



Universidade Federal de Pernambuco

Centro de Informática

Curso de Bacharelado em Engenharia da Computação

Karen Paula Pinto

**Análise Comparativa e Simulação de Algoritmos de Roteamento e  
Atribuição de Espectro nas Redes Ópticas Elásticas**

Recife

2021

Karen Paula Pinto

**Análise Comparativa e Simulação de Algoritmos de Roteamento e  
Atribuição de Espectro nas Redes Ópticas Elásticas**

Monografia apresentada ao Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação.

**Área de Concentração:** *Sistemas de Comunicação*

**Orientador:** *Prof.Dr.Raul Camelo de Andrade Almeida*

*Júnior*

Recife

2021

Dedico este trabalho a toda a minha família e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus, que me deu saúde e forças para superar todos os momentos difíceis a que eu me deparei ao longo da minha graduação. Ao meu pai Ezio, e minha mãe Kátia, por serem essenciais na minha vida e por sempre estarem ao meu lado. A minha linda irmã Kelly, por sempre estar comigo em todos os momentos e sempre me ajudar em tudo na minha vida. Ao meu irmão Ezio Jr, por sempre ter dado conselhos maravilhosos. A Matheus Braz, por ter entrado na minha vida, alegrado ainda mais e sempre estar disposto a me ajudar quando eu preciso. A minha amiga Rebeca, por ser uma amiga maravilhosa e por sempre me encorajar nos momentos difíceis. A Joãozinho, que sempre vai estar no meu coração e que sempre influenciou a minha vida. Ao meu orientador Raul, por aceitar conduzir este trabalho e por ter compartilhado o seu vasto conhecimento. A Clayton, por todo apoio, paciência e disponibilidade ao longo da elaboração deste trabalho e a todas as pessoas que de alguma forma influenciaram a realização deste trabalho.

## RESUMO

As Redes Ópticas Elásticas dispõem de uma grande capacidade de acompanhar o aumento e a diversidade dos tráfegos de dados da atualidade, na medida em que fornecem uma largura de banda flexível aos caminhos ópticos, viabilizando, assim, uma melhor eficiência na utilização do espectro óptico. Contudo, há um recorrente problema denominado Roteamento de Atribuição de Espectro (RSA) que visa a escolha de uma rota e a alocação de uma faixa de espectro do começo ao fim da rota. Neste contexto, têm sido propostos diversos algoritmos de RSA com o intuito de melhorar a atribuição dos recursos na rede. O presente projeto tem como objetivo apresentar um levantamento e análise de alguns algoritmos de RSA, de forma que simulações computacionais foram desenvolvidas a fim de quantificar métricas essenciais de análise.

**Palavras-chave:** Redes Ópticas Elásticas. RSA.

# **ABSTRACT**

Elastic Optical Networks have a great capacity to support the increase and diversity of data traffic nowadays. This is possible because this type of network provides a flexible bandwidth to the lightpath and, thus, a better efficiency in the use of the optical spectrum. Nonetheless, there is a recurring problem called Routing and Spectrum Assignment(RSA). The objective of RSA is to choose a route and allocate a spectrum band from the start to the end of the route. In this context, several RSA algorithms have been proposed in order to improve the allocation of resources on the network. The present project aims to present a survey and analysis of some RSA algorithms. Computer simulations were developed in order to quantify essential analysis metrics.

**Keywords:** Elastic Optical Networks. RSA.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bandas espectrais utilizadas nas comunicação por fibra óptica.( <a href="#">Keiser, 2014</a> ) . . . . .	17
Figura 2 – Uma rede de computadores com os seus principais elementos.Imagem adaptada de( <a href="#">Keiser, 2014</a> ) . . . . .	19
Figura 3 – A rede NSFNET em 1990. Imagem adaptada de ( <a href="#">Goldstein, 2020</a> ) . . . . .	19
Figura 4 – Atribuição e roteamento de comprimento de onda nas redes WDM. Imagem adaptada de ( <a href="#">Chadha, 2019</a> ) . . . . .	23
Figura 5 – a) Multiplexação por divisão de tempo. b) Multiplexação por comprimento de onda. Imagem adaptada de ( <a href="#">Chadha, 2019</a> ) . . . . .	24
Figura 6 – Espectro nas redes ópticas baseadas na tecnologia WDM. Imagem adaptada de ( <a href="#">Chatterjee et al., 2015</a> ) . . . . .	25
Figura 7 – Taxa de transmissão de dados em função do número de subportadoras ( <a href="#">Christodoulopoulos et al., 2010</a> ) . . . . .	30
Figura 8 – Funcionamento do <i>Bandwidth Variables Wavelength spectrum selective</i> (BV-WSS). Imagem adaptada de ( <a href="#">Chadha, 2019</a> ) . . . . .	31
Figura 9 – Exemplo da restrição de continuidade e contiguidade para uma requisição com largura de banda equivalente a 2 slots de frequência e rota constituída pelos links 1, 2 e 3. . . . .	33
Figura 10 – Partições nas <i>EON</i> deixam mais blocos de slots disponíveis e alinhados. Imagem adaptada de ( <a href="#">Fadini &amp; Oki, 2014</a> ) . . . . .	44
Figura 11 – Probabilidade de bloqueio dos algoritmos <i>First Fit</i> e <i>Last Fit</i> na topologia NSFNET, com requisições de 2,3 e 4 slots com um total de 64 slots por link. (gráfico em escala logarítmica) . . . . .	54

Figura 12 – Probabilidade de bloqueio dos algoritmos <i>First Fit</i> e <i>Last Fit</i> na topologia NSFNET, com requisições de 2,3 e 4 slots com um total de 64 slots por link. . . . .	55
Figura 13 – Probabilidade de bloqueio dos algoritmos <i>First Fit</i> , <i>Random Fit</i> , <i>Least Used</i> , <i>Most Used</i> , <i>Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado</i> e o MSCL na topologia NSFNET, com requisições de 2,3 e 4 slots com um total de 64 slots por link. . . . .	56
Figura 14 – Probabilidade de bloqueio dos algoritmos <i>First Fit</i> e <i>Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado</i> na topologia NSFNET, com requisições de 2,3, 4 e 5 slots com um total de 300 slots por link. . . . .	58

# LISTA DE ACRÔNIMOS

<b>AR</b>	<i>adaptive routing</i>
<b>BER</b>	<i>Bit Error Ratio</i>
<b>BVT</b>	<i>Bandwidth Variable Transponder</i>
<b>BV-WXCs</b>	<i>Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connections</i>
<b>BV-WSS</b>	<i>Bandwidth Variables Wavelength spectrum selective</i>
<b>DWDM</b>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
<b>EDFA</b>	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
<b>EON</b>	<i>Elastic Optical Network</i>
<b>FAR</b>	<i>Fixed Alternate Routing</i>
<b>FR</b>	<i>fixed routing</i>
<b>ILP</b>	<i>Integer Linear Programming</i>
<b>ISO</b>	<i>International Standards Organization</i>
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunications Union</i>
<b>LR</b>	<i>lightpath routing</i>
<b>LTD</b>	<i>lightpath topology design</i>
<b>MSCL</b>	<i>Min Slot-Continuity Capacity Loss</i>
<b>OADM</b>	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<b>OLTs</b>	<i>Optical Line Terminals</i>
<b>OXC</b>	<i>optical Crossconnects</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Services</i>
<b>RSA</b>	<i>Routing and spectrum assignment</i>
<b>RWA</b>	<i>routing and wavelength assignment</i>
<b>TDM</b>	<i>Time Division Multiplexing</i>
<b>WA</b>	<i>wavelength assignment</i>
<b>WDM</b>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

## LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – <i>First Fit</i> . . . . .	39
Algoritmo 2 – <i>Random Fit</i> . . . . .	40
Algoritmo 3 – <i>Last Fit</i> . . . . .	41
Algoritmo 4 – <i>Least Used</i> . . . . .	42
Algoritmo 5 – <i>Most Used</i> . . . . .	43
Algoritmo 6 – Construindo o grafo do problema da atribuição de partição. Adaptado de (Fadini & Oki, 2014) . . . . .	45
Algoritmo 7 – Resolvendo o problema da coloração do grafo utilizando o <i>Largest degree first (LDF)</i> . Adaptado de (Fadini & Oki, 2014) . . . . .	45
Algoritmo 8 – <i>Subcarrier-slot partition first-last-fit</i> .(Fadini & Oki, 2014) . . . . .	47
Algoritmo 9 – <i>Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado</i> . . . . .	49
Algoritmo 10 – <i>Escolhendo uma partição diferente das partições utilizadas pelas rotas interferentes</i> . . . . .	50
Algoritmo 11 – <i>MSCL</i> . . . . .	52

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	12
<b>2</b>	<b>REDES ÓPTICAS</b> . . . . .	14
2.1	PRINCÍPIOS DE TRANSMISSÃO NAS REDES ÓPTICAS . . . . .	15
2.2	PRINCÍPIOS DE REDE . . . . .	17
2.2.1	<b>Arquitetura de camadas</b> . . . . .	19
2.2.2	<b>Camada Óptica</b> . . . . .	21
2.3	REDES ÓPTICAS WDM . . . . .	22
2.4	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS . . . . .	28
<b>3</b>	<b>O PROBLEMA DE ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO NAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS</b> . . . . .	34
3.1	ROTEAMENTO . . . . .	35
3.1.1	<b>Roteamento Fixo</b> . . . . .	36
3.1.2	<b>Roteamento Fixo-alternativo</b> . . . . .	36
3.1.3	<b>Roteamento Adaptativo</b> . . . . .	37
3.2	ALOCAÇÃO DE ESPECTRO . . . . .	37
3.2.1	<i>First Fit</i> . . . . .	39
3.2.2	<i>Random Fit</i> . . . . .	39
3.2.3	<i>Last Fit</i> . . . . .	40
3.2.4	<i>Least Used</i> . . . . .	41
3.2.5	<i>Most Used</i> . . . . .	42
3.2.6	<i>Subcarrier-slot partition first-last-fit</i> . . . . .	43
3.2.7	<i>Adaptação do Subcarrier-slot partition first-last-fit</i> . . . . .	46
3.2.8	<i>Min Slot-Continuity Capacity Loss</i> . . . . .	48
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES E ANÁLISES DOS ALGORITMOS DE RSA</b> . . . . .	53

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>62</b>

# 1

## INTRODUÇÃO

Atualmente, devido ao aumento dos serviços de multimídia bem como do desenvolvimento da internet móvel, da computação em nuvem e da internet das coisas, está se desenrolando uma mudança no comportamento dos tráfegos de dados, de forma que, cada vez mais, surgem diferentes tipos de tráfegos com características próprias e cresce a necessidade pelo desenvolvimento de mais banda de dados. Assim, para atender essa demanda, são utilizadas as Redes ópticas que utilizam a tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), que se caracteriza pela divisão do espectro óptico em canais rígidos . Deste modo, o rápido crescimento dos diferentes tipos de tráfego de dados e da sua demanda está rapidamente saturando as redes já instaladas, tornando-se um desafio para a tecnologia de transmissão óptica convencional (Yuan *et al.*, 2019), (Xia *et al.*, 2012). Neste cenário de tráfego muito heterogêneo, a tecnologia WDM fornece uma ineficiente utilização do espectro óptico devido à diferença da demanda de tráfego e a largura de banda rígida dos sistemas (Takara *et al.*, 2009).

Com a finalidade de superar esse desafio, surgiram as Redes Ópticas Elásticas, do inglês *Elastic Optical Networks* (EON). Uma das tecnologias que esse tipo de rede utiliza chama-se OFDM (*Orthogonal frequency division multiplexing*). Além disso, as EONs concede a ideia central de possuir um gerenciamento e elementos de rede capazes de fornecer uma largura de banda flexível aos caminhos ópticos, ou seja, pode ser obtido qualquer tamanho de banda além de poderem expandir-se e contrair-se livremente de acordo com o volume de tráfego e as requisições dos usuários, não mais utilizando uma grade fixa. Esta característica é particularmente alcançada

---

pois o espectro nas redes EON é dividido em porções de frequência com largura de banda reduzida comparada com as redes WDM e deste modo, de acordo com a necessidade de uma determinada requisição, são reservadas porções contínuas no espectro (Yuan *et al.*, 2019).

É importante ressaltar que o provisionamento de recursos nas EON é realizado por um processo chamado de Roteamento e Atribuição de Espectro, do inglês *Routing and Spectrum Assignment* (RSA), o qual consiste em escolher uma rota adequada e uma faixa de frequência do começo ao fim da rota escolhida, que torne a conexão entre os pares de nós nas redes mais eficiente (Klinkowski & Waldowiak, 2011). Por ser um problema complexo, o RSA é dividido em dois subproblemas: o de roteamento, que é a definição da rota, e o da alocação do espectro, que é a busca por uma região do espectro próximos que esteja livre nesta rota (Yuan *et al.*, 2019). Em razão de ser um dos problemas mais complexos das EON, recentemente, têm sido propostos diversos algoritmos de RSA com o intuito de tratar esse problema, bem como de desenvolver uma melhor eficiência na atribuição dos recursos na rede. De forma que cada algoritmo de RSA possui métricas e abordagens diferentes (Xia *et al.*, 2012).

Diante do cenário apresentado, o intuito do presente trabalho é investigar alguns dos algoritmos de RSA que influenciam no provisionamento dos recursos nas redes EON e analisar as suas principais características. Esses algoritmos são de extrema importância pois detêm o propósito de prover uma melhor atribuição dos recursos da rede e uma melhor acomodação das variações dos tráfegos do cliente.

O restante deste trabalho está dividido no capítulo 2, que discute sobre as redes ópticas e algumas definições e características relacionadas a esse tipo de rede, como também apresenta as Redes Ópticas que utilizam a tecnologia WDM e as Redes Ópticas Elásticas. No capítulo 3 discute-se com mais detalhes o problema do RSA e também são apresentados alguns dos algoritmos de RSA importantes para este trabalho. Já no capítulo 4 são apresentados os resultados de simulações desses algoritmos, assim como a análise de desempenho de cada um baseada na probabilidade de bloqueio. O capítulo 5, por fim, apresenta a conclusão deste trabalho.

# 2

## REDES ÓPTICAS

Na área de telecomunicações, redes são um conjunto de dispositivos computacionais interligados por um sistema de comunicações. Este sistema é o responsável pela troca de informações entre eles. Há várias redes de computadores, mas a mais importante dentre elas é a Internet. Neste contexto, redes ópticas podem ser definidas como os sistemas de comunicação que utilizam as fibras ópticas como canal para a transmissão de dados.

A utilização dessa tecnologia está se tornando a mais apropriada para suportar a atual, crescente e grande demanda de transmissão de dados, uma vez que ela possui uma maior capacidade de transporte do que outras tecnologias, tais como cabos coaxiais, além de ser menos suscetível a vários tipos de interferências eletromagnéticas e outros efeitos que podem comprometer a qualidade das informações enviadas. É interessante saber que existem duas gerações de redes ópticas: a primeira geração, chamada de SONET/SDH, realiza o processamento, comutação e outras funções inteligentes eletronicamente, ou seja: com aparelhos eletrônicos; já a segunda geração realiza a comutação e roteamento no domínio óptico, sem ter a necessidade da conversão para o domínio elétrico ([Ramaswami et al., 2009](#)).

Neste capítulo, será apresentado um resumo de como os meios de comunicação que utilizam as fibras ópticas funcionam e algumas definições de redes ópticas além de algumas de suas características. Ademais, serão apresentadas duas de suas variantes: as chamadas Redes WDM e as Redes ópticas Elásticas, do inglês *Elastic Optical Network* (EON), esta última variante será a base do restante deste trabalho.

## 2.1 PRINCÍPIOS DE TRANSMISSÃO NAS REDES ÓPTICAS

A informação que transita dentro de uma rede de computadores pode ser representada de forma analógica, na qual a informação pode assumir qualquer valor dentre alguns valores extremos; ou digital, na qual a informação é codificada para ser representada por apenas dois valores que são denominados Bit 0 e Bit 1 e, com isso, de acordo com a complexidade da informação, pode haver a necessidade de mais valores de Bit 0 e Bit 1 para serem representados. Por exemplo, a informação de uma pergunta sendo igual a “Sim” pode ser representada apenas pelo Bit 1, porém a resposta de um pergunta que possui mais de duas opções, por exemplo "quantos anos você tem?", necessita de um conjunto maior de bits de 0 e de bits 1 para serem respondidas. Essas informações são chamadas de dados e a maioria dos sistemas de comunicação utilizam valores digitais e alguma forma de energia eletromagnética para transmiti-las e representá-las no meio físico (Keiser, 2014). Esse tipo de energia engloba desde ondas de rádios, microondas, luz infravermelha, luz ultravioleta, raios X, até a luz visível. Essa representação dos dados através de energia eletromagnética é denominada sinais. Um ponto importante da natureza desses elementos é o fato de possuírem uma velocidade considerada grande, fazendo com que um conjunto de informações sejam transmitidas em função do tempo em uma velocidade próxima à da luz no vácuo, em torno de  $3 \times 10^8 m/s$  (Keiser, 2014).

Os sinais transmitidos por esses sistemas de comunicações ópticas em função do tempo podem ser vistos como uma sequência de pulsos eletromagnéticos, “com luz” ou “sem Luz”, que são representados respectivamente pelo bit 1 e o bit 0, ou seja, de forma digital (Ramaswami *et al.*, 2009), esse modo, esses sistemas são considerados sistemas digitais. Vale ressaltar, também, que a relação da quantidade de bits por segundo que são transmitidos pelo sistema é denominada taxa de bits e sua unidade de medida é bits/segundo (bits/s). Desse modo, quanto maior é a taxa de bits maior é a quantidade de informações transmitidas pela rede.

Ademais, é interessante destacar três propriedades físicas de um sinal eletromagnético: o comprimento de um período da onda, a frequência de oscilação e a energia contida ou energia do fóton, que são partículas de energia que constituem as ondas eletromagnéticas. Os sistemas de

comunicação óptica usualmente utilizam a propriedade de comprimento de onda para determinar a região de operação espectral, ou seja, a distribuição dos diferentes tipos de ondas em função do comprimento de onda, e a potência óptica para designar assuntos como a força do sinal ou desempenho de um componente eletro-óptico. Assim, os sinais transmitidos por esses sistemas de comunicação, além de poderem ser representados em função do tempo, podem ser representados no domínio da frequência, na qual a energia do sinal é propagada ao longo de um conjunto de frequências. Essa representação é o que chamamos de espectro de um sinal (Ramaswami *et al.*, 2009). Ou seja, um sinal que é transmitido pela fibra no domínio do tempo é visto como se fossem pulsos, porém no domínio da frequência um mesmo sinal se estende em um conjunto de frequências. Esse conjunto de frequência é chamado da largura de banda de um sinal, ou seja: o comprimento do espectro do sinal. É importante ressaltar que o comprimento de onda do sinal  $\lambda$  e a sua frequência  $f$  estão relacionados a partir da equação:

$$\text{Velocidade da onda} = f * \lambda$$

Esta relação é bastante interessante, pois nos sistemas de comunicação óptica pode-se utilizar o comprimento ou a frequência como referência para determinar a banda espectral em que o sinal opera. O comprimento de onda utilizado por esses tipos de sistemas fica na banda dos infravermelhos, e por isso, não podem ser vistos pelas pessoas. Já a frequência é medida em hertz ou ciclos por segundo (Ramaswami *et al.*, 2009). A figura 1 mostra as regiões do espectro eletromagnético utilizadas nas comunicações de fibra óptica no domínio do comprimento de onda. Como pode-se observar na imagem, o espectro utilizado nas comunicações de fibra óptica são divididos nas bandas O,E,S,C,L,U. A região mais utilizada no espectro por esses sistema é a banda C, pois essa banda primeiramente era a região onde os amplificadores *Erbium-Doped Fiber Amplifier* (EDFA) funcionavam. Como atualmente já existem EDFA que funcionam também na banda L, esta banda passou a ser operada (Chadha, 2019).

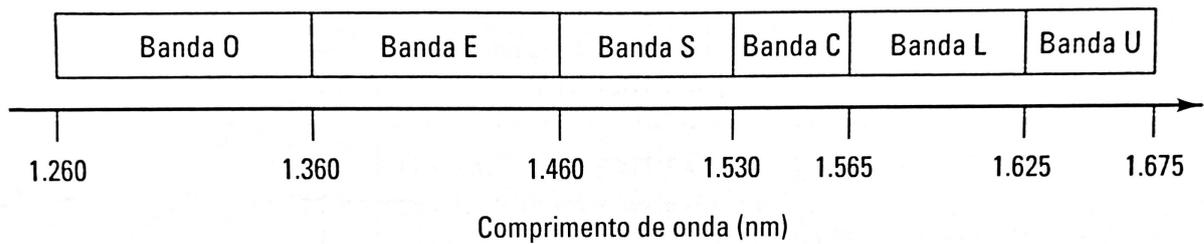


Figura 1: Bandas espectrais utilizadas nas comunicações por fibra óptica. (Keiser, 2014)

Outro fator importante sobre estes tipos de sistemas é que, para estabelecer uma comunicação confiável, os sinais que contêm as informações desejadas precisam da ajuda de um outro sinal com uma frequência mais alta. Estes sinais podem viajar até uma distância maior, sem serem afetados por perturbações externas e são denominados de sinal de portadora. A técnica para evitar que o sinal seja afetado por alguns distúrbios externos, utilizando o sinal de portadora, é denominada modulação. Esta técnica consiste em utilizar algumas propriedades básicas do sinal da portadora, como por exemplo a amplitude, frequência ou fase, alterando-os de acordo com o sinal inicial que contém as informações (Lathi & Ding, 2012). É importante ressaltar que a quantidade de bits por segundo transmitida por um sistema, em uma determinada largura de banda, depende do tipo de modulação utilizada, assim, de acordo com a modulação, pode-se ter uma taxa de bits diferente em uma mesma largura de banda. De forma que quanto maior a taxa de bits em uma determinada largura de banda, melhor será a utilização do espectro, ou seja, melhor será a eficiência espectral do sistema (Ramaswami *et al.*, 2009).

Anteriormente, foi explicado de forma genérica como os sistemas de comunicações ópticas transmitem as informações pela fibra óptica, porém, além desses conceitos mais focados na parte física, existem outros conceitos que serão vistos na seção a seguir. Abaixo, serão vistos conceitos como o gerenciamento e os elementos que constituem as redes em geral.

## 2.2 PRINCÍPIOS DE REDE

Esta seção apresenta alguns conceitos básicos sobre redes de computadores, que são de suma importância para o entendimento do presente trabalho. Como visto anteriormente, redes de computadores são um conjunto de dispositivos computacionais interligados por um sistema de

---

comunicações. Estes dispositivos podem ser desde computadores pessoais, TVs, smartphones até servidores, que são sistemas computacionais centralizados a partir dos quais são ofertados serviços como, por exemplo, armazenamento e transmissão de informações das aplicações onde são localizados os programas, tais como os servidores das páginas Web. Estes equipamentos são denominados de sistemas finais. De forma que, sempre que transmitem uma informação a outro sistema, esses dados são divididos em partes menores que são chamados de pacotes. Só então esse conjunto de pacotes resultantes são transmitidos através da rede ao seu destino. Além disso os sistemas finais são conectadas entre si por enlaces ou links de comunicação, no caso de comunicações ópticas esses enlaces são constituídos por fibras ópticas.

Outra definição importante nas redes de computadores são os roteadores, que têm a função de encaminhar pacotes, estão localizados principalmente no núcleo da rede e conectam redes de regiões diferentes, e os comutadores, que possuem a mesma função de encaminhar pacotes, porém normalmente se localizam nas redes de acesso que ficam próximas aos sistemas finais (Kurose & Ross, 2013).

Os elementos da rede como os sistemas finais, os roteadores e os comutadores de pacotes são considerados os nós de uma rede e estão ligados entre si através de uma ou mais linhas de comunicação. Diante disso a sequência de nós que os dados percorrem, desde a estação remetente até seu destino, é intitulada rota ou caminho da rede e, de acordo com o modo como esses nós estão interligados, podem-se formar diferentes tipos de redes e essa forma lógica de como eles estão conectados é chamada topologia da rede. A figura 2 mostra um exemplo de uma rede com seus principais componentes e terminologias e a figura 3 apresenta um exemplo de uma topologia de uma rede física real chamada NSFNet, do inglês *National Science Foundation Network*, localizada nos Estados Unidos. A sua primeira versão foi efetivada em 1985, porém sofreu várias expansões até o ano de 1995. Na imagem, é mostrada a versão T1 NSFNET, implantada em 1990 com 14 nós e com uma velocidade T1 (Goldstein, 2020).

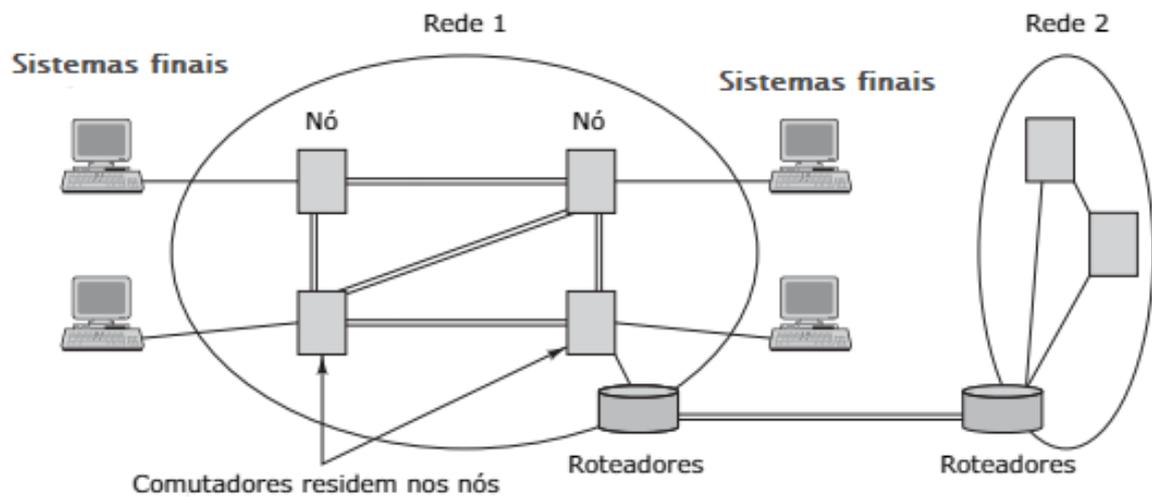


Figura 2: Uma rede de computadores com os seus principais elementos. Imagem adaptada de (Keiser, 2014)

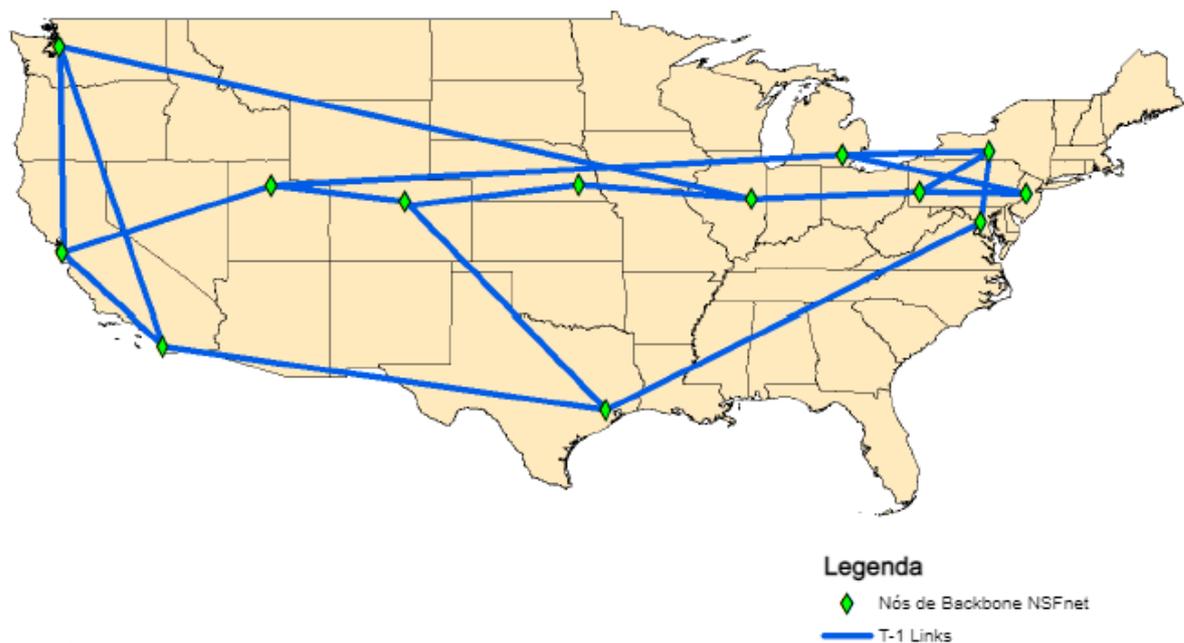


Figura 3: A rede NSFNET em 1990. Imagem adaptada de (Goldstein, 2020)

## 2.2.1 Arquitetura de camadas

Na elaboração de um sistema de redes de computadores, usualmente é implantada uma arquitetura de rede em camadas para facilitar o entendimento dessas redes. O modelo desta arquitetura em camadas mais conhecido foi proposto pela *International Standards Organization* (ISO), no início de 1980, chamada de modelo OSI, a qual teve como funcionalidade dividir as

---

funções de uma rede em sete camadas operacionais (Keiser, 2014). Essas camadas são vistas como uma sequência vertical onde cada uma possui um conjunto de funções e serviços para a camada seguinte e, em contrapartida, cada camada espera que a camada inferior lhe proporcione determinados serviços.

No modelo OSI são apresentadas ao todo 7 camadas: física, enlace ou *links* de dados, rede, transporte, sessão, apresentação e aplicação. A camada mais inferior da estrutura é a física, a qual é responsável pela transmissão dos dados a um meio físico, podendo ser, por exemplo, composta por fibra óptica, *wireless* ou cabo coaxial. Em seguida, encontra-se a camada de enlace ou links de dados, cuja finalidade é enviar os pacotes de dados de um elemento da rede para outro elemento adjacente e também realiza uma estruturação dos mesmos para o transporte, podendo colocar cabeçalhos adicionais para a prevenção de erros. Esses pacotes, então, são denominados de quadros. Os quais, além do que já foi exposto acima, podem oferecer o processo de multiplexação e demultiplexação de dados, ou seja: a junção de dados para serem transmitidos em um mesmo meio e a separação deles para serem encaminhados para os seus destinos, respectivamente. Já acima da camada de enlace ou *links*, encontra-se a camada de Rede, que exerce a função de entregar pacote de dados da origem para o destino através dos vários *links* que conectam esses nós na rede. Esta camada é responsável por encontrar um caminho entre os vários nós que constituem a rede e encaminhar os pacotes para o destino correto. Este processo é chamado de roteamento. Na camada de rede os pacotes recebem o nome de datagramas. A camada de transporte se encontra sobre a camada denominada rede e é responsável pela entrega dos dados da origem para o destino. O protocolo TCP é um exemplo de protocolo de camada de transporte e provê serviços como, por exemplos, a garantia da entrega, sem erro e em sequência com a finalidade de garantir a qualidade do serviço, *Quality of Services* (QoS), que engloba desde o atraso na chegada, taxa de erro de bit, até a prioridade da mensagem. Já as camadas mais altas são: a sessão, na qual são providos serviços tais como a existência de pontos de verificação e de recuperação dos dados; e a de apresentação, encarregada de prover atividades como a compressão, a codificação dos dados e assegura a compatibilidade dos dados entre as camadas de aplicação de sistemas diferentes, fazendo com que eliminem a preocupação sobre a maneira com que os dados estão retratados e armazenados nas aplicações. Por fim, no topo, encontra-se a

---

camada de aplicação, na qual localizam os programas de computadores propriamente ditos, ou seja, fornecem serviços diretamente para o usuário, como por exemplo uma aplicação que realiza a transferência de arquivos ou aplicações web (Keiser, 2014)(Kurose & Ross, 2013)(Ramaswami *et al.*, 2009).

Já em relação aos sistemas de comunicações ópticas, uma nova camada é adicionada à estrutura, denominada de camada óptica, a qual proporciona serviços de gerenciamento ligados ao comprimento de onda do sinal a ser transmitido(Kurose & Ross, 2013)(Ramaswami *et al.*, 2009).

### 2.2.2 Camada Óptica

É importante saber que a camada óptica se encontra em cima da camada física e oferece diversos serviços para as camadas clientes baseados no gerenciamento e entrega de caminhos ópticos. Por sua vez, estes consistem em um tipo de conexão, ou canal óptico, representado por uma rota e um específico comprimento de onda, entre dois nós de uma rede. Como visto anteriormente, cada comprimento de onda pode carregar uma quantidade significativa de informações com uma taxa de bits significativa. Essa quantidade de banda é fornecida para as camadas superiores através do caminho óptico e, por sua vez, esses caminhos ópticos podem ser ativados ou desativados de acordo com a requisição das camadas acima deles. Ademais, é importante salientar que, diferentemente da camada óptica, a física proporciona uma ligação física entre dois nós na rede, preocupando-se em transmitir os bits individualmente através do meio físico, já a óptica, como visto, oferece serviços que se baseiam em caminhos ópticos sobre o link(Keiser, 2014).

Neste contexto, é significativo elucidar algumas particularidades de algumas das funções e serviços de gerenciamento de caminhos ópticos que a camada óptica proporciona para as camadas clientes. Primeiramente, é relevante mencionar que essa camada é considerada uma entidade complexa devido ao seu papel nas redes ópticas, dentre os quais podemos citar a realização de multiplexação, comutação e roteamento dos comprimentos de onda ou dos caminhos ópticos. Além disso, essa camada exerce serviços de gerenciamento pois, como visto anteriormente, os

---

caminhos ópticos precisam ser desativados ou ativados segundo as requisições das camadas clientes e, a depender da situação, podem precisar de algum tipo de manutenção. Outro ponto relevante é que, a depender do tipo da requisição das camadas acima, precisa-se oferecer um caminho que se adeque à quantidade de banda necessária à requisição. Além disso, a camada óptica precisa garantir o nível da qualidade requerida, normalmente especificada através da taxa de erro de bit, *Bit Error Ratio* (BER), (Ramaswami *et al.*, 2009).

Assim, diante do que foi exposto, pode-se constatar que a camada óptica tem um papel muito importante nas redes de comunicação que utilizam a fibra óptica como mecanismo de transmissão, visto que ela fornece caminhos ópticos, seu gerenciamento, mecanismo de restauração, como também exerce funções tais como a junção de vários caminhos ópticos em uma única fibra e ainda permite a separação dessa composição nos nós da rede, através da multiplexação e demultiplexação dos comprimentos de onda do sinal. Essas redes podem se diferenciar de acordo com as tecnologias e elementos utilizados que fazem parte da rede. As seções a seguir tratam brevemente de alguns tipos dessas redes.

### 2.3 REDES ÓPTICAS WDM

As redes ópticas WDM são aquelas que fazem o roteamento e a comutação no domínio óptico e, com isso, são consideradas redes com roteamento por comprimento de onda. Esse termo é utilizado pois a comunicação direta da origem até o destino é feita a partir de caminhos ópticos, ou seja, é efetivada alocando o mesmo comprimento de onda durante todo o percurso, podendo passar por outros nós intermediários. É importante salientar que, a partir dessa restrição, essa comunicação é feita utilizando a fibra óptica.

Outrossim, a comunicação feita por caminhos ópticos nas redes WDM precisam satisfazer três características: continuidade de comprimento de onda, alocação de comprimento de onda distinta e a reutilização do comprimento de onda. A primeira característica, a continuidade de comprimento de onda, consiste na restrição resultante do fato de que a conexão do nó de origem ao nó destino precisa ter o mesmo comprimento de onda em todo o percurso, caso não exista um conversor de comprimento de onda óptico. Já a alocação de comprimento de onda

abrange a limitação causada pelo fato de que dois caminhos ópticos não podem ser atribuídos ao mesmo comprimento de onda se possuírem links em comum, para não acarretar problemas na transmissão na fibra. E a última característica, reutilização de comprimento de onda, significa que dois caminhos ópticos podem ser atribuídos ao mesmo comprimento de onda, caso não possuam links em comum, fazendo com que haja um reaproveitamento de comprimentos de onda e conseqüentemente de canais para a transmissão (Chadha, 2019). A figura 4 mostra um exemplo de redes baseadas em caminhos ópticos com as três características demonstradas.

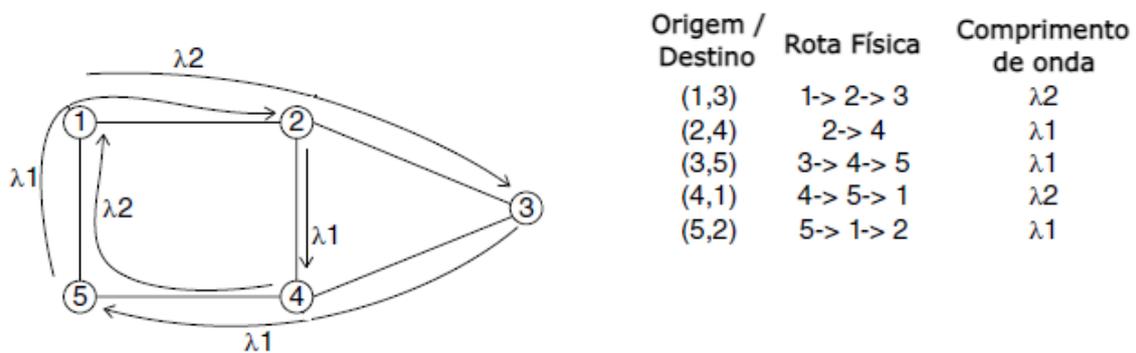


Figura 4: Atribuição e roteamento de comprimento de onda nas redes WDM. Imagem adaptada de (Chadha, 2019)

Este tipo de rede é muito utilizada nas comunicações de longa distância, sendo encontrada principalmente no núcleo da rede. Assim, para que elas atinjam uma grande capacidade de tráfego, conseguindo transmitir muitos gigabits por segundos, são utilizadas técnicas de multiplexação, de forma que atualmente são consideradas duas abordagens: a multiplexação por divisão no tempo, *Time Division Multiplexing* (TDM), e a multiplexação por comprimento de onda, *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) (Somani, 2006) A figura 5 exemplifica o funcionamento dessas duas tecnologias.

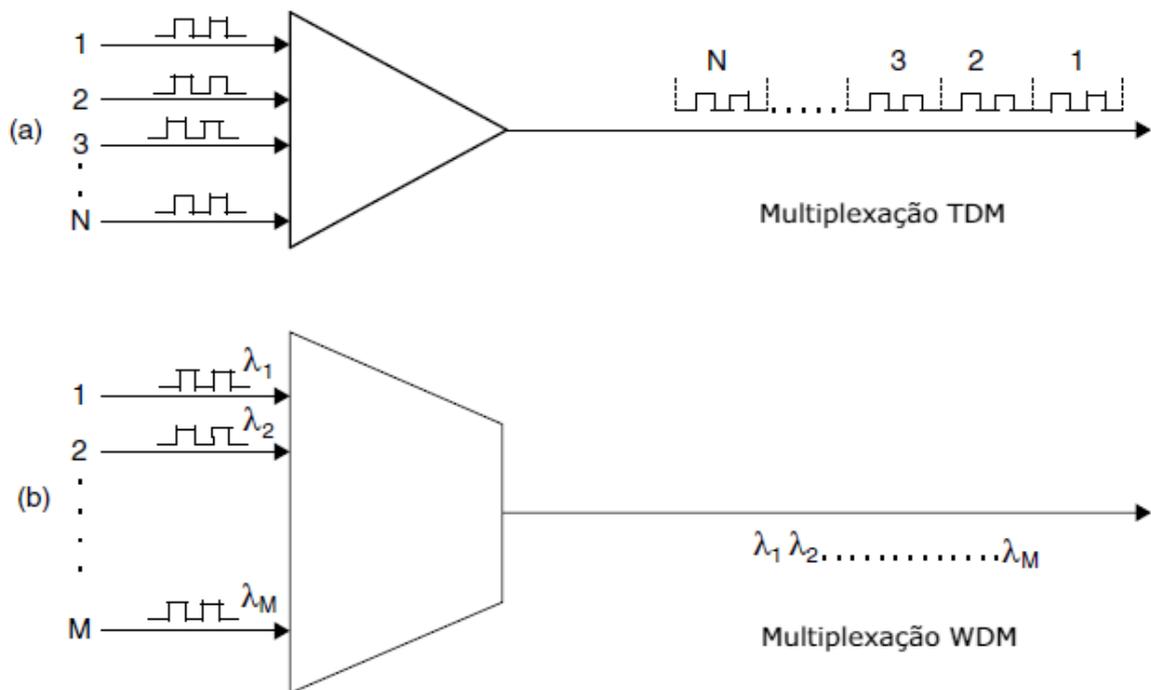


Figura 5: a) Multiplexação por divisão de tempo. b) Multiplexação por comprimento de onda. Imagem adaptada de (Chadha, 2019)

Também vale ressaltar o fato de que a multiplexação por divisão do tempo consiste em aumentar a taxa de bits enviados através do envio intercalado de sinais de tráfego menores, obtendo, assim, um canal com tráfego maior, devido à junção desses tráfegos baixos. Por exemplo, se houver 4 tráfegos a 10Gbs/s, eles podem ser multiplexados de forma a dar origem um outro fluxo a 40Gbs/s. É importante salientar que essa multiplexação é feita no domínio elétrico e, portanto, sua utilização nas redes ópticas necessitam da conversão óptica para eletrônico e depois para óptico novamente (O-E-O). Assim, para utilizar o potencial da fibra óptica de forma eficiente, além de usar o TDM é utilizada a multiplexação por comprimento de onda, WDM. Com essa tecnologia, múltiplos sinais ópticos podem ser transmitidos simultaneamente e de forma independente em uma mesma fibra, criando canais virtuais (Chadha, 2019).

Além do que já foi citado, é pertinente salientar que as redes ópticas WDM utilizam o espectro, operado pelos sistemas de comunicações ópticas (figura 1), dividido em canais menores com espaçamento fixo entre eles. É importante citar que os sistemas que fazem uso dessa tecnologia utilizam prioritariamente canais localizados na região da banda de 1.550 nm, que corresponde à banda C do espectro óptico, pois é nesta parte do espectro onde se tem a menor perda da potência do sinal na fibra, além de ser nesta região que melhores amplificadores

funcionam, apesar disso, na atualidade, já existem sistemas WDM que operam na região da banda L. Assim, para facilitar o avanço dessas redes, a União de Telecomunicação Internacional, do inglês *International Telecommunications Union* (ITU), padronizou essa divisão do espectro no domínio da frequência declarando um espaçamento fixo de 50 GHz ou 100 GHz, originando, assim, diversos canais fixos (Ramaswami *et al.*, 2009), como mostra a figura 6. A partir desses canais, muitos sinais ópticos podem ser transmitidos simultaneamente e independentemente em uma única fibra.

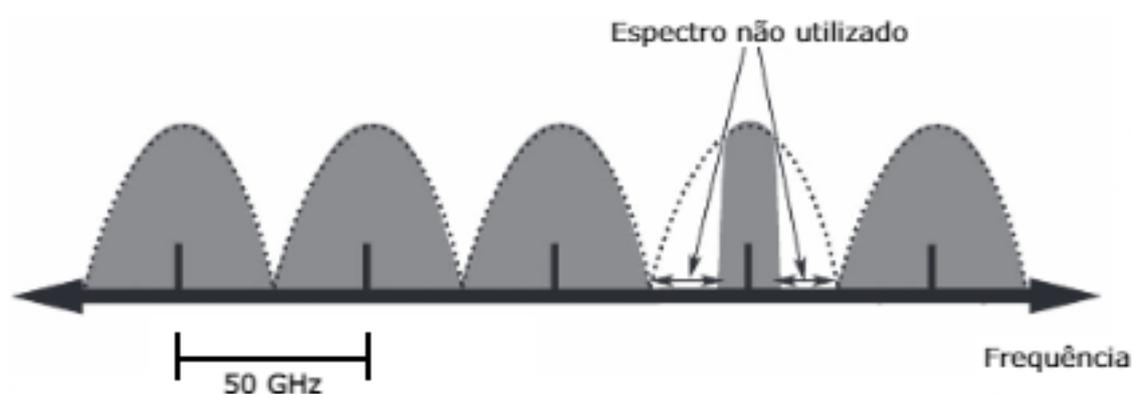


Figura 6: Espectro nas redes ópticas baseadas na tecnologia WDM. Imagem adaptada de (Chatterjee *et al.*, 2015)

Ademais, um termo bastante importante nas redes WDM é a transparência. Este termo está relacionado às redes totalmente ópticas, ou seja, são aquelas nas quais os dados são transmitidos para o destino apenas no domínio óptico, sendo necessária a conversão para o eletrônico apenas nos nós de borda. Essa característica proporciona algumas vantagens como, por exemplo, o fato de que as redes totalmente ópticas são indiferentes ao formato de modulação, podendo, assim, serem operadas em diferentes infraestruturas. Entretanto, as redes transparentes possuem limitações, visto que elas acumulam muitas distorções em longas distâncias, causando uma maior degradação no sinal e assim tornando impossível o reconhecimento (Strand, 2001). Como uma forma de solução para esse problema, faz-se necessária a utilização de regeneradores, os quais, normalmente, empregam um processo eletrônico. Desse modo, há a diminuição da transparência da rede e do desenvolvimento de algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda que minimizem o efeito da degradação do sinal nessas redes (Azodolmolky *et al.*, 2009).

Como visto anteriormente, as redes WDM se caracterizam por fazerem comunicação

---

direta entre nós a partir de caminhos ópticos, onde cada um corresponde a um comprimento de onda. Isso é possível a partir da existência da camada óptica, cuja responsabilidade é gerar esses caminhos ópticos, assim como o seu gerenciamento para as camadas clientes. Diante disso, é importante compreender que a camada óptica concede esses caminhos ópticos sobre a fibra óptica a partir de elementos como os terminais de linha óptica, do inglês *Optical Line Terminals* (OLTs), que são os responsáveis pela multiplexação dos comprimentos de onda em uma única fibra e também pela demultiplexação, geralmente é utilizado no final de um link WDM ponto a ponto, multiplexadores de inserção e remoção óptica, do inglês *Optical Add-Drop Multiplexer* (OADM), que são encarregados de retirar comprimentos de onda locais ao mesmo tempo que deixam passar outros e podem adicionar aos sinais de saída outros comprimentos de onda, e os comutadores ópticos, do inglês *optical Crossconnects* (OXC), que são incumbidos de realizar a comutação de comprimentos de onda de uma porta para outra, de forma que esses dispositivos apresentam uma grande quantidade de portas comparada aos OADM (Ramaswami *et al.*, 2009).

Como pode-se perceber, existem diferentes elementos e tecnologias que podem constituir as redes WDM e, dependendo das configurações desses elementos e tecnologias, pode-se desenvolver diferentes estruturas de caminhos óptico e redes. Dessa forma, existem alguns problemas para serem pensados no desenvolvimento de uma rede WDM: o problema do projeto da topologia de caminhos ópticos, do inglês *lightpath topology design* (LTD)(Ramaswami *et al.*, 2009), o qual se preocupa com as diferentes maneiras de colocar equipamento e sua quantidade para o transporte de tráfegos e o problema de alocação e roteamento de comprimento de onda, do inglês *routing and wavelength assignment* (RWA) (Mukherjee, 2000), que consiste em encontrar uma rota para cada caminho óptico e atribuir a esse caminho óptico um comprimento de onda cumprindo as restrições de continuidade de comprimento de onda, alocação de comprimento de onda distintas e a reutilização do comprimento de onda, como visto anteriormente.

Perante o conteúdo apresentado, é importante saber que um dos atributos chaves nas redes com roteamento por comprimento de onda é determinar o número e o conjunto de comprimentos de onda que são necessários para cada link WDM.(Ramaswami *et al.*, 2009) Diante disso, o estudo do problema RWA é de fundamental importância. Para simplificar, esse problema é dividido em dois subproblemas: o roteamento de caminho óptico, do inglês *lightpath routing* (LR)

---

e atribuição de comprimento de onda, do inglês *wavelength assignment* (WA). O subproblema de roteamento de caminho óptico tem como intuito encontrar rotas para a coleção de caminhos ópticos na rede, tendo como um dos objetivos minimizar a quantidade máxima do número de caminhos ópticos sobre os links físicos, podendo também minimizar o custo com elementos da rede tais como banda da rede, portas e regeneradores. Existem diversos algoritmos que buscam soluções para esse subproblema de roteamento, onde diversos fatores de custo são utilizados para determinar as melhores rotas, como, por exemplo, tamanho da rota, custo de potência e bloqueios na conexão (Ramaswami *et al.*, 2009), dentre eles o método mais simples é denominado roteamento fixo, o qual consiste em escolher a mesma rota para os pares de nós (origem e destino), normalmente essa rota fixa é computada uma única vez e normalmente é utilizado algum algoritmo para determiná-la, como por exemplo os algoritmos de encontrar o menor caminho como o Dijkstra (Dijkstra, 1959).

Já o subproblema de atribuição de comprimento de onda é caracterizado por providenciar a atribuição de comprimento de onda para cada caminho óptico obedecendo às restrições de continuidade de comprimento de onda e de alocação de comprimento de onda distintos, tendo como objetivo minimizar a quantidade máxima de comprimento de onda sobre a fibra. Para tratar esse problema existem vários algoritmos, um simples e efetivo para as redes WDM é o algoritmo chamado de *First Fit*, na tradução ao português fica “primeiro que se enquadrar” (Sun *et al.*, 2003). Esse algoritmo consiste em indexar os comprimentos de onda existentes na rede e, diante disso, escolher o comprimento de onda com o menor índice que esteja disponível diante das restrições. Fazendo isso, esse algoritmo utiliza mais os comprimentos de onda com índices menores, fazendo com que os de maior fiquem livres para serem utilizados posteriormente.

Como foi visto anteriormente, as redes WDM possuem uma grande capacidade de transmissão de dados, podendo chegar a até mais que 100 Gbps (Zhao *et al.*, 2014), porém o uso da tecnologia WDM divide o espectro em faixas de largura de banda fixas (figura 6), fazendo com que a taxa de transmissão tenha um baixo grau de liberdade. Porém, a taxa de transmissão com essa está se tornando cada vez menos adequada para os tráfegos da atualidade, que estão cada vez mais heterogêneos, existindo uma necessidade da criação de uma tecnologia que se adeque aos diferentes tipos de tráfegos e uma maior eficiência na alocação dos recursos espectrais. Assim,

---

diante da necessidade das redes ópticas de seguir essa direção mais flexível, as Redes Ópticas Elásticas têm aparecido como uma solução viável.

## 2.4 REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

As Redes ópticas Elásticas têm sido tratadas como uma alternativa para lidar com tráfegos mais heterogêneos, características importantes para as demandas atuais e futuras de tráfegos. As tecnologias empregadas pelas redes ópticas mais utilizadas atualmente se baseiam na tecnologia *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM), que se fundamenta na tecnologia de WDM, utilizando os canais fixos do espectro padronizado pela ITU, de forma que não vão mais ser capazes de suportar as heterogêneas demandas por tráfego. Além disso, por exemplo, mesmo utilizando as modulações mais sofisticadas e atuais, elas só podem acomodar até 200 Gbps na grade fixa de 50 Ghz, porém não se consegue sustentar para tráfegos de 400 Gbps ou superiores, já que a banda necessária para essa taxa de transmissão é superior aos 50 Ghz. ([Chadha, 2019](#))

Outro problema em se tratando das redes convencionais é a ineficiência espectral, pois, por utilizarem uma grade fixa, quando recebem uma demanda que precise de pouca banda, precisa ser enviado utilizando a grade fixa mesmo que não utilize toda a capacidade da grade, gerando um desperdício no espectro óptico. Com isso, as redes ópticas elásticas passaram a ser um grande foco nas pesquisas, especialmente pelo fato de oferecerem uma tecnologia que suporta taxas de dados flexíveis, variando desde demandas menores até grandes demandas por tráfego, como por exemplo 400 Gbps ou 1 Tbps ([Chatterjee et al., 2015](#)). Por conta disto, esse novo tipo de tecnologia consegue sustentar essa grande e heterogênea demanda de tráfegos, especialmente pelo fato de usarem uma tecnologia mais flexível do que as Redes WDM, pois empregam uma granularidade menor no espectro, visto que dividem o espectro óptico em canais menores, sendo que esses canais menores podem ser denominados de slots de frequência ([Abkenar & Rahbar, 2017](#)). Assim, de acordo com a requisição, pode-se utilizar um ou mais slots, ou canais de bandas, da rede. Tais slots são definidos com largura de 12,5 GHz ou menos ([Sone et al., 2011](#)) Por exemplo: para requisições que precisem de uma banda maior são utilizados mais de um slot, já para as requisições menores, utilizam-se menos slots, desse modo as EONs conseguem

---

realizar a contração ou a expansão da largura de banda dos canais, fazendo com que haja uma maior utilização do espectro. Assim, essas redes são capazes de fornecer um caminho óptico com largura de banda variável e adaptada ao fluxo.

Outro fato importante de ser mencionado é que a utilização efetiva dessa divisão do espectro óptico em slots de frequência menores que as tradicionais redes WDM foi impulsionada pelo emprego da técnica OFDM, do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). De forma que essa tecnologia faz com que os dados sejam transmitidos através de múltiplas subportadoras ortogonais. Assim, a banda espectral de subportadoras adjacentes podem ter sobreposições sem que haja interferências devido à modulação ortogonal utilizada por essa tecnologia e, com isso, o espectro óptico pode ser dividido em canais menores do que os presentes nas redes WDM. Além disso, a transmissão de diferentes taxas de dados e a atribuição do espectro mais flexível também estão relacionados com a utilização desse tipo de modulação, visto que o OFDM permite uma transmissão com bandas flexíveis através da atribuição de uma quantidade de subportadoras, ou seja, o comprimento da banda das subportadoras OFDM são representadas como os slots de frequências (Christodoulopoulos *et al.*, 2010). Por exemplo, para requisições que precisem utilizar pouca banda ou que precisam de pouca taxa de bits são alocados menos subportadoras ou slots de frequências, já para aquelas que precisam de mais são alocadas uma quantidade maior de subportadoras ou slots de frequência. Dessa forma, aloca-se apenas a quantidade necessária de subportadoras para a demanda, sendo evitado, assim, o desperdício de banda. A figura 7 mostra essa relação de quanto maior a alocação de slots de frequência, que são representadas pelas subportadoras, maior é a taxa de dados para ser transmitida. Nessa imagem, pode-se perceber, também, que as sobreposições das subportadoras não possuem interferência em si, visto que essa modulação se baseia no emprego de sinais ortogonais.

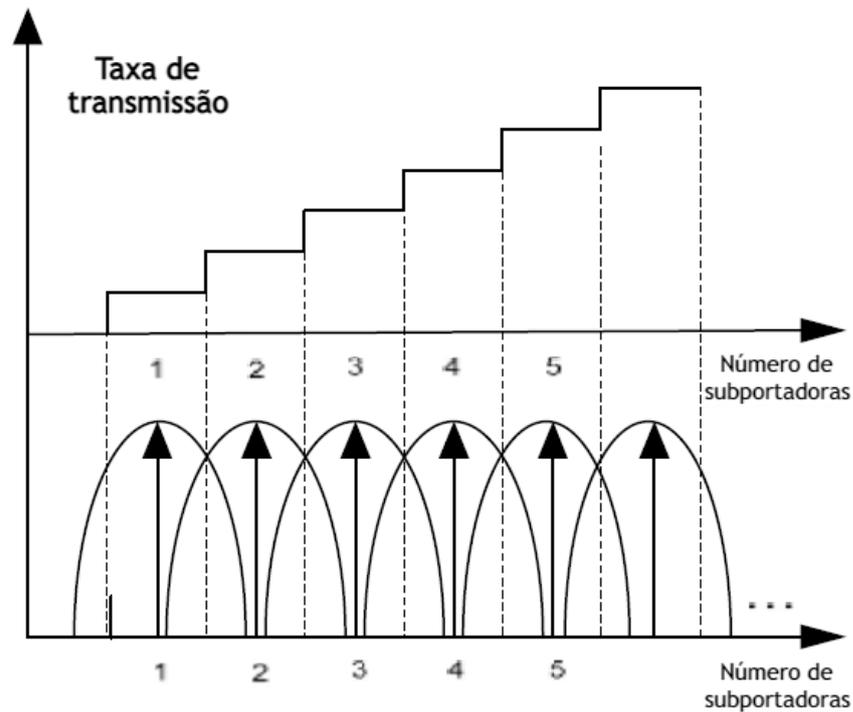


Figura 7: Taxa de transmissão de dados em função do número de subportadoras (Christodoulopoulos *et al.*, 2010)

De forma que, neste tipo de rede, os sinais ópticos são roteados ao longo do caminho para o seu destino através de equipamentos ópticos flexíveis que se adaptam à taxa de dados (Talebi *et al.*, 2014). Desse modo, para o funcionamento das redes EON, são necessários alguns equipamentos diferentes do das redes WDM. Pois a arquitetura básica desse tipo de rede consiste de *Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connections* (BV-WXCs) e de *Bandwidth Variable Transponder* (BVT). O primeiro exerce basicamente as mesmas funções que um OXC nas redes WDM, porém eles se adaptam à largura de banda. Assim, é interessante salientar que esses dispositivos são formados pela junção de BV-WSS, esses elementos são responsáveis por realizarem a multiplexação e a demultiplexação, assim como também realizarem funções de comutação dos sinais ópticos, como mostra a figura 8. Já o BVT é responsável por transmitir e receber sinais ópticos de acordo com a demanda de tráfego e do tamanho da banda espectral (Abkenar & Rahbar, 2017) (Chadha, 2019).

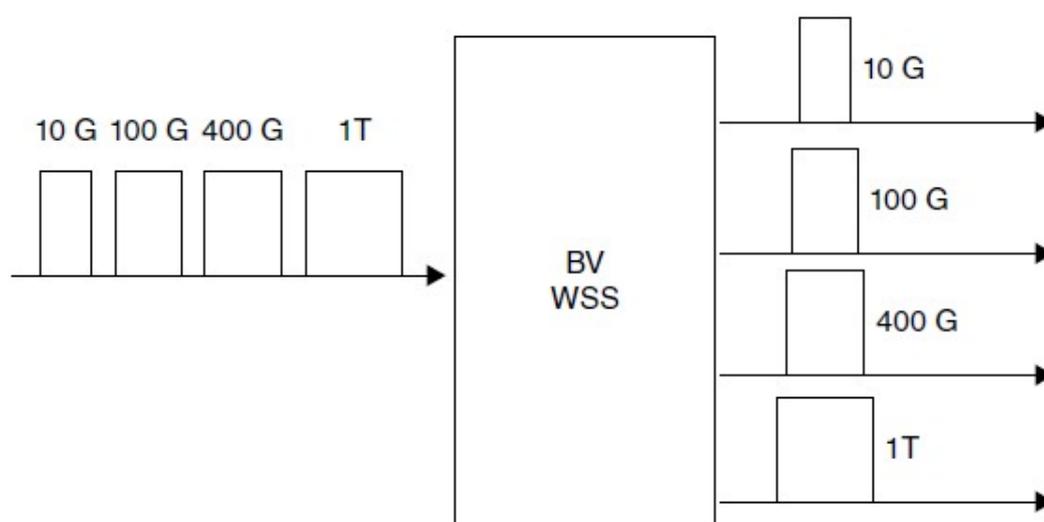


Figura 8: Funcionamento do BV-WSS. Imagem adaptada de (Chadha, 2019)

Além do que já foi citado, é importante ressaltar que a utilização das Redes ópticas Elásticas proporciona muitas vantagens em relação às redes ópticas WDM. Assim, resumindo essas qualidades, pode-se citar: a taxa flexível de dados suportados, através da possibilidade de agrupar subportadoras para a transmissão de uma requisição, como mostra a figura 7; eficiência espectral, com a utilização da tecnologia OFDM, as subportadoras adjacentes podem se sobrepor entre si sem perda, além da Adequação de banda requisitada à banda alocada.

Apesar disso, mesmo com inúmeras vantagens atrativas para o futuro, as EONs possuem alguns problemas no seu desenvolvimento e gerenciamento, como por exemplo o fato de que a quantidade de recursos espectrais que precisam ser gerenciados em toda a rede é relativamente maior do que o número de comprimentos de onda existentes nas redes WDM. Outra desvantagem é que, com a possibilidade de suportar várias taxas de dados, neste tipo de redes é preciso ter um rastreamento no comprimento do espectro e na frequência central dos sinais ópticos, além de necessitar de administração nos elementos que constituem a rede, como os BVT e os BV-WXCs (Talebi *et al.*, 2014). Além disso, devido à necessidade de o caminho óptico ser atribuído a uma rota e também a uma faixa apropriada no espectro óptico, as redes ópticas elásticas passam a ter o impasse da restrição de contiguidade e continuidade no espectro. Como essas restrições estão relacionadas à alocação do espectro e ao roteamento das requisições, têm se tornado uma das principais preocupações no desenvolvimento das EON, dando origem ao problema

chamado Roteamento e Alocação do espectro, do inglês *Routing and spectrum assignment* (RSA). Ademais, é importante perceber que este problema é parecido com o RWA nas redes WDM, neste caso, o impasse consiste em determinar uma rota e um comprimento de onda para o caminho óptico, porém com a restrição de que o mesmo comprimento de onda deve ser atribuído ao longo do caminho e cada caminho óptico precisa ser representado por um comprimento de onda distinto nos caminhos que possuem algum link em comum. Já no RSA, para a rota escolhida, é necessário alocar uma região apropriada do espectro para cada canal óptico, tendo como restrição a continuidade e a contiguidade, ao invés do comprimento de onda (Chadha, 2019). Além disso, a restrição de continuidade no espectro óptico abrange a necessidade de que os mesmos slots de frequências atribuídos para uma requisição de conexão sejam iguais em todos os links que constituem o caminho óptico, desde a origem até o destino (Yuan *et al.*, 2019). Como pode-se perceber, esse problema é equivalente à restrição de comprimento de onda nas redes WDM no problema de RWA, com a diferença de que para o RWA essa restrição é para os comprimentos de onda e não para a banda do espectro óptico. Já a restrição de contiguidade no espectro engloba as requisições que necessitam de mais de um slot de frequência para gerar um super canal. Essa quantidade de slots de frequência que formam um único canal para a requisição precisa ser adjacente em todos os links que constituem o caminho óptico. Além das restrições de contiguidade e continuidade do espectro óptico nas redes EON, existe também a restrição da não sobreposição do espectro, que está relacionada à limitação de que os slots de frequência atribuídos a uma conexão não podem ser atribuídos a outra conexão que possua um ou mais links em comum, porém podem ser atribuídos caso a conexão não tenha links em comum. (Yuan *et al.*, 2019). Assim, pode-se concluir que essa limitação é parecida com a restrição da atribuição distinta de comprimento de onda nas redes WDM, porém, no caso das EONs, é necessário evitar a sobreposição da banda de frequência utilizada nas conexões com links em comum para não gerar sobreposição dos sinais.

A figura 9 mostra uma explicação de como cada restrição do RSA (continuidade e contiguidade) é na prática, considerando uma requisição de 2 Slots. Pode-se observar que para um slot estar contínuo, é necessário que o mesmo slot esteja disponível em todos os links que constituem a rota. No caso da figura 9, se uma rota for constituída pelos links 1,2 e 3, os

slots de o índice 2,3 e 7 são considerados contínuos ou alinhados. Porém, para estabelecer uma conexão, além dos slots precisarem estar alinhados na rota, os slots precisam ser contíguos, ou seja, precisam também serem vizinhos. Desse modo, no caso da requisição precisar de 2 slots, a conexão só poderia ser estabelecida nos slots 2 e 3.

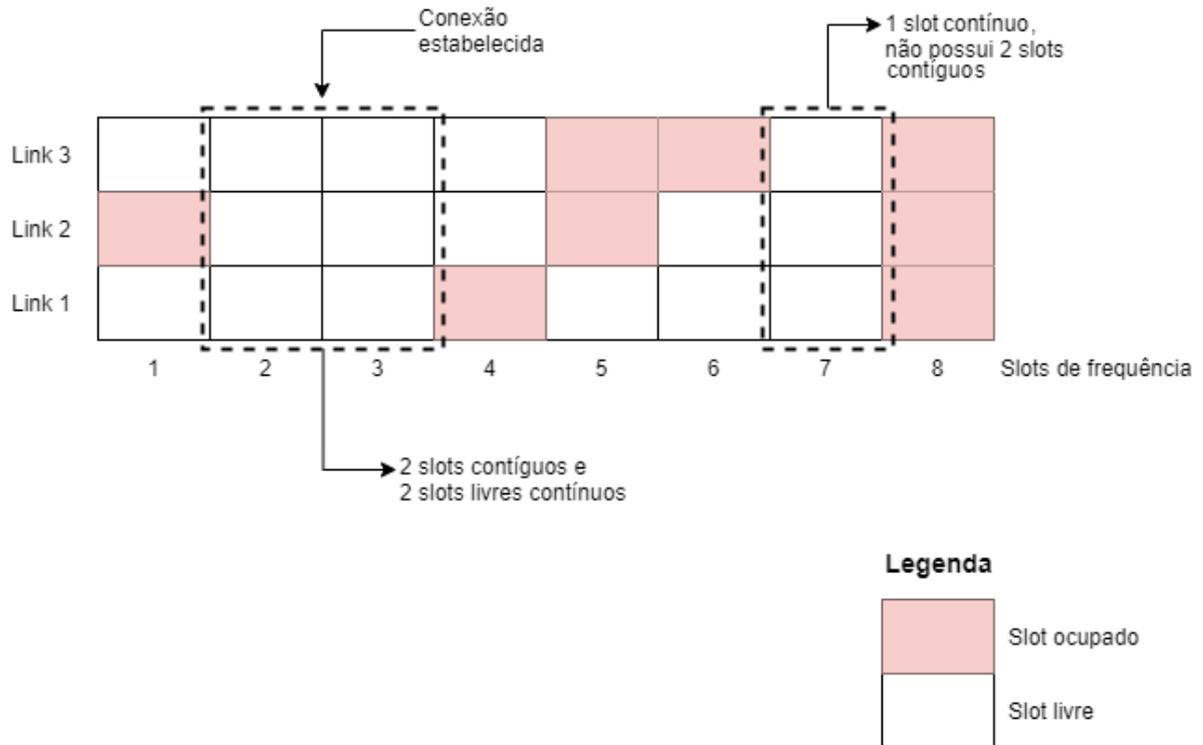


Figura 9: Exemplo da restrição de continuidade e contiguidade para uma requisição com largura de banda equivalente a 2 slots de frequência e rota constituída pelos links 1, 2 e 3.

Em suma, o problema do RSA emergiu como uma das principais e essenciais questões para a implantação das redes ópticas elásticas, visto que a performance de uma rede não depende apenas dos elementos físicos, mas também de como se gerenciam os recursos dela, de forma que muitos algoritmos estão sendo desenvolvidos com a finalidade de encontrar uma melhor solução para esse problema, para que alcance melhores resultados mesmo com a limitação física da rede. Então, na próxima seção, será discutido um pouco mais sobre o problema de RSA, assim como serão apresentados alguns algoritmos que tentam solucionar esse problema.

# 3

## O PROBLEMA DE ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO NAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Em redes ópticas elásticas, a solução do problema do Roteamento e Alocação do espectro (RSA) é muito importante para o desenvolvimento desse tipo de rede. Visto que, quando várias requisições diferentes são requeridas para estabelecer uma conexão, as soluções de RSA têm o papel de verificar as atuais condições da rede e selecionar a melhor escolha da rota e da região espectral, para que seja estabelecida a conexão e para que consiga atender o número máximo de requisições. Assim, o impasse desse problema é que ele é do tipo NP (do inglês *Nondeterministic Polynomial time*), o que significa que pode ser resolvido utilizando programação linear, do inglês *Integer Linear Programming* (ILP) quando o tráfego da rede é conhecido. Apesar disso, o tempo computacional para encontrar a solução aumenta exponencialmente à medida em que o número de variáveis cresce e isso faz com que, de acordo com o número crescente de nós na rede, esse processo de busca se torne computacionalmente inviável. (Chadha, 2019) Então, como uma alternativa para resolver esse problema de forma mais eficiente e para o caso do tráfego ser dinâmico, muitos algoritmos heurísticos estão sendo propostos, os quais buscam uma solução que mais se aproxime da solução ótima (Varvarigos & Christodoulopoulos, 2014).

Ademais, é importante ressaltar que os algoritmos de Roteamento e alocação do espectro podem ser classificados em: RSA estático e RSA dinâmico. O primeiro engloba cenários nos quais o tráfego é previamente conhecido e, desse modo, tem como objetivo encontrar caminhos

---

e um conjunto de slots contíguos para atender a demanda com a finalidade de alocar a maior quantidade possível de conexões na rede. De forma que esse tipo de algoritmo é utilizado quando o padrão no tráfego é conhecido e a capacidade da rede é fixada. Com isso, pode-se dizer que os caminhos das requisições não serão removidos em um curto espaço de tempo após a concretização das conexões. (Talebi *et al.*, 2014) Já o segundo abrange cenários onde as requisições chegam de forma aleatória, onde não se sabe o tráfego na rede e, portanto, não se tem controle sobre as requisições que irão chegar aos nós da rede. Diante disso, o RSA dinâmico deve ser resolvido com a rede em operação e, a depender do estado da rede no momento da requisição e caso os recursos disponíveis para o caminho óptico requisitado não sejam suficientes para estabelecer essa conexão, essa requisição é bloqueada. Nesse contexto, a probabilidade de bloqueio, do inglês *blocking probability* (BP), das conexões das requisições que chegam de forma aleatória é uma métrica de performance para os algoritmos de RSA, na qual os melhores algoritmos se propõem a ter uma menor probabilidade de bloqueio (Abkenar & Rahbar, 2017).

Assim, pode-se concluir que, com o objetivo de diminuir a sua complexidade, o problema de RSA pode ser dividido em dois subproblemas, o do roteamento das requisições e da alocação do espectro. Esses subproblemas podem ser resolvidos sequencialmente, ou seja, primeiro se escolhe a rota desejada das requisições e posteriormente se soluciona a alocação no espectro da rota selecionada no passo anterior. A seguir serão tratados esses subproblemas separadamente, assim como a explanação de alguns algoritmos utilizados para a solução dos mesmos.

### 3.1 ROTEAMENTO

Os algoritmos de roteamento buscam a escolha de caminhos ópticos ou rota de um nó de origem para um nó de destino, para ser realizada a conexão das requisições. É interessante ressaltar, também, que muitos dos algoritmos de roteamento nas redes WDM são utilizados para as redes Ópticas Elásticas. A seguir, serão abordados alguns dos algoritmos de roteamento mais conhecidos na literatura. (Scaraficci & da Fonseca, 2014).

### 3.1.1 Roteamento Fixo

No roteamento fixo, do inglês *fixed routing* (FR), cada par de nó origem-destino possui apenas uma única rota, computada previamente utilizando, em sua maioria, algoritmos que buscam o menor caminho (Zang *et al.*, 2000), como por exemplo de Dijkstra. Assim, o menor caminho em uma rede pode ser adquirido considerando a distância física entre nós ou o número de saltos da conexão, o qual é representado pela quantidade de enlaces que compõem a rota, considerando o mesmo custo da transmissão para cada enlace. Diante disso, com esse tipo de roteamento, já é estabelecido o caminho que será percorrido pelas requisições antes de a rede entrar em operação, desse modo não depende do estado da rede para a escolha da rota. Com isso, após a chegada de requisições, o problema se restringe em apenas decidir qual parte do espectro disponível será utilizada. De forma que um dos empecilhos em utilizar esse tipo de roteamento é que, como não possui outras rotas alternativas, não consegue tratar falhas nos enlaces, além de ter uma maior probabilidade no bloqueio das requisições, por não utilizarem de forma eficiente os recursos da rede (Chatterjee *et al.*, 2015) (Zang *et al.*, 2000)

### 3.1.2 Roteamento Fixo-alternativo

Já o roteamento Fixo-alternativo, do inglês *Fixed Alternate Routing* (FAR), pode ser considerado uma adaptação do Fixo, pois consiste em definir um conjunto ordenado de rotas para cada par de nós origem-destino previamente computado. Assim, essas rotas são ordenadas de acordo com algum critério, o qual pode ser, por exemplo, a menor distância física entre os nós de origem e destino, ou o menor número de saltos. Geralmente, são formados por rotas disjuntas, ou seja, que não possuem nenhum link em comum, pois, com isso, tendem a ter uma maior proteção à rede no caso de ocorrer alguma falha em algum link (Zang *et al.*, 2000). De forma que, quando uma requisição chega, o nó de origem tenta estabelecer uma conexão com cada rota que compõe a lista, até que uma rota tenha disponível a sequência de slots necessária para a requisição. Se, dentre todas as rotas da lista, não haja algum recurso disponível, então a requisição é bloqueada. Diante disso, pode-se verificar que, com a presença de rotas disjuntas na lista pré-computada de

---

rotas, a probabilidade de bloqueio das requisições é menor, se comparada ao roteamento fixo, pois desse modo, se tem mais opções de rotas para serem analisadas quando a rota principal não possuir recursos disponíveis. Apesar disso, um ponto negativo nesse algoritmo é a complexidade computacional, que é maior do que no roteamento fixo ([Chatterjee et al., 2015](#))

### 3.1.3 Roteamento Adaptativo

O roteamento adaptativo, do inglês *adaptive routing* (AR), é considerado um tipo de roteamento dinâmico, ou seja, possui a capacidade de utilizar qualquer rota possível da rede, dentre os pares de nós origem-destino. Desse modo, dependendo da heurística utilizada, a requisição só poderá ser bloqueada se nenhuma rota dentro da topologia da rede possuir recursos suficientes para a requisição, mas também considera informações sobre o estado da rede, o qual é determinado pelo conjunto de todas as conexões ativas no momento ([Bhide et al., 2001](#)). Assim, já que esse algoritmo tem a capacidade de considerar todas as possíveis rotas entre o par de nós, ele acaba possuindo baixa probabilidade de bloqueio em comparação com os outros algoritmos de roteamento, porém com uma maior complexidade computacional e, além disso, possui uma necessidade maior de suporte de um gerenciador, pois, constantemente, precisa atualizar o estado da rede ([Chatterjee et al., 2015](#)).

## 3.2 ALOCAÇÃO DE ESPECTRO

As redes ópticas elásticas têm como uma de suas principais características o fato de fornecerem caminho ópticos com largura de banda variável e, com isso, têm a capacidade de se adaptar à demanda da requisição. Isso é possível devido à divisão do espectro óptico em grades menores, também chamadas de slots de frequência, atualmente são definidos com 12,5GHz. Essa característica faz com que as Redes Elásticas tenha uma maior eficiência espectral, pois consegue se adaptar com as requisições menores, fazendo com que não tenham tanto desperdício do espectro, se comparadas com as redes WDM. Além de se adaptarem também para requisições que necessitam de mais bandas, pois podem ser alocados dois ou mais slots para uma mesma

requisição.

Além disso, outro ponto importante é que a alocação do espectro óptico nas redes ópticas elásticas precisa atender duas restrições: a continuidade dos slots de frequência ao longo do caminho e a restrição da contiguidade dos slots de frequência, este deve-se à necessidade de garantir a adjacência do espectro entre as subportadoras, fazendo com que todas as faixas alocadas sejam adjacentes. Diante disso, os algoritmos de alocação do espectro têm o objetivo de determinar qual o conjunto de slots contíguos disponível mais adequado para efetivar a conexão entre um par de nós (Talebi *et al.*, 2014). De forma que, na escolha de um algoritmo de alocação de espectro, são levados em conta alguns parâmetros, tais como a probabilidade de bloqueio das requisições, utilização do espectro, o estado da rede antes e depois e, também, a fragmentação do espectro. Também é importante salientar o fato de que o problema da fragmentação é amplificado nas redes ópticas elásticas, em relação às redes WDM, devido à existência de várias requisições que precisam de uma quantidade variada de slots, com isso, quando essas requisições são desativadas, as mesmas deixam de ocupar a faixa de espectro na rede. De forma que esta faixa de espectro fica disponível e formam buracos, que são uma sequência de slots livres, localizados no espectro, deixando, assim, o espectro fragmentado. Porém, tal fato é prejudicial pois uma das restrições dos algoritmos de RSA para estabelecer uma conexão é justamente a necessidade de alocar, em uma mesma conexão, slots adjacentes e que possuem a continuidade dos mesmos slots em todos os links que formam o caminho óptico, fazendo com que um espectro muito fragmentado possa aumentar a probabilidade de bloqueio das conexões. Conclui-se, então, que diversos algoritmos de alocação de espectro têm sido propostos, cada um com critérios e métricas diferentes. A seguir serão tratados alguns dos principais algoritmos utilizados neste tipo de rede e, no próximo capítulo, serão apresentados resultados de simulações com alguns destes algoritmos, utilizando o roteamento fixo, para analisarmos de forma prática o desempenho de cada um deles e, desse modo, poder compará-los de acordo com as suas métricas.

### 3.2.1 *First Fit*

O algoritmo *First Fit* foi derivado do algoritmo com o mesmo nome do problemas RWA nas rede óptica WDM, no qual consistem em indexar os slots de frequência e, desse modo, aloca o menor índice ou a primeira faixa de slots livres que cabe a requisição. Assim, quando não se consegue achar recursos após a verificação de todos os slots possíveis, a conexão é então bloqueada. Esse algoritmo é considerado um dos melhores devido à sua baixa complexidade e também pelo fato de sua probabilidade de bloqueio ser baixa (Chatterjee & Oki, 2015). O algoritmo 1 mostra o como o First Fit foi implementado para as realizações das simulações do próximo capítulo .

---

#### Algoritmo 1: *First Fit*

---

```

1 Entrada: uma requisição  $R$  que necessita de  $k$  slots de frequência , um objeto rota
   que representa o caminho do nó de origem para o nó de destino e um inteiro
   NumSlots que representa o número total de slots de frequência por link.
2 Saida: bloco de slots livres  $B[i,f]$  com início no slot com índice  $i$  e fim no slot com
   índice  $f$  no espectro.
3 Início:
4  $sumSlots \leftarrow 0$ ;
   for  $int\ s \leftarrow 0$  to  $s < NumSlots$  step 1 do
5     if slot com índice  $s$  está disponível em toda rota then
6          $sumSlots++$ ;
7         if  $sumSlots = k$  then
8              $i \leftarrow s-k+1$ 
9              $f \leftarrow s$ 
10            return  $[i,f]$ 
11        else
12             $sumSlots \leftarrow 0$ ;
13 Fim

```

---

### 3.2.2 *Random Fit*

O *Random Fit* consiste em selecionar de forma aleatória o grupo de slots contíguos requeridos para o estabelecimento da conexão entre os slots disponíveis. De forma que, após a atribuição do espectro, essa lista de slots disponíveis é atualizada. Do mesmo modo que, quando

uma conexão termina, essa lista também é atualizada. Esse algoritmo é considerado um dos piores, pelo fato de não possuir uma métrica para a redução dos problemas encontrados nas redes ópticas elásticas, pois ele seleciona os slots de forma aleatória. Assim, utilizar esse algoritmo faz com que apenas diminua a chance de escolher os mesmos slots de frequência em várias conexões. Ademais, este tipo de algoritmo também pode ser utilizado nas redes WDM (Chatterjee & Oki, 2015). O algoritmo 2 apresenta a implementação do Random Fit.

---

**Algoritmo 2:** *Random Fit*

---

```

1 Entrada: uma requisição  $R$  que necessita de  $k$  slots de frequência, um objeto rota
   que representa o caminho do nó de origem para o nó de destino e um inteiro
   NumSlots que representa o número total de slots de frequência por link.
2 Saída: bloco de slots livres  $B[i,f]$  com início no slot com índice  $i$  e fim no slot com
   índice  $f$  no espectro.
3 Início:
4  $availableSlotsindex \leftarrow [0, 1, 2, \dots, NumSlots - 1]$ ;  $\triangleright$  inicializa com os índices de todos
   os slots existentes no link
    $int\ slotIndexChosen \leftarrow null$ 
5 while  $availableSlotsindex.size() > 0$  do
6    $slotIndexChosen \leftarrow random(0, availableSlotsindex.size() - 1)$ ;  $\triangleright$  Gera um número
   aleatório entre os valores 0 e  $availableSlotsindex.size() - 1$ 
7    $int\ s = availableSlotsindex.at(slotIndexChosen)$ ;
8   if bloco de slots com índice entre  $s$  e  $s+k-1$  estiver livre em toda rota then
9      $i \leftarrow s$ 
10     $f \leftarrow s+k-1$ 
11    return  $[i,f]$ 
12  else
13     $remove\ availableSlotsindex[slotIndexChosen]$ ;
14 Fim

```

---

### 3.2.3 Last Fit

O *Last Fit* pode ser considerado o oposto do *First Fit*, pois em vez de selecionar o grupo de slots contíguos com o menor índice, este seleciona os slots contíguos disponíveis com o maior índice (Chatterjee et al., 2015). Desse modo, pode-se considerar que o seu desempenho e a sua complexidade é muito parecida com o do *First Fit*. O algoritmo 3 apresenta como o *Last Fit* pode ser implementado. Pode-se observar que é bem parecido com o Algoritmo *First Fit*, sendo diferente apenas pelo fato de começar a busca de slots livres pelo fim do espectro, em vez do

começo.

---

**Algoritmo 3: Last Fit**

---

```

1 Entrada: uma requisição  $R$  que necessita de  $k$  slots de frequência , um objeto  $rota$ 
   que representa o caminho do nó de origem para o nó de destino e um inteiro
    $NumSlots$  que representa o número total de slots de frequência por link.
2 Saida: bloco de slots livres  $B[i,f]$  com início no slot com índice  $i$  e fim no slot com
   índice  $f$  no espectro.
3 Início:
4  $sumSlots \leftarrow 0$ ;
   for  $int\ s \leftarrow NumSlots - 1\ to\ s \geq 0\ step\ -1\ do$ 
5     if slot com índice  $s$  está disponível em toda rota then
6          $sumSlots++$ ;
7         if  $sumSlots = k$  then
8              $i \leftarrow s$ 
9              $f \leftarrow s+k-1$ 
10            return  $[i,f]$ 
11        else
12             $sumSlots \leftarrow 0$ ;
13 Fim

```

---

### 3.2.4 Least Used

No algoritmo *Least used*, é selecionado o grupo de slots contíguos disponíveis que é menos utilizado nos links da rede. Se, por acaso, houver mais de um conjunto de slots que compartilhem o mesmo número de utilização, é empregado o algoritmo de *First Fit* para selecionar os slots como desempate. Utilizar esse algoritmo faz com que a carga da rede se espalhe para todo o espectro e com isso pode gerar altas probabilidade de bloqueios (Chatterjee et al., 2015). O algoritmo 4 mostra a maneira como este algoritmo pode ser implementado.

---

**Algoritmo 4: Least Used**


---

```

1 Entrada: uma requisição  $R$  que necessita de  $k$  slots de frequência , um objeto rota
   que representa o caminho do nó de origem para o nó de destino e um inteiro
   NumSlots que representa o número total de slots de frequência por link.
2 Saida: bloco de slots livres  $B[i,f]$  com início no slot com índice  $i$  e fim no slot com
   índice  $f$  no espectro.
3 Início:
4 slotOccupation: Vetor de pares de inteiros (sum,j), na qual sum é a quantidade de
   vezes que o slots com índice  $j$  é utilizado em toda rede.
5 sumOccupationSlot  $\leftarrow 0$ ;
6 for  $int\ s \leftarrow 0$  to  $s < NumSlots$  step  $+1$  do
7   if bloco de slots com índice entre  $s$  e  $s+k-1$  estiver livre em toda rota then
8     sumOccupationSlot  $\leftarrow 0$ ;
9     for  $int\ p \leftarrow s$  to  $p \leq (s+k-1)$  step  $+1$  do
10      TopologySumOccupation  $\leftarrow$  occupation(p);  $\triangleright$  retorna a quantidade de
        vezes que o slot com índice  $p$  é utilizado em toda rede.
11      sumOccupationSlot  $\leftarrow$  sumOccupationSlot + TopologySumOccupation;
12      coloca o par (sumOccupationSlot,s) no vetor slotOccupation;
13 Ordenar de forma crecente o vetor slotOccupation de acordo com a quantidade de
   utilização do slot na rede
14 if occupationSlot.size  $> 0$  then
15   chosenSlot  $\leftarrow$  occupationSlot[0].get(j)  $\triangleright$  realizar a atribuição no bloco de slot
     que são menos utilizados na rede
16    $i \leftarrow$  chosenSlot
17    $f \leftarrow$  chosenSlot+k-1
18   return  $[i,f]$ 
19 Fim

```

---

### 3.2.5 Most Used

O *Most Used* é o oposto do algoritmo *Least Used*, e, portanto, seleciona o grupo de slots disponíveis na rota que é mais utilizada em todos os links da rede. Assim, caso exista mais de um conjunto de slots que possuem o mesmo máximo de utilização em todos os links da rede, é utilizado o algoritmo *First Fit* como desempate. Ademais, esse tipo de algoritmo pode ser empregado também para redes ópticas WDM, porém, neste caso, o objetivo é selecionar o comprimento de onda mais utilizado na rede. Além disso, para este tipo de rede, este algoritmo chega a ter um melhor desempenho do que o *First Fit*, em se tratando de probabilidade de bloqueio. Porém, na sua adaptação para as EONs esse algoritmo apresenta níveis de probabilidade de bloqueios maiores do que o *First Fit* (Sone et al., 2011) (Chatterjee

*et al.*, 2015). Essa característica pode ser vista nas simulações do capítulo 4. É interessante comentar que estas simulações foram realizadas a partir da implementação seguindo os passos apresentados no algoritmo 5. Pode-se observar que este algoritmo é muito semelhante ao Least Used, pois os dois partem do princípio em observar a utilização dos slots. A diferença entre eles é que, enquanto o Least Used escolhe a faixa de slots com menor utilização, o Most Used escolhe a faixa com a maior utilização.

---

**Algoritmo 5:** *Most Used*

---

```

1 Entrada: uma requisição  $R$  que necessita de  $k$  slots de frequência, um objeto rota
   que representa o caminho do nó de origem para o nó de destino e um inteiro
   NumSlots que representa o número total de slots de frequência por link.
2 Saida: bloco de slots livres  $B[i,f]$  com início no slot com índice  $i$  e fim no slot com
   índice  $f$  no espectro.
3 Início:
4 slotOccupation: Vetor de pares de inteiros (sum,j), na qual sum é a quantidade de
   vezes que o slots com índice  $j$  é utilizado em toda rede.
5 sumOccupationSlot  $\leftarrow 0$ ;
6 for  $int\ s \leftarrow 0$  to  $s < NumSlots$  step  $+1$  do
7   if bloco de slots com índice entre  $s$  e  $s+k-1$  estiver livre em toda rota then
8     sumOccupationSlot  $\leftarrow 0$ ;
9     for  $int\ p \leftarrow s$  to  $p \leq (s+k-1)$  step  $+1$  do
10      TopologySumOccupation  $\leftarrow$  occupation( $p$ );  $\triangleright$  retorna a quantidade de
        vezes que o slot com índice  $p$  é utilizado em toda rede.
11      sumOccupationSlot  $\leftarrow$  sumOccupationSlot + TopologySumOccupation;
12      coloca o par ( $sumOccupationSlot, s$ ) no vetor slotOccupation;
13 Ordenar de forma decrecente o vetor slotOccupation de acordo com a quantidade
   de utilização do slot na rede
14 if occupationSlot.size  $> 0$  then
15   chosenSlot  $\leftarrow$  occupationSlot[0].get(j)  $\triangleright$  realizar a atribuição no bloco de slot
     que são mais utilizados na rede
16    $i \leftarrow$  chosenSlot
17    $f \leftarrow$  chosenSlot+k-1
18   return  $[i,f]$ 
19 Fim

```

---

### 3.2.6 Subcarrier-slot partition first-last-fit

O algoritmo *Subcarrier-slot partition first-last-fit*, proposto por (Fadini & Oki, 2014), é constituído por duas partes: atribuição de partição, do inglês *partition assignment* e atribuição de

espectro.

Esta etapa da atribuição de partição tem como objetivo dividir em um determinado número de partições o total de slots nos links que constituem a rede e, diante disso, as requisições na qual as rotas não possuem nenhum link em comum são colocadas em uma mesma partição e as requisições que possuem algum link em comum são colocados em partições diferentes. Com este esquema, esta etapa tem como consequência deixar uma maior quantidade de blocos de slots livres mais alinhados, como mostra a imagem 10.

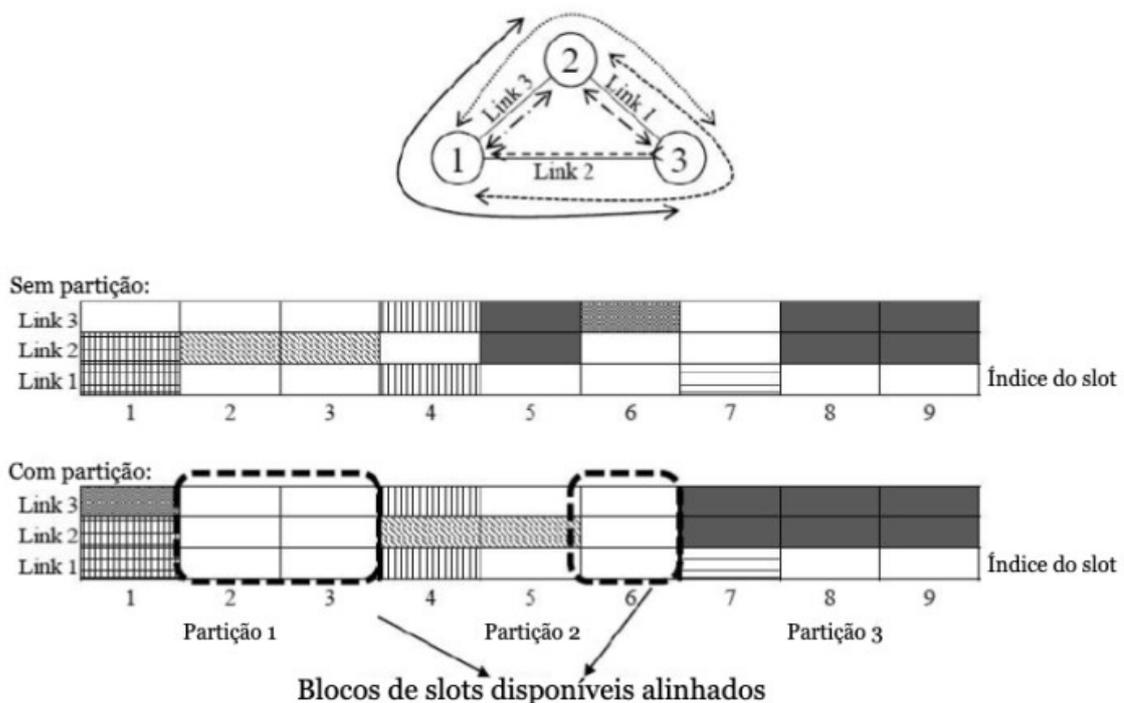


Figura 10: Partições nas *EON* deixam mais blocos de slots disponíveis e alinhados. Imagem adaptada de (Fadini & Oki, 2014)

Ademais, a questão de determinar o número mínimo de partições, assim como o tamanho de cada uma, pode ser expressa como um problema da Coloração de um grafo, do inglês *Graph Coloring Problem* (Oki, 2013) (Fadini & Oki, 2014), como pode-se notar a seguir: primeiramente, considera-se que cada rota das conexões ou requisições é conhecida, assim como também o número de slots de cada uma delas. Além disso, um grupo de conexão é considerado um conjunto de requisições que possuem a rota exatamente igual. Também é importante salientar o fato de que um vértice do grafo em questão corresponde a uma unidade de tráfego, ou slots de frequência, ou seja, um grupo de conexão que necessite de dois slots de frequência para o seu estabelecimento

precisará de dois vértices. Por padrão, dois vértices que correspondem ao mesmo grupo de requisição são conectados por arestas. Se dois grupos de conexão compartilharem um ou mais links em comum, estes grupos de conexão serão conectados por arestas também. De forma que, quando dois vértices são conectados por uma aresta, eles são considerados vértices adjacentes. O problema da coloração de grafo atribui uma cor para cada vértice ao mesmo tempo em que precisa satisfazer a restrição de que uma mesma cor não pode ser atribuída para vértices adjacentes. Dessa maneira, cada cor corresponde a uma unidade de partição e, com isso, o número mínimo de cor significa um menor número de unidade de partição. Depois que o número mínimo de unidade de partição é obtido, as unidades de partição que pertencem a um mesmo grupo de conexão são unidas formando uma única partição. O algoritmo 6 e o algoritmo 7 mostram os procedimentos que (Fadini & Oki, 2014) utilizou para criar o grafo e para a solução da coloração do grafo respectivamente.

---

**Algoritmo 6:** Construindo o grafo do problema da atribuição de partição. Adaptado de (Fadini & Oki, 2014)

---

- 1 **Passo 1:** Inicialização
  - 2 Inicialize o conjunto de vértices  $V$  e o conjunto de arestas  $E$ .
  - 3  $V = \emptyset, E = \emptyset$
  - 4 **Passo 2:** Geração de vértices
  - 5 Crie o vértice  $v_{xy}$  que corresponde a cada grupo de conexão onde  $x = 1, \dots, n$  e  $y = 1, \dots, m$  para  $n$  grupos de conexão e para  $m$  unidade de tráfegos(slots) de cada grupo de conexão, e então adicionar  $v_{xy}$  no  $V$ . Esse procedimento deverá ser aplicado para todos os grupos de conexão.
  - 6 **Passo 3:** Estabelecimento das arestas.
  - 7 estabeleça a aresta  $(v, w)$  entre  $v \in V$  e  $w \in V$  se os dois grupos de conexão correspondente ao vértice  $v$  e  $w$  compartilham um ou mais links.
- 

---

**Algoritmo 7:** Resolvendo o problema da coloração do grafo utilizando o *Largest degree first (LDF)*. Adaptado de (Fadini & Oki, 2014)

---

- 1 **Passo 1:** Selecione o vértices que possui a maior quantidade de arestas conectadas.
  - 2 **Passo 2 :** Escolha a cor com o menor indice do conjunto de cores que não está sendo utilizado por vértices adjacentes.
  - 3 **Passo 3:** Colore o vértice selecionado utilizando a cor descrita no Passo 2.
  - 4 **Passo 4:** Se todos os vértices estão já coloridos, finalize. Se não repita os passos novamente.
- 

Assim, depois que o número de partições requeridas é encontrado e cada grupo de requisições são atribuídas para a partição correspondente, o passo seguinte é a atribuição de

espectro, o qual consiste na escolha de qual conjunto de slots será atribuído para essas requisições na partição correspondente.

No artigo (Fadini & Oki, 2014) foi introduzida a política do *first-last-fit*, a qual consiste em atribuir o conjunto de slots para cada requisição seguindo os princípios detalhados a seguir, após a divisão do espectro em partições na etapa anterior. Primeiramente, se a partição escolhida para a conexão tiver um índice ímpar, este algoritmo aplica o *first fit*, ou seja, escolhe o conjunto de slots disponíveis com o menor índice da partição para realizar a atribuição. Porém, se a partição escolhida tiver um índice par, o algoritmo aplica o *Last Fit*, ou seja, escolhe o conjunto de slots disponíveis com o maior índice da partição para fazer a atribuição. O Algoritmo 8 exemplifica a parte da atribuição do espectro com o First-last-fit.

### 3.2.7 Adaptação do *Subcarrier-slot partition first-last-fit*

O algoritmo *Subcarrier-slot partition first-last-fit* foi adaptado para ser executado no simulador utilizado neste projeto. Isso foi necessário devido ao fato de que, para executar o passo da atribuição de partição, era necessário ter o conhecimento de todas as conexões que iriam existir durante a simulação, assim como o número de slots que cada uma precisa, porém o simulador utilizado no projeto recebe de forma aleatória a requisição e o número de slots que é necessário para o estabelecimento das conexões.

Assim, a versão implementada deste algoritmo parte da divisão em  $N$  partições do espectro óptico. A definição de qual partição será utilizada por cada requisição será determinada a partir de uma análise das rotas interferentes da rota da requisição, ou seja, é escolhida uma partição em que não esteja presente uma conexão cuja rota interfira com a da requisição, se existir mais de uma partição possível, é selecionada a com o menor índice. Porém, no caso em que todas as partições exista ao menos uma conexão cuja rota interfira com a da requisição, é utilizado o algoritmo *First Fit* em todo o espectro óptico. O algoritmo 10 mostra os passos para a implementação dessa parte do algoritmo.

Já na parte da atribuição de comprimento de onda, foi implementado o *first-last-fit* com as seguintes alterações: na condição em que uma partição é encontrada é realizada a seguinte análise: se a partição escolhida tiver um índice ímpar, procura-se em todo o espectro da partição

---

**Algoritmo 8:** *Subcarrier-slot partition first-last-fit.*(Fadini & Oki, 2014)

---

```

1 Entrada: uma requisição  $R$  que necessita de  $W$  slots de frequência.
2  $S_p$  se refere aos blocos de slots livres, contíguos e alinhados na partição.
3  $S_t$  se refere aos blocos de slots livres, contíguos e alinhados no conjunto total de
  slots.
4 Início:
5 Passo 1: Verifique qual é a partição da conexão que chega a partir do resultado da
  solução do problema da coloração do grafo (Algoritmo 7).
6 Passo 2: Faça a atribuição da partição para a requisição que chegou e atualize o  $S_p$ 
  na partição .
7 Passo 3: Faça a atribuição do espectro:
8 if existir pelo menos um bloco de slots livres em  $S_p$  que tenha um tamanho  $\geq W$ 
  then
9   if índice da partição for um número ímpar then
10    | Atribua a requisição o bloco de slot com menor índice disponível alinhado e
11    | contíguo na partição.
12    | Fim
13   else
14    | Atribua a requisição o bloco de slot com maior índice disponível alinhado e
15    | contíguo na partição.
16    | Fim
17  else
18   if existir pelo menos um bloco de slots livres em  $S_t$  que tenha um tamanho  $\geq W$ 
19   then
20    | Atribua a requisição o bloco de slot com menor índice disponível alinhado e
21    | contíguo no conjunto total de slots.
22    | Fim
23   else
24    | Rejeita a requisição de conexão.
25    | Fim

```

---

por um bloco de slots livre com o mesmo tamanho da requisição, se ele for encontrado, a requisição será atribuída a este bloco, caso contrário, será utilizado o algoritmo *First Fit*, o qual irá procurar o primeiro bloco com menores índices qualquer outro tamanho em que caiba a requisição para ser feita a atribuição. Já se a partição escolhida tiver um índice de número par, também é realizada uma análise em todo o espectro da partição para que seja encontrado um bloco de slots livres com o mesmo tamanho da requisição na partição, caso seja encontrado este bloco, a requisição é atribuída a ele, caso contrário é utilizado o *Last Fit* na partição, o qual irá procurar o primeiro bloco com maiores índices de qualquer outro tamanho em que caiba a requisição para ser feita a atribuição.

Já na ausência de slots livres em que caiba a requisição na partição, será aplicado o *First Fit* em todo o espectro em questão, o qual irá procurar pelo primeiro bloco de qualquer tamanho que caiba a requisição, desta vez em todo o espectro, para fazer a atribuição. Se não encontrar, a requisição será bloqueada. A seguir são resumidos os principais passos implementados deste algoritmo para a realização das simulações apresentadas no capítulo 4 e no algoritmo 9 é mostrado a implementação de forma mais detalhada do mesmo:

1. Escolher a partição para alocar a requisição, na qual consiste em ser uma partição diferente das partições das rotas interferentes da rota da requisição.
2. Se a partição for **ímpar**, procure um conjunto de slots do mesmo tamanho da requisição e faça a atribuição, se não encontrado realize o *First Fit* na partição. Caso a partição seja **par**, procure um conjunto de slots do mesmo tamanho da requisição e faça a atribuição, se não encontrado realize o *Last Fit* na partição.
3. Se não encontrar slots livres na partição escolhida ou nenhuma partição seja encontrada, será aplicado o algoritmo de *First Fit* em todo o espectro.

### 3.2.8 *Min Slot-Continuity Capacity Loss*

O *Min Slot-Continuity Capacity Loss* (MSCL)(Almeida-Jr *et al.*, 2013) é um algoritmo que se baseia na escolha do conjunto de slots disponíveis que acarreta na menor perda de capacidade para a rede, considerando-se as rotas que interferem com a rota em questão. A perda da capacidade é calculada para a rota em questão, que foi escolhida utilizando algum algoritmo de roteamento, e também para todas as rotas interferentes, estas são as rotas que possuem pelo menos um link em comum. A métrica utilizada para o cálculo da perda de capacidade de alocação na rede é calculada a partir do número de formas de alocação.

Já as rotas chamadas de interferentes são as que possuem ao menos um link em comum com o caminho óptico, inclusive as que são formadas por subrotas. Assim, o algoritmo MSCL, ao se analisar o estado da rede em questão, procura soluções que provoquem o menor impacto possível dentre todas as rotas, já que as rotas interferentes são o tipo de rota que perdem capaci-

---

**Algoritmo 9: Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado**


---

```

1 Entrada: uma requisição  $R$  que necessita de  $k$  slots de frequência , um objeto rota
   que representa o caminho do nó de origem para o nó de destino , um inteiro
   NumSlots que representa o número total de slots de frequência por link, , um vetor
   RouteInt de objeto do tipo rota que contém todas as rotas que interferem a rota da
   requisição  $R$  e um inteiro NumPartitions que é Número do total de partições por
   link.
2 Saida: bloco de slots livres  $B[i,f]$  com início no slot com índice  $i$  e fim no slot com
   índice  $f$  no espectro.
3 Início:
4 NumUsedPartition: Vetor de pares de inteiros (sum,p), na qual sum é a quantidade
   de vezes que alguma rota interferente utiliza a partição  $p$  do espectro.
5 choosePartition  $\leftarrow$  null;  $\triangleright$  inteiro que representa a partição escolhida .
6 assignedCheck  $\leftarrow$  false  $\triangleright$  Se essa variável for igual a false, significa que não foi feita
   a atribuição no espectro. Caso contrário, significa que foi feita a atribuição no
   espectro
7 calcular o choosePartition através do Algoritmo 10;
8 if choosePartition  $\neq$  null then
9     if choosePartition mod 2  $\neq$  0 then
10         blockfound = [...]  $\triangleright$  Procura um conjunto de slots do mesmo tamanho da
            requisição na partição
11         if blockfound = false then
12             First Fit();  $\triangleright$  Se não foi encontrado, então blockfound = false e será
                aplicado o algoritmo de first fit na partição
13         else
14             Atualiza com as informações do bloco encontrado as variáveis de retorno
                 $[i,f]$   $\triangleright$  Realizar a atribuição no bloco de slots livres do tamanho da
                requisição encontrada assignedCheck = true;
15         else
16             blockfound = [...]  $\triangleright$  Procura um conjunto de slots do mesmo tamanho da
                requisição na partição
17             if blockfound = false then
18                 Last Fit();  $\triangleright$  Se não foi encontrado, então blockfound = false e será
                    aplicado o algoritmo de Last fit na partição
19             else
20                 Atualiza com as informações do bloco encontrado as variáveis de retorno
                     $[i,f]$   $\triangleright$  Realizar a atribuição no bloco de slots livres do tamanho da
                    requisição encontrada assignedCheck = true;
21 if (assignedCheck = false then
22     É aplicado o First Fit(); em todo o espectro;  $\triangleright$  Se não encontrar slots livres na
        partição escolhida ou nenhuma partição seja encontrada, será aplicado o
        algoritmo de first fit em todo o espectro
23 return  $[i,f]$ 
24 Fim

```

---

---

**Algoritmo 10:** *Escolhendo uma partição diferente das partições utilizadas pelas rotas interferentes*


---

```

1 Entrada: um objeto rota que representa o caminho do nó de origem para o nó de
  destino de uma requisição, um vetor RouteInt de objeto do tipo rota que contém
  todas as rotas que interferem a rota da conexão da requisição R e um inteiro
  NumPartitions que é Número do total de partições por link.
2 Saida: um inteiro indicando uma partição, na qual consiste em ser uma partição
  diferente das partições das rotas interferentes da rota da requisição.
3 Início:
4 NumUsedPartition: Vetor de pares de inteiros (sum,p), na qual sum é a quantidade
  de vezes que alguma rota interferente utiliza a partição p do espectro.
5 chosenPartition  $\leftarrow$  null
6 for int p  $\leftarrow$  1 to p  $\leq$  NumPartitions step +1 do
7   | coloca o par (0,p) no vetor NumUsedPartition;
8 for int r  $\leftarrow$  0 to r < RouteInt.size step +1 do
9   | Inteiro routeIntPartition  $\leftarrow$  getParticao(RouteInt[r]);  $\triangleright$  getParticao procura a
  | existência de alguma conexão cuja rota seja routeInt[r] e retorna a partição
  | utilizada por ela. Esse retorno é então atribuído a variável routeIntPartition.
10  if routeIntPartition = 0 then
11    | continue;  $\triangleright$  Se routeIntPartition = 0, então significa que não existe conexão
  | cuja rota é routeInt[r].
12  else
13    | Atualiza o vetor NumUsedPartition aumentando em +1 a quantidade de
  | utilização desta partição.
14 for int x  $\leftarrow$  0 to x < NumUsedPartition.size and chosenPartition = null step +1 do
15   |  $\triangleright$  Procurar uma partição não utilizada pelas rotas interferentes
16  if (NumUsedPartition[x].get(sum) = 0 then
17    | chosenPartition  $\leftarrow$  NumUsedPartition[x].get(p)  $\triangleright$  Se a quantidade de
  | utilização de um partição for igual a 0, então atualiza essa partição na
  | variável de retorno
18 return chosenPartition  $\triangleright$  Se não conseguiu achar uma partição, iria ser retornado
  um valor null
19 Fim

```

---

dade de alocação ao ser utilizado o espectro na rota selecionada pelo processo de roteamento, pois possuem links em comum.

Outro importante conceito é o de buraco, o qual é um conjunto de slots contíguos que estão disponíveis por toda a rota. Vale ressaltar também que o vetor de disponibilidade constitui a localização e o tamanho dos slots para cada rota que foi analisada, de forma que o tamanho de um buraco é determinado pela quantidade de slots que ele possui. Assim, supondo que a rota escolhida possua um total de  $n$  slots por link, pode-se considerar que cada buraco

---

na rota que possua tamanho o suficiente para alocar a requisição solicitada representa uma possibilidade de alocação. Ou seja, uma determinada requisição com  $k$  slots pode ser encaixada em qualquer buraco que tenha tamanho maior ou igual à sua demanda. De forma que o número de possibilidades de alocação será a métrica utilizada para o cálculo da perda de capacidade de alocação na rede em questão. Entende-se por possibilidades de alocação as diferentes maneiras de alocar uma requisição no espectro.

Assim, utiliza-se o número de formas de alocação, como indicado no parágrafo anterior, para determinar a medida da capacidade de alocação na rede em questão. Ou seja, o cálculo da perda de capacidade para a alocação leva em consideração não apenas o tamanho da requisição, mas sim todos os grupos de slots que podem ser requeridos em uma determinada rota. Outro fator importante a ser ressaltado é que o grupo de slots em questão vai depender do tipo de tráfego que é permitido na rede, bem como dos formatos de modulação que foram utilizados. Assim, pode-se concluir que o algoritmo MSCL vai realizar a alocação da requisição no conjuntos de slots que irá proporcionar o menor impacto na rede, tendo em conta o estado da rede para todas as rotas que são interferentes com a rota em questão, a qual é obtida através dos algoritmos de roteamento. Também é importante ressaltar que a perda da capacidade em determinada rota é feita levando em consideração todos os tamanhos  $n$  de requisições que constam no tráfego da rede em questão.

Portanto, o algoritmo MSCL pode ser considerado uma boa alternativa quando a intenção é analisar o estado da rede antes de definir qual será o melhor conjunto de slots que será utilizado para a alocação dos recursos disponíveis. O algoritmo 11 apresenta a maneira como o MSCL foi implementado.

---

**Algoritmo 11: MSCL**

---

1 **Entrada:** uma requisição  $R$  que necessita de  $k$  slots de frequência , um objeto  $rota$  que representa o caminho do nó de origem para o nó de destino , um inteiro  $NumSlots$  que representa o número total de slots de frequência por link, , um vetor  $RouteInt$  de objeto do tipo  $rota$  que contém todas as rotas que interferem a rota da requisição  $R$  e um inteiro  $trafficMax$  que é o tamanho máximo de um slot.

2 **Saida:** bloco de slots livres  $B[i,f]$  com início no slot com índice  $i$  e fim no slot com índice  $f$  no espectro.

3 **Início:**

4  $vetCapInic[RouteInt.size]$ : um array de inteiros que cada elemento é a capacidade inicial da rota interferente de acordo com o índice.

5  $vetCapFin[RouteInt.size]$ : um array de inteiros que cada elemento é a capacidade final da rota interferente de acordo com o índice.

6  $vetDispInt[NumSlots]$ : array de *boolens* para representar a disponibilidade de uma rota.

7  $perdaMin \leftarrow \infty$

8 **for**  $int\ s \leftarrow 0$  **to**  $s < NumSlots$  **step**  $+1$  **do**

9     **if** bloco de slots com índice entre  $s$  e  $s+k-1$  estiver livre em toda rota **then**

10          $perda \leftarrow 0.0$ ;

11         **for**  $int\ r \leftarrow 0$  **to**  $r < RouteInt.size$  **step**  $+1$  **do**

12              $vetDispInt = getDisp(RouteInt[r])$   $\triangleright$  retorna a disponibilidade dos slots na rota interferente com índice  $r$

13              $vetCapInic[r] \leftarrow 0$ ;  $vetCapFin[r] \leftarrow 0$ ;

14             **for**  $int\ t \leftarrow 2$  **to**  $t \leq trafficMax$  **step**  $+1$  **do**

15                  $\triangleright$  para cada tipo de tráfego existente na rede calcular o número de formas de alocação e atualizar o  $vetCapInic[r]$

$vetCapInic[r] \leftarrow vetCapInic[r] + calcNumFormAloc(t, vetDispInt)$ ;

$\triangleright$  retorna o número de formas de alocação de slot de tamanho  $t$  de acordo com o array de disponibilidade

16             **for**  $int\ j \leftarrow s$  **to**  $j < s + k$  **step**  $+1$  **do**

17                  $vetDispInt[j] = false$ ;

18             **for**  $int\ t \leftarrow 2$  **to**  $t \leq trafficMax$  **step**  $+1$  **do**

19                  $\triangleright$  para cada tipo de tráfego existente na rede calcular o número de formas de alocação no  $vetDispInt$  atualizado

$vetCapFin[r] \leftarrow vetCapFin[r] + calcNumFormAloc(t, vetDispInt)$ ;  $\triangleright$

                   retorna o número de formas de alocação de slot de tamanho  $t$  de acordo com o array de disponibilidade

20              $perda \leftarrow perda + (vetCapInic[r] - vetCapFin[r])$ ;      $\triangleright$  cálculo da perda de capacidade

21         **if**  $perda < perdaMin$  **then**

22              $\triangleright$  atualiza as variáveis de retorno  $[i,j]$  com os índice que possuírem a menor perda de capacidade baseada no número de formas de alocação

$perdaMin \leftarrow perda$ ;

23              $i \leftarrow s$ ;

24              $f \leftarrow s+k-1$ ;

25 **return**  $[i,f]$

26 **Fim**

---

# 4

## SIMULAÇÕES E ANÁLISES DOS ALGORITMOS DE RSA

Por fim, com o objetivo de investigar e analisar os algoritmos de atribuição de espectro apresentados anteriormente, foram feitas algumas simulações bem como foram gerados gráficos com base na probabilidade de bloqueio de cada algoritmo em função da carga na rede em *Erlangs* para analisarmos a performance dos mesmos, dado que a probabilidade de bloqueio é definida como a razão das conexões bloqueadas, devido à falta de recursos, sobre o número total de requisições na rede. É importante ressaltar que todas as simulações apresentadas neste capítulo utilizam a topologia da rede NSFNET (figura 3), com 14 nós com 21 links bidirecionais, totalizando ao todo 42 links. Assim, os recursos de frequência foram representados na simulação por slots de frequências e, a depender da simulação, o número de slots foi alterado. De forma que as requisições por conexão são geradas de forma aleatória baseadas na regra de Poisson e o tempo da duração das requisições segue a distribuição exponencial. Em cada simulação, foram geradas  $10^6$  requisições, e o número de slots requeridos em cada requisição é escolhido de forma aleatória dentre as possíveis quantidades de slots especificados em cada simulação. Além disso, é importante ressaltar que para simplificar a simulação deste projeto, foi utilizado apenas o roteamento fixo, utilizando o algoritmo de menor caminho Dijkstra, considerando a avaliação de menor caminho e o número de saltos entre o nó origem até o nó destino.

Os gráficos da figura 11 e da figura 12 mostram o resultado da simulação do *First Fit* e do *Last Fit*. De forma que os resultados foram obtidos com um tráfego gerando requisições com larguras de banda variando entre 2,3 e 4 slots utilizando ao todo 64 slots por link. Como pode-se

observar, os dois algoritmos são equivalentes em relação à probabilidade de bloqueio, o que é coerente visto que são considerados algoritmos opostos, mudando apenas a questão de que o *First Fit* escolhe o primeiro conjunto de slots equivalente às requisições e o *Last Fit* escolhe o último conjunto de slots que correspondem às requisições no espectro. A figura 11 contém o gráfico em escala logarítmica e pode-se perceber apenas uma linha indicando a sobreposição dos resultados dos algoritmos em questão. Na figura 12, não foi utilizada a escala logarítmica para poder perceber melhor a pequena diferença entre os resultados do *First Fit* e do *Last Fit*. Assim, essa pequena diferença acontece devido à característica aleatória do simulador, no qual, a cada nova execução, são gerados valores diferentes e, portanto, há a chegada de requisições diferentes com largura de banda variada. Além disso, pode-se perceber que a probabilidade de bloqueio aumenta quando a carga de tráfego aumenta, isto acontece devido à situação da rede, já que quanto maior for a carga, mais os recursos da rede estão sendo utilizados e, portanto, menos recursos estão disponíveis para as novas requisições, o que faz com que o bloqueio de requisições aumente.

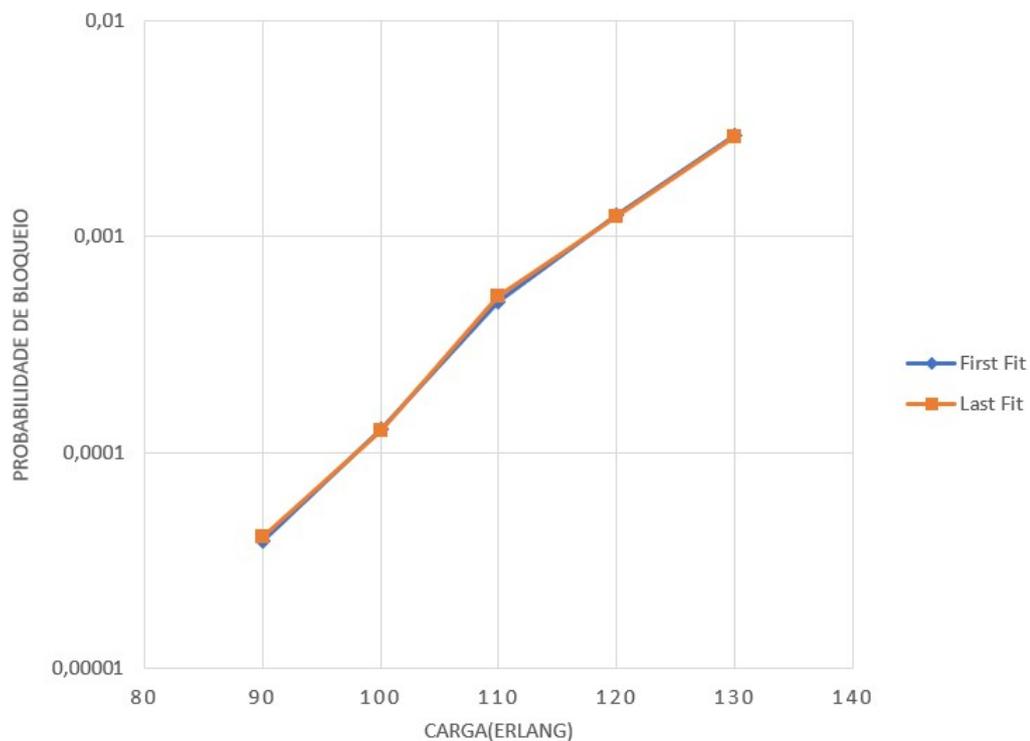


Figura 11: Probabilidade de bloqueio dos algoritmos *First Fit* e *Last Fit* na topologia NSFNET, com requisições de 2,3 e 4 slots com um total de 64 slots por link. (gráfico em escala logarítmica)

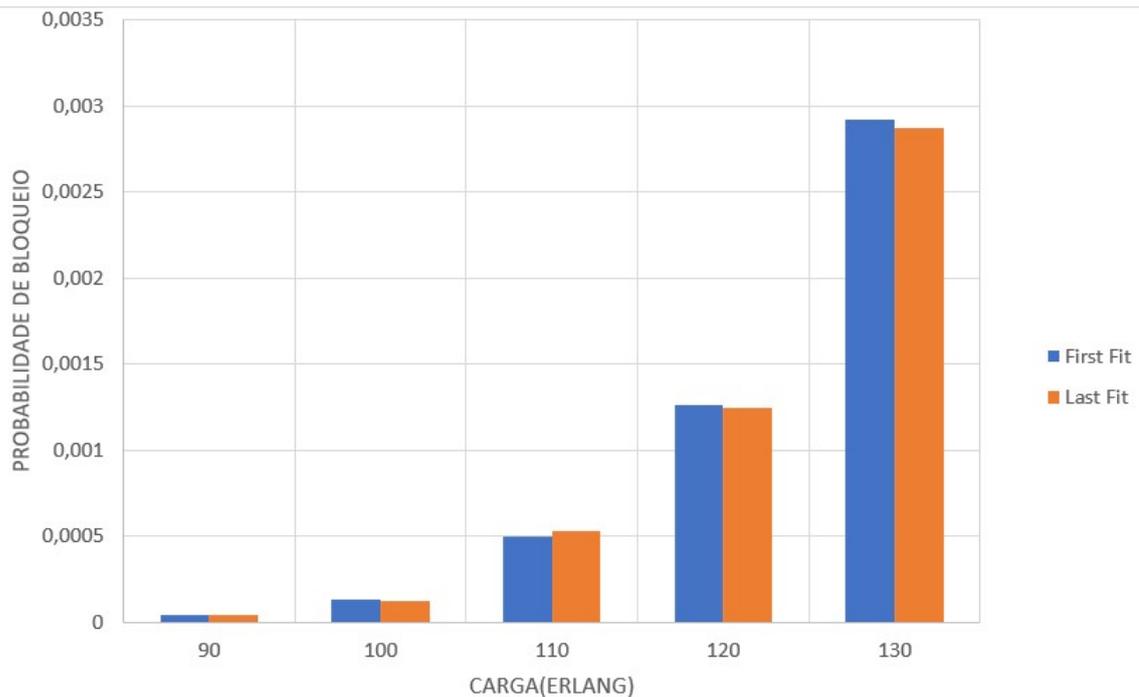


Figura 12: Probabilidade de bloqueio dos algoritmos *First Fit* e *Last Fit* na topologia NSFNET, com requisições de 2,3 e 4 slots com um total de 64 slots por link.

A figura 13 mostra a performance com base na análise da probabilidade de bloqueio, com a carga na rede em *Erlang* dos algoritmos apresentados anteriormente. Como o *First Fit* e o *Last Fit* são equivalentes, como visto no parágrafo anterior, nesta imagem foram considerados apenas algoritmos clássicos e mais simples como o *First Fit*, *Random Fit*, *Least Used*, *Most Used* e algoritmos mais complexos como o *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado* e o MSCL. Os resultados foram obtidos gerando requisições com largura de banda variando entre 2,3 e 4 slots com uma carga mínima de 90 e a carga máxima de 130 *Erlang*.

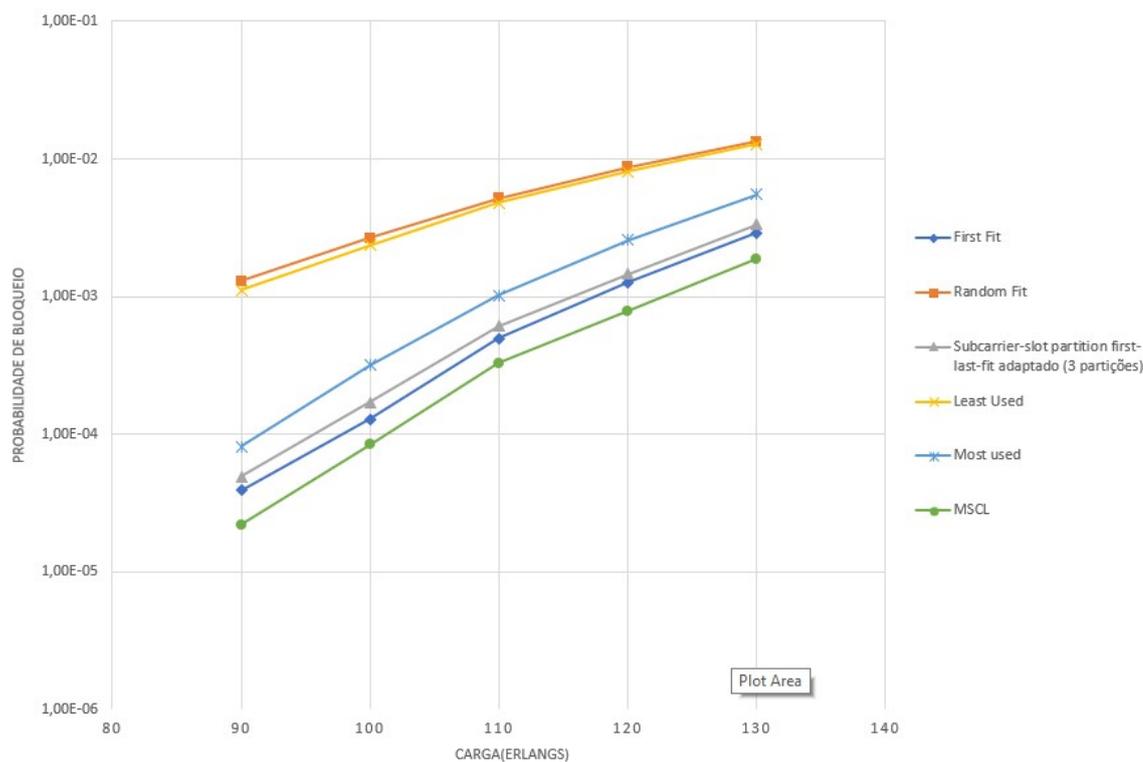


Figura 13: Probabilidade de bloqueio dos algoritmos *First Fit*, *Random Fit*, *Least Used*, *Most Used*, *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado* e o *MSCL* na topologia NSFNET, com requisições de 2,3 e 4 slots com um total de 64 slots por link.

Ademais, de acordo com o gráfico na Figura 13, o algoritmo que apresentou o melhor desempenho entre os algoritmos simulador foi o *MSCL*, visto que ele apresenta uma menor probabilidade de bloqueio. Isso é possível pois esse algoritmo utiliza a métrica para analisar o estado atual da rede e, através do cálculo da perda da capacidade, fornece o conjunto de slots que proporcionam o menor impacto possível nas rotas interferentes. Assim, pode-se concluir que esse algoritmo apresenta um ótimo desempenho, porém possui uma complexidade maior do que os outros analisados no presente trabalho.

Como se pode notar, também na Figura 13, os algoritmos *Random Fit* e o *Least Used* apresentaram o pior desempenho. Isso se justifica pelo fato de que o *Random Fit* não apresenta uma métrica para a redução dos problemas nas redes ópticas, ele simplesmente seleciona um grupo de slots de forma aleatória. Da mesma forma, a métrica utilizada no *Least Used* não ajuda na redução dos problemas nas redes elásticas, pois ele apenas gera um espalhamento na carga da rede no espectro, o que dificulta no caso das redes ópticas elásticas que precisam ter slots consecutivos livres e alinhados na rota inteira. Em seguida, pode-se observar o *Most Used*, o qual

---

apresenta um resultado bem melhor do que o *Random Fit* e o *Least Used*. Isso é possível devido ao fato de esse algoritmo escolher os slots mais utilizados na rede, desencadeando uma maior reusabilidade nos slots, e fazendo com que os menos utilizados sejam empregados posteriormente para as novas requisições. Porém, mesmo com essa qualidade, esse algoritmo não apresenta uma boa probabilidade de bloqueio, como pode-se visto no gráfico, de forma que existem outros algoritmos que conseguem obter um resultado melhor, como por exemplo o *First fit*.

Já no gráfico da figura 13, pode-se observar, também, que o algoritmo *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado* apresentou um resultado pior do que o clássico *First Fit*. Esse resultado é visto como incoerente, pois na literatura (Chatterjee *et al.*, 2015) (Fadini & Oki, 2014), o *First Fit* apresenta um desempenho inferior ao *Subcarrier-slot partition first-last-fit*, pois este utiliza a métrica de deixar os slots mais alinhados e de diminuir a fragmentação do espectro óptico. O que justifica esse resultado é o fato de que, como o *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado* utiliza o particionamento no espectro óptico, a utilização de um número total de slots pequenos, ou muitas partições no espectro óptico, acarreta um número pequeno de slots em cada partição e, com isso, a existência de poucos slots nas partições pode aumentar a probabilidade de bloqueio por apresentar poucos canais (Fadini & Oki, 2014). Assim, nesta simulação foi utilizado um total de 64 slots com 3 partições, resultando em uma partição com 22 slots e outros dois com 21 slots, com uma carga de 90 variando até 130 Erlangs, gerou 3 partições com tamanhos pequenos e, com isso, gerou uma probabilidade de bloqueio alta em comparação com o *First Fit*.

Diante dessa situação, foi feita nova simulação com o algoritmo *First fit* e com o *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado*, com a finalidade de avaliar o desempenho do *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado*, dessa vez, utilizando uma quantidade maior de slots totais e com uma maior carga. Assim, o gráfico da figura 14 mostra o resultado da simulação dos algoritmos *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado* e o *First fit*. Vale ressaltar que foram utilizados 300 slots no total, com uma carga variando de 650 até 850 erlangs e com um tráfego que gerou requisições com tamanhos variando entre 2, 3, 4 e 5. De forma que, nesta simulação do algoritmo *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado*, o espectro foi dividido em 3 partições com 100 slots cada uma. Ademais, como pode-se notar a partir

dos resultados obtidos com essas novas configurações, o *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado* apresenta uma probabilidade de bloqueio menor que o *First fit*, o que de fato é um resultado coerente visto que agora o tamanho das partições estão maiores e, desse modo, o algoritmo consegue tornar os slots mais alinhados e com uma menor fragmentação, de acordo com a métrica utilizada por este algoritmo.

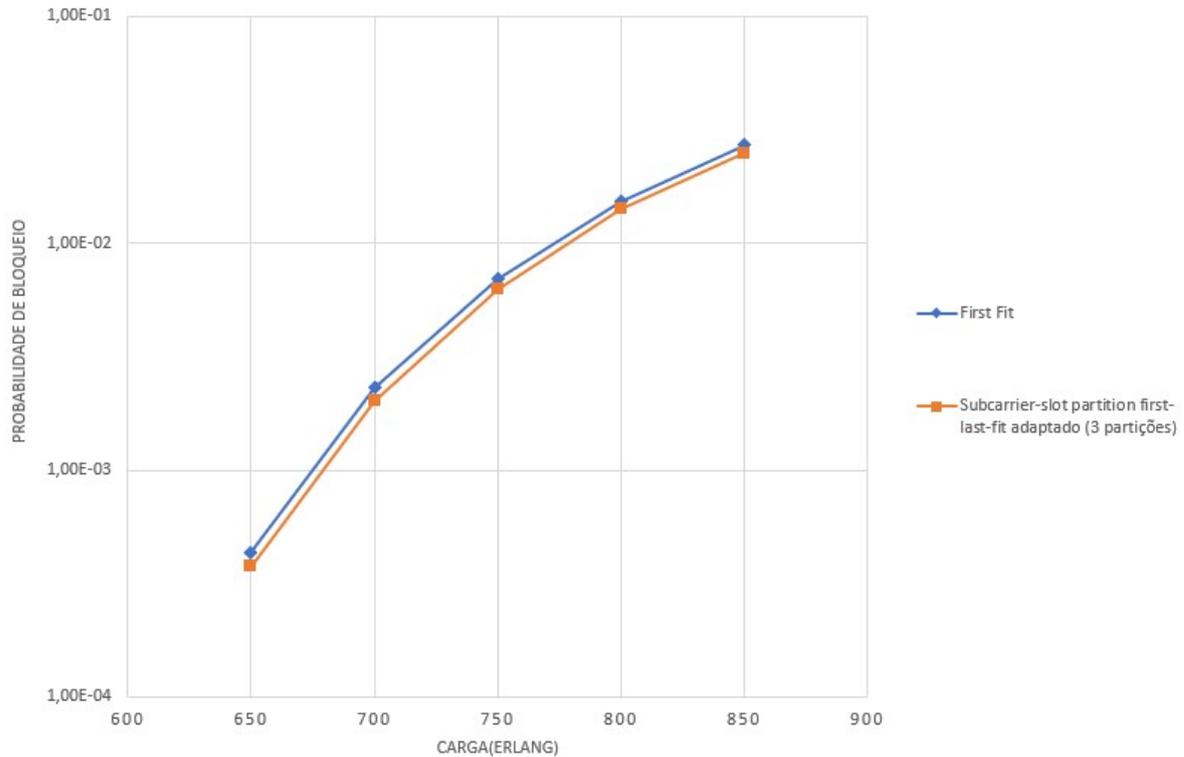


Figura 14: Probabilidade de bloqueio dos algoritmos *First Fit* e *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado* na topologia NSFNET, com requisições de 2,3, 4 e 5 slots com um total de 300 slots por link.

# 5

## CONCLUSÃO

Pode-se concluir, então, após toda a análise feita, que, devido à crescente demanda por mais tráfego de dados e na existência de mais tráfegos variados na nossa atualidade, a atual tecnologia empregada na maior parte das redes ópticas está cada vez mais ineficiente. Esse tipo de rede atualmente se baseia na tecnologia DWDM, que se fundamenta na tecnologia WDM, com isso podem ser chamadas de redes WDM. De forma que essa tecnologia divide o espectro óptico em canais fixos, por exemplo de 50 GHz. Porém, o problema com essa tecnologia é que ela não se adapta aos tráfegos heterogêneos da atualidade. Por exemplo, se chegar uma requisição que necessite de uma banda menor que os 50 GHz, a banda restante não utilizada iria ser desperdiçada, e, para tráfegos altos que necessitam de mais banda, tal fato não seria possível, pois, nesse caso, o canal é fixo. Assim, com o objetivo de se adaptar melhor aos grandes e heterogêneos tráfegos da atualidade surgiram as redes ópticas elásticas.

Assim, a principal característica desse tipo de rede é que ele se adapta ao tipo de tráfego requerido. Isso foi impulsionado devido à tecnologia OFDM. Essa tecnologia se baseia na divisão do espectro em canais menores e, desse modo, dependendo do tamanho da requisição, pode-se juntar a mais de um canal, formando um canal maior. Esses canais menores podem ser chamados de slots de frequência. Um dos principais problemas das redes ópticas elásticas é o de roteamento e alocação de espectro, o qual consiste em encontrar uma rota e atribuir slots de frequência para as conexões. Assim, para a resolução desse problema, estão sendo desenvolvidos diversos algoritmos.

---

Esse projeto realizou simulação de alguns algoritmos de alocação de espectro utilizando o roteamento fixo deles para analisá-los de acordo com probabilidade de bloqueio. Em relação ao algoritmo *Subcarrier-slot partition first-last-fit*, foi feita uma adaptação para poder ser executado no simulador utilizado no projeto. Nesse contexto, dos algoritmos analisados de acordo com os parâmetros utilizados e topologia nas simulações, pôde-se observar que os algoritmos *First fit* e o *Last fit* são algoritmos equivalentes, ou seja, possuem o mesmo desempenho. Além disso, pôde-se perceber que o melhor dentre o MSCL, *Random fit*, *Least used*, *Most used*, *First fit* e o *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado*, foi de fato o MSCL, o qual apresentou a menor probabilidade de bloqueio. Já os piores algoritmos foram o *Random fit* e o *Least used*. O *Most used* apresentou uma probabilidade de bloqueio bem menor comparado com o *Random* e o *Least used*, porém outros algoritmos apresentaram uma melhor probabilidade de bloqueio, como o *First fit*. Em relação ao *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado*, ele apresentou um desempenho pior do que o *First fit* quando foi utilizado apenas 64 slots ao total no espectro, com carga mínima de 90 e 140. Porém, ao utilizar 300 slots ao total, com a carga de 650 até 850 e com o espectro dividido em 3 partições com 100 slots cada uma, o *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado* apresentou uma probabilidade de bloqueio menor do que *First-fit*, apresentando, assim, o desempenho melhor. O que justifica um melhor resultado com 300 slots no total por link é o fato de que, como o *Subcarrier-slot partition first-last-fit adaptado* utiliza o particionamento no espectro óptico, a utilização de um número total de slots pequenos no espectro óptico, acarreta um número pequeno de slots em cada partição e, com isso, a existência de poucos slots nas partições pode aumentar a probabilidade de bloqueio por apresentar poucos canais.

# 6

## TRABALHOS FUTUROS

Além da análise e estudo feito neste projeto, outras análises podem ser feitas em projetos futuros, como por exemplo, a realização de uma análise mais aprofundada do algoritmo MSCL, utilizando diferentes parâmetros e topologias diferentes, assim como fazer comparações com outros algoritmos não apresentados neste trabalho. Além disso, pode-se fazer uma análise da utilização do conceito de partição junto com outros algoritmos.

## REFERÊNCIAS

- Abkenar, F. S. & Rahbar, A. G. (2017). Study and analysis of routing and spectrum allocation (RSA) and routing, modulation and spectrum allocation (RMSA) algorithms in elastic optical networks (EONs). *Optical Switching and Networking*.
- Almeida-Jr, R. C., Santos, A. F., Assis, K. D. R., Martins-Filho, J. F., & Waldman, H. (2013). Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks. *Electronics Letters*.
- Azodolmolky, S., Klinkowki, M., Marin, E., Careglio, D., Pareta, J. S., & Tomkos, I. (2009). A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks. *Computer Networks*.
- Bhide, N. M., Slivalingam, K. M., & Fabry-Asztalos, T. (2001). Routing mechanisms employing adaptive weight functions for shortest path routing in multi-wavelength optical wdm networks. *Journal of Photonic Network Communications*.
- Chadha, D. (2019). *Optical WDM networks : From Static to Elastic Networks / Devi Chadha, Indian Institute of Technology, New Delhi, India*. John Wiley & Sons Ltd.
- Chatterjee, B. C. & Oki, E. (2015). Performance evaluation of spectrum allocation policies for elastic optical networks. *IEEE*.
- Chatterjee, B. C., Sarma, N., & Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, 17(3).
- Christodoulopoulos, K., Tomkos, I., & Varvarigos, E. A. (2010). Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation. *IEEE Communications Society*.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 269–271.
- Fadini, W. & Oki, E. (2014). A subcarrier-slot partition scheme for wavelength assignment in elastic optical networks. *IEEE*.
- Goldstein, E. G. (2020). Communication costs in science evidence from the national science foundation network. *SSRN*.
- Keiser, G. (2014). *Comunicações por Fibras Ópticas*. AMGH Editora Ltda.
- Klinkowski, M. & Waldowiak, K. (2011). Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network. *IEEE Communications Letters*.
- Kurose, J. & Ross, K. (2013). *Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down*. Pearson Universidades.
- Lathi, B. & Ding, Z. (2012). *Sistemas de Comunicações Analógicas e Digitais Modernos*. LTC.
- Mukherjee, B. (2000). WDM optical communication networks: Progress and challenges. *IEEE*, 18(10).

- 
- Oki, E. (2013). *Linear programming and algorithms for communication networks*. CRC Press.
- Ramaswami, R., Sivarajan, K. N., & Sasaki, G. H. (2009). *Optical Networks: A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann Publishers, 3th edition.
- Scaraficci, R. A. & da Fonseca, N. (2014). Alternative routing and zone-based spectrum assignment algorithm for flexgrid optical networks. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*.
- Somani, A. K. (2006). *Survivability and traffic grooming in WDM optical networks*. Cambridge: University Press.
- Sone, Y., Hirano, A., Kadohata, A., Jinno, M., & Ishida, O. (2011). Routing and spectrum assignment algorithm maximizes spectrum utilization in optical networks. In *37th European Conference and Exposition on Optical Communications (ECOC)*.
- Strand, A. C. R. T. J. (2001). Issues for routing in the optical layer. *IEEE Communications Magazine*.
- Sun, X., Li, Y., Lambadaris, I., & Zhao, Y. (2003). Performance analysis of first-fit wavelength assignment algorithm in optical networks. *IEEE*.
- Takara, B. K. H., Yoshimatsu, T., Yonenaga, K., & Jinno, M. (2009). Filtering characteristics of highly-spectrum efficient. spectrum-sliced elastic optical path (slice)network. *OFC Optical Fiber Conference*.
- Talebi, S., Alam, F., Katib, I., Khamis, M., Salama, R., & N.Rouskas, G. (2014). Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey. *Optical Switching and Networking*.
- Varvarigos, E. A. & Christodoulopoulos, K. (2014). Algorithmic aspects in planning fixed and flexible optical networks with emphasis on linear optimization and heuristic techniques. *Journal of Lightwave Technology*.
- Xia, M., R.Proietti, Dahfort, S., & S.J.B.Yoo (2012). Split spectrum: a multi-channel approach to elastic optical networking. *OSA Optics Express*, 20(28):29143–29148.
- Yuan, J., Zhang, D., Zhang, Q., Li, X., & Ren, Z. (2019). A routing and spectrum assignment algorithm in elastic optical network based on minimizing contiguity reduction. *Springer Science+Business Media*.
- Zang, H., Jue, J. P., & Mukherjee, B. (2000). A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks. *Optical Networks Magazine*.
- Zhao, J., Yao, Q., Liu, X., Li, W., & Maier, M. (2014). Distance-adaptive routing and spectrum assignment in OFDM-based flexible transparent optical networks. *Photonic Network Communications*, 27(3):119–127.