de espectro geral.

O esperado desta parte do estudo é que os resultados sejam melhores do que os resultados do estudo anterior. Devido que a característica de continuidade do espectro é suprimida neste caso. Entretanto, o resultado obtido comprova que as propostas na literatura não possuem a capacidade de quantificar a fragmentação de espectro de forma representativa.

As propostas da literatura obtiveram desempenho insatisfatório, em relação ao algoritmo KSP em todas as topologias. Com exceção do resultado da topologia *USANET*, as propostas 1, 2, 3 e 6 foram piores do que o algoritmo SP. O resultado da proposta 6 comprova que a estratégia de organização do espectro, empregada na métrica, tem efeito negativo para quantificar a fragmentação de espectro, pois ao escolher o caminho menos fragmentado, houve o prejuízo na organização do espectro para os demais enlaces.



As propostas baseadas na subcategoria *Ciente do Maior Bloco*, por não considerarem os demais *enlaces* da rota, degradaram ainda mais a rede. Enquanto que a proposta da fragmentação de espectro baseada na entropia de *Shannon*, de *Wright et al. 2015* [35] (Prop05), mostrou-se como uma solução melhor em todas as topologias, diferente das demais métricas, essa proposta tinha como base a utilização do algoritmo KSP, o que justifica o desempenho superior desta proposta, quando comparada ao algoritmo.

Os resultados para topologia *NSFNET* são apresentados na Figura 4.24.

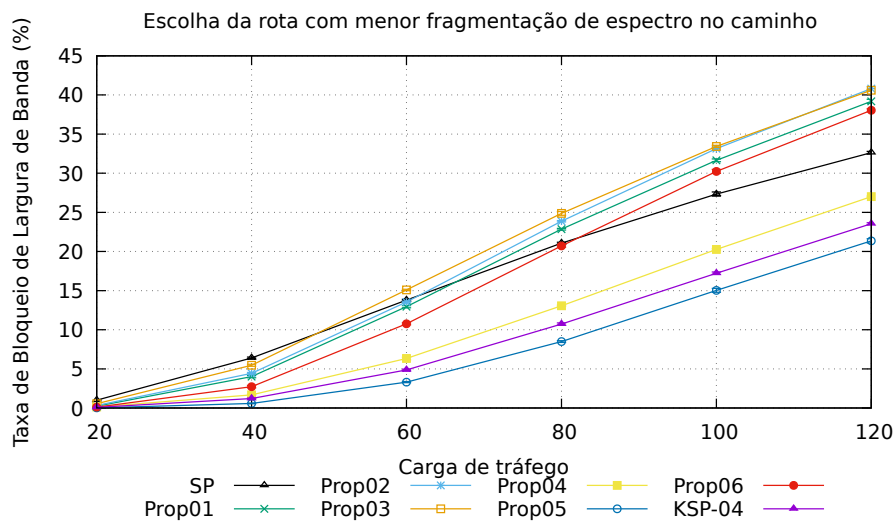


Figura 4.24: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

Os resultados para topologia *PANEURO* são apresentados na Figura 4.25.

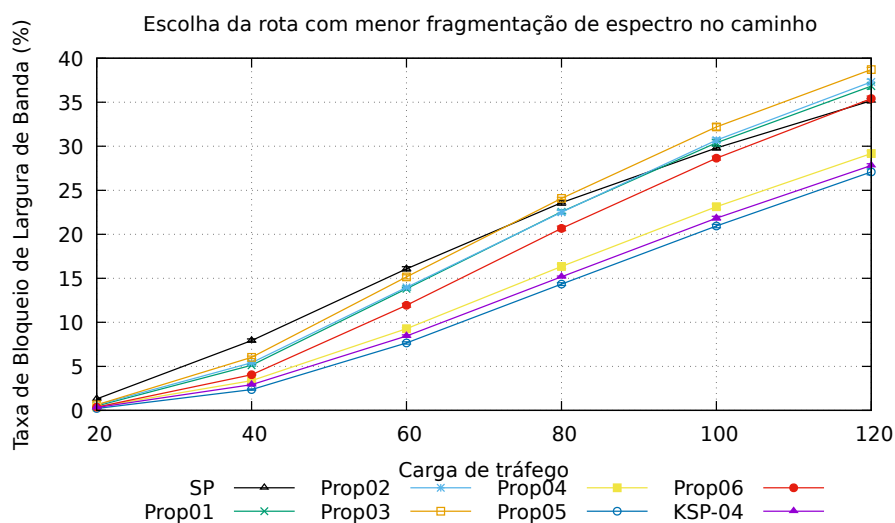


Figura 4.25: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

Os resultados para topologia *USANET* são apresentados na Figura 4.26.

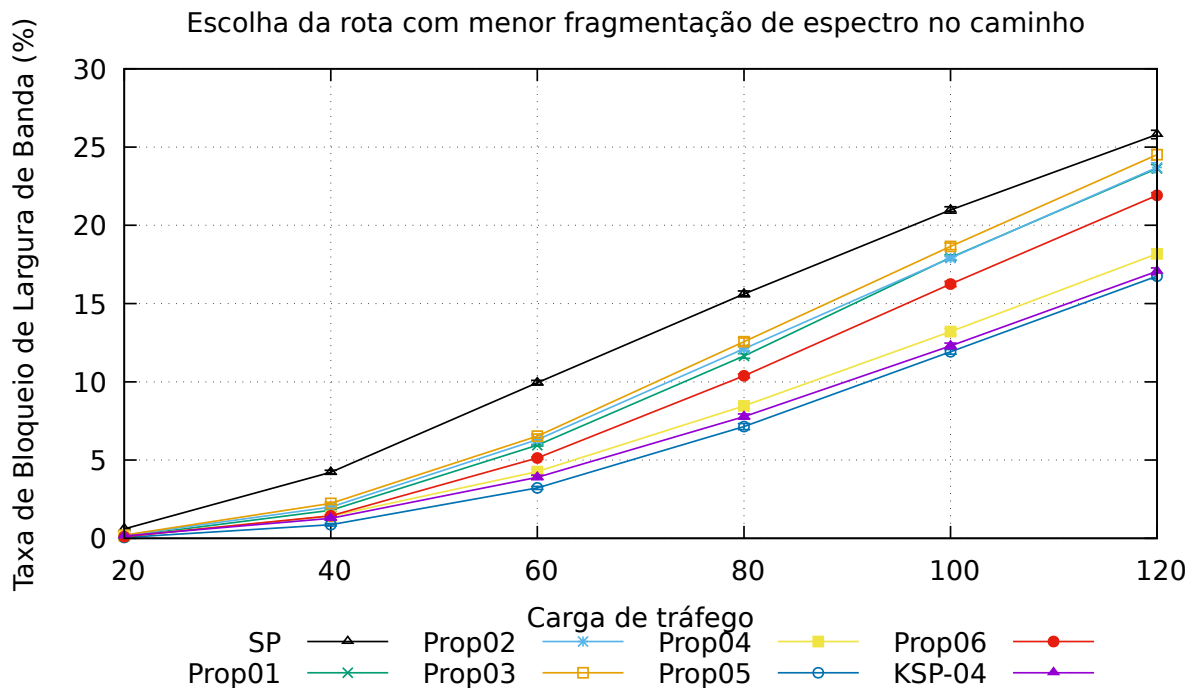


Figura 4.26: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

## 4.2.5 Métricas de Fragmentação de Espectro no Caminho Óptico

O quarto estudo tratou das métricas de fragmentação de espectro no caminho óptico. O algoritmo RSA foi modificado para que calcule a fragmentação de espectro das *r*'s menores rotas, ordenando de acordo com o resultado, a tentativa de alocação de espectro é feita nas rotas de forma crescente. O esquema da simulação é apresentado na Figura 4.23.

O esperado desta parte do estudo é que as métricas dessa classificação possuam um desempenho melhor, do que as métricas de fragmentação de espectro geral aplicadas no caminho óptico, visto que essas métricas foram elaboradas para quantificar a fragmentação de espectro no caminho óptico.

Para facilitar a visualização as propostas da literatura foram numeradas de acordo com a ordem expressa no Capítulo 3, referenciadas pelo termo "*PathX*", onde *X* representa o número da proposta, seguindo a seguinte numeração:

### Ciente da Demanda

01. *Rosa et al. 2012* [9];
02. *Yin et al. 2013* [38];

03. Wang et al. 2016 [39];

### Ciente Apenas dos Recursos Disponíveis

04. Sócrates-Dantas et al. 2014 [40];

05. Singh & Jukan 2016 [10].

Apenas as propostas 2 e 3 conseguiram se assemelhar com o resultado do algoritmo KSP, as demais propostas obtiveram um desempenho pior do que o algoritmo de referência, contudo, melhor do que o algoritmo SP. As propostas, de fato, conseguiram um desempenho melhor do que as métricas de fragmentação de espectro geral aplicadas no caminho.

As métricas propostas na literatura para quantificar a fragmentação de espectro no caminho, apesar de estarem no contexto de sua elaboração, não obtiveram um desempenho superior ao algoritmo de referência KSP. As métricas de fragmentação de espectro no caminho óptico, mostram que apenas tornar o algoritmo RSA ciente da fragmentação de espectro presente na rota, não é uma boa solução, logo deve-se adicionar mecanismos para a decisão de alocação de canais ópticos, que não dependam unicamente da fragmentação de espectro.

Para a proposta 2, de Yin et al. 2013 [38] (Path02), apesar de todas as características incorporadas pela métrica, o resultado foi semelhante ao resultado de referência do algoritmo KSP, contudo é possível que essa métrica possa ser otimizada em um algoritmo RSA.

Os resultados para topologia *NSFNET* são apresentados na Figura 4.27.

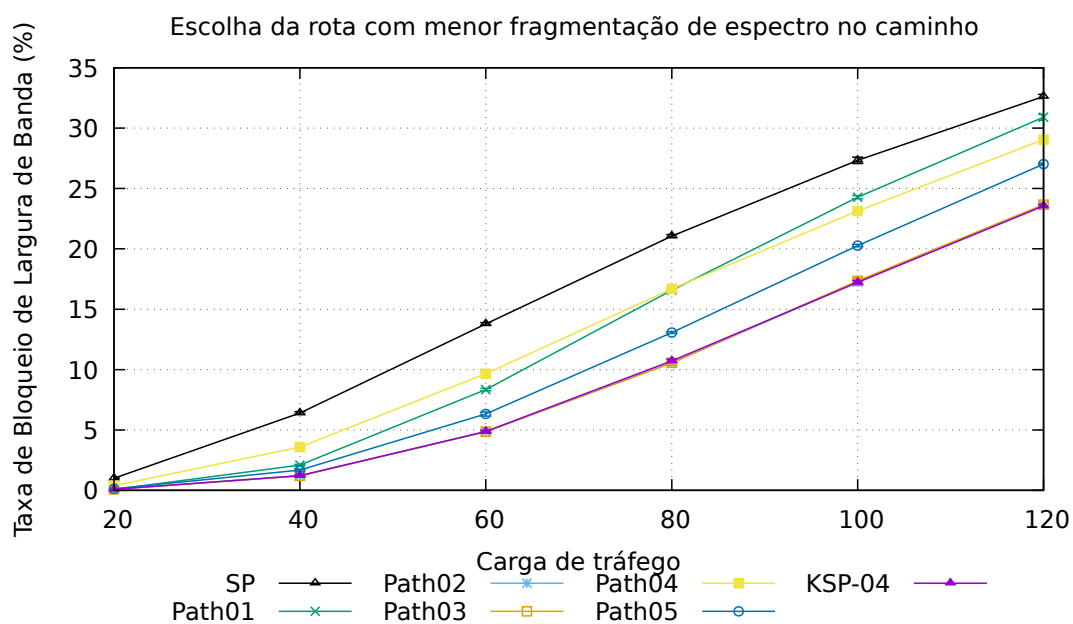


Figura 4.27: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

Os resultados para topologia *PANEURO* são apresentados na Figura 4.28.

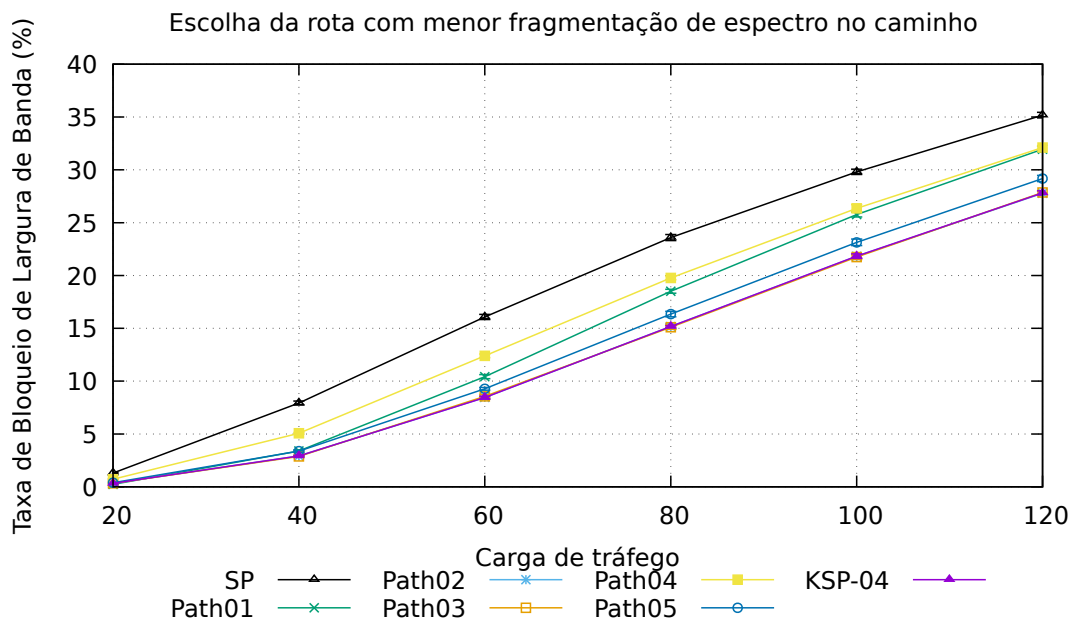


Figura 4.28: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

Os resultados para topologia *USANET* são apresentados na Figura 4.29.

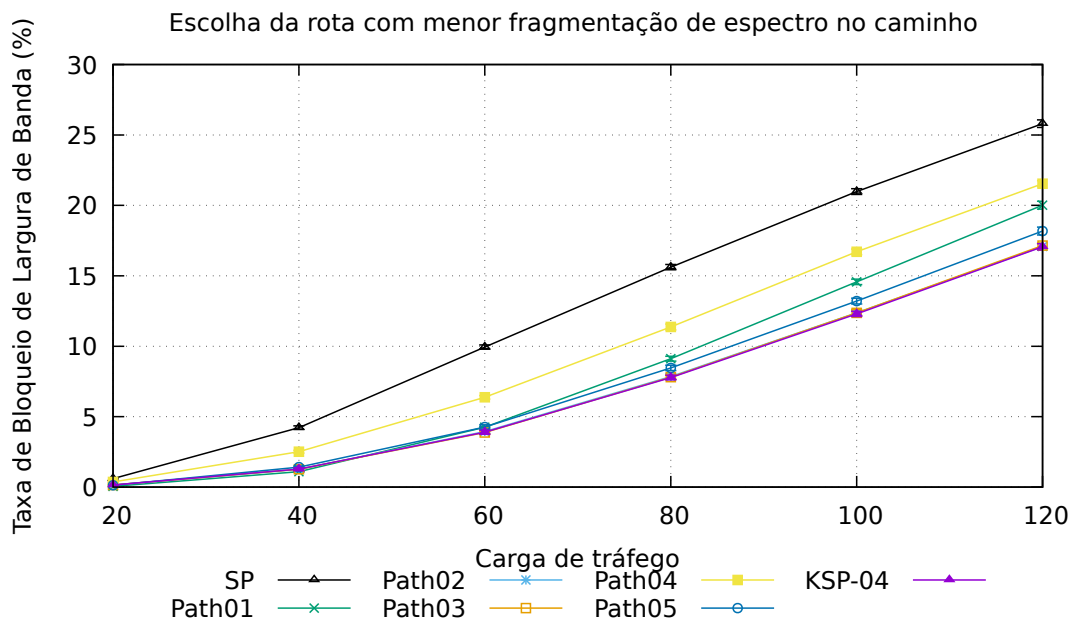


Figura 4.29: Resultado para a configuração de tráfego um, com GB de um *slot*.

### 4.3 Resumo Conclusivo

A proposta de quantificar a fragmentação de espectro, a fim de comprovar a existência da correlação entre a taxa de bloqueio de largura de banda, é alvo de várias pesquisas. Muitas propostas na literatura são expostas como métodos de quantificação da fragmentação de espectro, contudo, não são avaliadas. Esse capítulo apresentou a avaliação de desempenho das métricas propostas na literatura.

Mensurar a fragmentação de espectro geral na EON de forma confiável, ou seja, uma métrica consiga expressar um valor de fragmentação de espectro, que quando diminuído, também diminua a probabilidade de bloqueio de largura de banda. Estabelece novos paradigmas para o desenvolvimento de soluções RSA, entretando as métricas da literatura, até o momento, não são hábeis o suficiente para apresentarem resultados confiáveis.

Devido ao cenário dinâmico, elaborar uma métrica de fragmentação de espectro para quantificar a EON, não é algo trivial. A fragmentação deve indicar a proporção de espectro que não pode ser utilizada, independente da origem e destino, desta forma apenas uma métrica com as características elencadas no Capítulo 3 poderiam expressar a fragmentação de espectro de fato.

O problema de mensurar a fragmentação de espectro no caminho óptico é alvo de várias soluções RSA na literatura. Todavia, foi comprovado que utilizar apenas a métrica de fragmentação de espectro não produz resultados significativos, de forma que é necessário a incorporação de estratégias mais elaboradas.

As métricas propostas na literatura para quantificar a fragmentação de espectro geral na EON, comprovam a análise de desempenho realizadas no Capítulo 3. As propostas da subcategoria "*Ciente da Entropia*", comprovaram a importância da organização de espectro para uma métrica de fragmentação de espectro.

Os resultados desta pesquisa mostram que utilizar a métrica como parâmetro de decisão para a alocação do canal óptico, leva a escolha de caminhos longos, o que consequentemente consome mais recursos da rede e faz com que diminua a organização de espectro entre os *enlaces*, restringindo a continuidade de espectro entre os pares. Logo, a fragmentação de espectro não pode ser estudada apenas como uma comparação ao contexto clássico da fragmentação em ciência da computação. Devendo ser observada de forma multidimensional, considerando as características da contiguidade e continuidade de espectro, bem como relativizar a quantidade de espectro que pode ser utilizado em relação as demandas presentes na rede.

# Capítulo 5

## Considerações Finais e Trabalhos Futuros

O crescimento emergente do tráfego da Internet e a necessidade do aumento no desempenho das tecnologias de transmissão em fibra óptica fazem com que a rigidez das tecnologias de redes WDM tradicionais não acomode as novas demandas, pois impõe taxas fixas para as transmissões, o que leva a redução da eficiência na utilização dos recursos da rede. O conceito de redes ópticas elásticas surge como solução na literatura, por prover taxas de transmissões flexíveis que se adaptam às demandas.

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 [27, 6].

O problema de fragmentação de espectro é dado quando os recursos espectrais estão divididos em partes pequenas, o que não está diretamente relacionado com a utilização do espectro, mas com a proporção da utilização do espectro pela quantidade total do recurso espectral [9].

Contudo, o problema da fragmentação de espectro é tratado como semelhante a fragmentação de memória em arquitetura de computadores [9], isso leva a criação de métricas de fragmentação de espectro ineficazes, pois a fragmentação de memória é avaliada em uma única camada e a fragmentação de espectro deve ser avaliada nas diferentes camadas que são compostas pela ligação dos *enlaces* que compõe a rede.

No Capítulo 3, foram propostas as características para a elaboração de uma boa métrica de fragmentação de espectro:

- Contiguidade que represente os *slots* livres e as possibilidades de alocação das granularidades demandantes;

- Continuidade que represente a organização do espectro e as possibilidades de alocação das granularidades demandantes;
- Não utilizar estratégias de cálculo de média, ou produto, envolvendo *enlaces* a fim de realizar uma boa representação de fragmentação de espectro.

É vital para uma boa métrica de fragmentação de espectro relacionar a continuidade e contiguidade de espectro em sua composição. Muitas métricas de fragmentação de espectro fazem a sua avaliação individualizando os *enlace* da rede, fazendo com que o problema de fragmentação de espectro assemelhe-se ao problema de fragmentação em memória, o que leva à identificação de falsa fragmentação de espectro, pois cada *enlace* mostra a utilização de espectro entre dois nós que estão diretamente ligados.

Desse modo, o principal desafio para uma métrica de fragmentação de espectro é representar a continuidade de espectro, pois as requisições geralmente levam a caminhos que são compostos por mais de um *enlace*. Desta forma, a avaliação de continuidade de espectro torna-se uma atividade complexa, mas essencial para uma boa representação de fragmentação de espectro.

Além disso, representar a fragmentação de espectro utilizando cálculos como média, ou produto, é impossível. Uma boa métrica de fragmentação deve considerar os dois pontos tratados anteriormente, o que torna inviável a utilização dessas estratégias de cálculos, pois calcular a fragmentação de espectro em cada *enlace*, considerando unicamente a contiguidade de espectro, leva a sobreposição dos *enlaces*, podendo indicar que não existe fragmentação de espectro, mesmo que não possa ser alocado nenhum canal óptico, que necessite de uma rota composta por mais de um *enlace*.

No Capítulo 3, também foi proposto as definições das duas classes para a fragmentação de espectro. São elas:

1. **Métricas que quantificam a fragmentação de espectro geral na EON:** expressam a fragmentação de espectro considerando todos os *enlaces* presente na EON, subdivididas em:

- **Ciente do Maior Bloco:** essa estratégia leva em consideração o maior bloco contíguo de *slots* livre presente por *enlace*, de forma que a fragmentação de espectro seja uma relação entre o maior bloco contíguo livre e a quantidade total de *slots* livre. Em geral, a utilização de métrica com esse tipo de proposta se torna falha quando vários *enlaces* são avaliados, pois analisam os *enlaces* como sendo camadas sobrepostas e independentes, tornando-se o principal erro dessa estratégia. Ao ignorar que a disposição dos slots livres pode não ser contínua entre as camadas, essa estratégia faz com que o resultado de 0% de fragmentação de espectro seja irreal.

- **Ciente dos Recursos disponíveis:** essa estratégia observa a quantidade de *slots* disponíveis em cada *enlace* e calcula quantos canais ópticos poderiam ser alocados. Porém, a previsão dos canais ópticos é obtida apenas na dimensão de contiguidade de espectro no *enlace*, não atendendo à característica de continuidade de espectro. Tornando a previsão de alocação de espectro falha e irreal, pois, em muitos casos, a análise de contiguidade de espectro pode determinar que não existe fragmentação de espectro. Entretanto, nenhum canal óptico poderá ser alocado caso necessite de um caminho com mais de um *enlace*.
- **Ciente da Entropia:** nessa estratégia é levado em consideração a disposição dos *slots*, realizando, ao mesmo tempo, a análise de contiguidade de espectro e de organização do espectro, de forma que não é avaliada a continuidade de espectro explicitamente. A característica principal dessa estratégia é a capacidade de analisar a organização do espectro, que seria a primeira etapa da análise de continuidade de espectro. Por este fator, espera-se que as métricas dessa subcategoria tenham resultados melhores que as demais.

## 2. Métricas que quantificam a fragmentação de espectro no caminho óptico:

expressam a fragmentação de espectro presente no conjunto de *enlaces*, que formam a rota entre a origem e o destino, do canal óptico a ser alocado, subdivididas em:

- **Ciente da Demanda:** Possuem a característica de saber a quantidade de *slots* que o canal óptico irá necessitar, fazendo a relação entre a demanda e a capacidade disponível. Uma das características dessas equações é que caso uma demanda não possa ser alocada, elas retornam 100% de fragmentação no caminho, independente da quantidade de *slots* disponíveis no caminho;
- **Consideram Apenas os Recursos Disponíveis:** Quantificam os blocos de *slots* disponíveis para a futura alocação de canais ópticos, independente da demanda solicitada, logo quando essas equações informam 100% de fragmentação, significa dizer que não há nenhuma possibilidade de alocação para qualquer demanda.

Elaborar uma métrica que valide a hipótese do problema da fragmentação fornece novas possibilidades para o desenvolvimento de algoritmos RSA mais robustos, aumentando assim, a capacidade de alocação de recursos na rede. Entretanto, os estudos apresentados no Capítulo 4 mostram que as métricas propostas na literatura para quantificar a fragmentação de espectro geral na EON são ineficazes, pois ao utilizar a métrica para diminuir a fragmentação de espectro geral não implicou no aumento da capacidade de alocação de largura de banda, isto porquê a escolha de caminhos longos, porém menos fragmentados,



consumiam mais recursos da rede e diminuíam a organização de espectro entre os *enlaces*. O mesmo ocorre para as métricas de fragmentação de espectro no caminho. Pois, ainda que possuam o conjunto de *enlaces* delimitados, o que diminui a complexidade da análise de continuidade de espectro, não resultou em um desempenho satisfatório.

Os estudos apresentados no Capítulo 4, mostram que métricas que não incorporam a análise da continuidade de espectro em seu método, são ineficazes. Entretanto, também conclui-se que a utilização da métrica, como único parâmetro para alocação de canais ópticos por meio do algoritmo RSA, não surte o efeito desejado, sendo necessário a utilização de estratégias compostas, o que torna o algoritmo RSA mais complexo, porém mais completo.

Logo, os estudos conduzidos neste trabalho, mostram que as métricas para quantificação da fragmentação de espectro, tanto para toda a rede, quanto para o caminho óptico, propostas na literatura, não são eficazes, pois ao serem utilizados como principal parâmetro de decisão para a alocação do canal óptico, mostraram desempenho pior do que o algoritmo que não tinha nenhum parâmetro de decisão, que escolhia o menor caminho, consumindo a menor quantidade de recursos possíveis, enquanto os algoritmos visavam escolher as rotas que iriam fragmentar menos, conseqüentemente optavam por caminhos maiores, consumindo mais recursos e restringindo a continuidade de espectro. Esses resultados demonstram a necessidade da elaboração de novas métricas de fragmentação de espectro, que incorporam em sua metodologia as características apresentadas.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, propõe-se:

- Elaborar uma métrica de fragmentação de espectro considerando as características:  
(i) Contiguidade que represente os *slots* livres e as possibilidades de alocação das granularidades demandantes; (ii) Continuidade que represente a organização do espectro e as possibilidades de alocação das granularidades demandantes; (iii) Não utilizar estratégias de cálculo de média, ou produto, envolvendo *enlaces* a fim de realizar uma boa representação de fragmentação de espectro;
- Desenvolver uma solução RSA que tenha uma política de alocação dinâmica, que utilize a melhor alocação de espectro de acordo a fragmentação de espectro;
- Avaliar o desempenho das métricas no contexto Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment (RMLSA);

- Desenvolver uma solução RMLSA que tenha uma política de alocação dinâmica, que utilize a variação da modulação em favor da diminuição da fragmentação de espectro.

# Referências

- [1] Saleh, A. A. M. e J. M. Simmons: *Technology and architecture to enable the explosive growth of the internet*. IEEE Communications Magazine, 49(1):126–132, January 2011, ISSN 0163-6804. 1
- [2] Chatterjee, B. C., N. Sarma e E. Oki: *Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 17(3):1776–1800, thirdquarter 2015, ISSN 1553-877X. 1, 2, 3, 4, 7, 21, 22, 23, 26, 27, 53
- [3] Sato, K. i. 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, ISSN 1943-0620. 1
- [4] Horota, A., L. Reis, G. Figueiredo e N. L. S. Fonseca: *Routing and spectrum assignment algorithm with most fragmented path first in elastic optical networks*. IEEE Latin America Transactions, 14(6):2980–2986, June 2016, ISSN 1548-0992. 1, 2
- [5] Gerstel, O., M. Jinno, A. Lord e S. J. B. Yoo: *Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?* IEEE Communications Magazine, 50(2):s12–s20, February 2012, ISSN 0163-6804. 1, 2, 6
- [6] Zhang, G., M. De Leenheer, A. Morea e B. Mukherjee: *A survey on ofdm-based elastic core optical networking*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 15(1):65–87, First 2013, ISSN 1553-877X. 2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 23, 24, 26, 72
- [7] Christodoulopoulos, K., I. Tomkos e E. A. Varvarigos: *Routing and spectrum allocation in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation*. Em *2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*, páginas 1–6, Dec 2010. 2, 15, 20, 21
- [8] Tomkos, I., S. Azodolmolky, J. Solé-Pareta, D. Careglio e E. Palkopoulou: *A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges*. Proceedings of the IEEE, 102(9):1317–1337, Sept 2014, ISSN 0018-9219. 2, 6, 23, 24, 25, 26, 31
- [9] Rosa, A., C. Cavdar, S. Carvalho, J. Costa e L. Wosinska: *Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks*. Em *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, páginas 242–246, Dec 2012. 3, 24, 26, 27, 31, 39, 43, 47, 52, 53, 63, 68, 72

- [10] Singh, S. K. e A. Jukan: *Non-disruptive spectrum defragmentation with holding-time awareness in optical networks*. Em *2016 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, páginas 1–6, May 2016. 3, 24, 31, 45, 49, 63, 69
- [11] Napoli, A., M. Bohn, D. Rafique, A. Stavdas, N. Sambo, L. Poti, M. Nölle, J. K. Fischer, E. Riccardi, A. Pagano, A. Di Giglio, M. S. Moreolo, J. M. Fabrega, E. Hugues-Salas, G. Zervas, D. Simeonidou, P. Layec, A. D’Errico, T. Rahman e J. P. F. P. Giménez: *Next generation elastic optical networks: The vision of the european research project idealist*. *IEEE Communications Magazine*, 53(2):152–162, Feb 2015, ISSN 0163-6804. 4
- [12] Jinno, M., H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone e S. Matsuoka: *Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies*. *IEEE Communications Magazine*, 47(11):66–73, November 2009, ISSN 0163-6804. 6, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 23
- [13] Costa, L. R.: *Potencializando a modulação adaptativa com roteamento em múltiplos saltos em redes Ópticas elásticas*. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília - UnB, 2015. 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 19, 22, 23, 24
- [14] Hashimoto, T., K. i. Baba e S. Simojo: *A study on routing, modulation level, and spectrum allocation algorithms for elastic optical path networks*. Em *2012 IEEE 3rd International Conference on Photonics*, páginas 395–399, Oct 2012. 8
- [15] Armstrong, J.: *Ofdm for optical communications*. *Journal of Lightwave Technology*, 27(3):189–204, Feb 2009, ISSN 0733-8724. 8, 10, 13
- [16] Sano, A., 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, ISSN 0733-8724. 10, 13
- [17] Donza, A. C. S.: *Políticas de alocação de espectro em roteamento baseado em balanceamento de cargas e fragmentação para redes Ópticas elásticas*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2015. 11, 12, 13, 14, 15, 23
- [18] Christodoulopoulos, K., I. Tomkos e E. A. Varvarigos: *Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks*. *Journal of Lightwave Technology*, 29(9):1354–1366, May 2011. 12, 16, 18, 21, 24
- [19] Jinno, M., B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka e A. Hirano: *Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]*. *IEEE Communications Magazine*, 48(8):138–145, August 2010, ISSN 0163-6804. 17, 18, 19
- [20] Klekamp, A., O. Rival, A. Morea, R. Dischler e F. Buchali: *Transparent wdm network with bitrate tunable optical ofdm transponders*. Em *2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference*, páginas 1–3, March 2010. 18

- [21] Shannon, C. E.: *Communication in the presence of noise*. Proceedings of the IEEE, 86(2):447–457, Feb 1998, ISSN 0018-9219. 19
- [22] López, J., Y. Ye, V. López, F. Jimenez, R. Duque, P. M. Krummrich, F. Musumeci, M. Tornatore e A. Pattavina: *Traffic and power-aware protection scheme in elastic optical networks*. Em *2012 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS)*, páginas 1–6, Oct 2012. 19
- [23] Tarhan, A. e C. Cavdar: *Shared path protection for distance adaptive elastic optical networks under dynamic traffic*. Em *2013 5th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, páginas 62–67, Sept 2013. 19
- [24] Thießen, C. e Ç. Çavdar: *Fragmentation-aware survivable routing and spectrum assignment in elastic optical networks*. Em *2014 6th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM)*, páginas 97–101, Nov 2014. 19, 43, 63
- [25] Liu, H., B. Zhou e Y. Chen: *Spectrum allocation based on spectrum integration and re-routing for elastic optical networks*. IET Optoelectronics, 10(5):179–183, 2016, ISSN 1751-8768. 19
- [26] Wang, Y., X. Cao e Y. Pan: *A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks*. Em *2011 Proceedings IEEE INFOCOM*, páginas 1503–1511, April 2011. 21
- [27] Shirazipourazad, S., Z. Derakhshandeh e A. Sen: *Analysis of on-line routing and spectrum allocation in spectrum-sliced optical networks*. Em *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 3899–3903, June 2013. 24, 72
- [28] Takagi, T., H. Hasegawa, K. i. Sato, Y. Sone, A. Hirano e M. Jinno: *Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation*. Em *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, páginas 1–3, Sept 2011. 25
- [29] Cugini, F., 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, ISSN 0733-8724. 25
- [30] Fadini, W. e E. Oki: *A subcarrier-slot partition scheme for wavelength assignment in elastic optical networks*. Em *2014 IEEE 15th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, páginas 7–12, July 2014. 26
- [31] Wang, R. e B. Mukherjee: *Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks*. Em *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, páginas 2907–2911, Dec 2012. 26
- [32] Wilson, P. R., M. S. Johnstone, M. Neely e D. Boles: *Dynamic storage allocation: A survey and critical review*. Em *Proceedings of the International Workshop on Memory Management*, 1995. 28, 29, 30

- [33] Wu, J., M. Zhang, F. Wang, Y. Yue e S. Huang: *An optimal independent sets based greedy spectral defragmentation algorithm in elastic optical network*. Em *2014 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, páginas 1–4, Nov 2014. 43, 63
- [34] Wang, N., J. P. Jue, X. Wang, Q. Zhang, H. C. Cankaya e M. Sekiya:  *Holding-time-aware scheduling for immediate and advance reservation in elastic optical networks*. Em *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 5180–5185, June 2015. 44, 63
- [35] Wright, P., M. C. Parker e A. Lord: *Minimum- and maximum-entropy routing and spectrum assignment for flexgrid elastic optical networking [invited]*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 7(1):A66–A72, Jan 2015, ISSN 1943-0620. 45, 63, 67
- [36] Altarawneh, L. e S. Taebi: *Bandwidth granularity adaptation for multipath provisioning in elastic optical ofdm-based networks*. Em *2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, páginas 236–240, May 2015. 45, 63, 64
- [37] Sugihara, S., Y. Hirota, S. Fujii, H. Tode e T. Watanabe: *Dynamic resource allocation for immediate and advance reservation in space-division-multiplexing-based elastic optical networks*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 9(3):183–197, March 2017, ISSN 1943-0620. 45, 63, 64
- [38] Yin, Y., H. Zhang, M. Zhang, M. Xia, Z. Zhu, S. Dahlfors e S. J. B. Yoo: *Spectral and spatial 2d fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks [invited]*. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 5(10):A100–A106, Oct 2013, ISSN 1943-0620. 47, 68, 69
- [39] Wang, H., X. Xin, J. Zhang, Y. Sun e Y. Ji: *Dynamic virtual optical network mapping based on switching capability and spectrum fragmentation in elastic optical networks*. Em *2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)*, páginas 1–3, July 2016. 48, 69
- [40] Sócrates-Dantas, J., R. M. Silveira, D. Careglio, J. R. Amazonas, J. Solè-Pareta e W. V. Ruggiero: *A study in current dynamic fragmentation-aware rsa algorithms*. Em *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4, July 2014. 49, 69
- [41] Costa, L. R., L. S. Sousa, F. R. Oliveira, K. A. Silva, P. J. S. Júnior e A. C. Drummond: *Ons: Optical network simulator - wdm/eon*. <http://comnet.unb.br/br/grupos/get/ons>, 2016. 52