



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

***CAMPUS JABOATÃO DOS GUARARAPES***

Pós-Graduação em Gestão e Qualidade em Tecnologia da Informação e  
Comunicação

EMERSON FERREIRA DA SILVA

**ESTUDO DE CASO DE TÉCNICAS DE UTILIZAÇÃO DE  
TRANSPONDERS EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS.**

**Jaboatão dos Guararapes**

**2021**

EMERSON FERREIRA DA SILVA

**ESTUDO DE CASO DE TÉCNICAS DE UTILIZAÇÃO DE  
TRANSPONDERS EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do diploma de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Gestão e Qualidade em Tecnologia da Informação e Comunicação do IFPE Campus Jaboatão dos Guararapes, sob orientação do professor Dr. Luciano de Souza Cabral com coorientação do MSc Rodrigo Ferreira da Silva.

**Jaboatão dos Guararapes**

**2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

S586m

Silva, Emerson Ferreira da.

Estudo de caso de técnicas de utilização de transponders em redes ópticas elásticas / Emerson Ferreira da Silva; orientador prof. Dr. Luciano de Souza Cabral; coorientação MSc Rodrigo Ferreira da Silva. Jaboatão dos Guararapes, 2021.

65f.; il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão e Qualidade em Tecnologia de Informação e Comunicação) – IFPE - Campus Jaboatão dos Guararapes.

Inclui Referências.

1. Tecnologia da Informação 2. Redes ópticas elásticas. 3. Colocação de regeneradores. 4. Atribuição de regeneradores I. IFPE. II. Cabral, Luciano de Souza. III. Silva, Rodrigo Ferreira da. IV. Título.

004.21

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco  
Campus Jaboatão dos Guararapes  
Divisão de Pesquisa e Extensão e Pós-graduação

## ATA DE REALIZAÇÃO DE BANCA

No dia **31** de **março** de **2021** as **20h** na sala **on-line** do IFPE Campus Jaboatão dos Guararapes, compareceram à banca de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso da Especialização *lato sensu* em **Gestão e Qualidade em Tecnologia da Informação e Comunicação**, do(a) aluno(a) **Emerson Ferreira da Silva** que defendeu o trabalho intitulado **Estudo de Caso de Técnicas de Utilização de Transponders em Redes Ópticas Elásticas**, os(as) professores(as) que compõem a banca descrita abaixo, e concederam a nota **8,5 (oito e meio)** sendo o(a) aluno(a) considerado(a) **APROVADO** de acordo com a composição das notas estabelecida pela banca avaliadora.

COMPOSIÇÃO DA BANCA		
	<b>NOTA</b>	Documento assinado digitalmente
Prof. Luciano de Souza Cabral (presidente da banca)	<b>8,5</b>	 Luciano de Souza Cabral Data: 31/03/2021 21:51:01-0300 CPF: 032.667.094-70
Prof. Diego dos Passos Silva (1 avaliador)	<b>8,0</b>	 Documento assinado digitalmente Diego dos Passos Silva Data: 01/04/2021 10:03:14-0300 CPF: 704.423.802-59
Prof. Bruno Gentilini D'Ambrosio (2 avaliador)	<b>9,0</b>	 Documento assinado digitalmente Bruno Gentilini D'Ambrosio Data: 06/04/2021 11:15:25-0300 CPF: 015.026.774-66
<b>NOTA FINAL</b>	<b>8,5</b>	



Emerson Ferreira da Silva

Documento assinado digitalmente

 Nilson Cândido de Oliveira Jr  
Data: 21/07/2021 10:17:27-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Nilson Cândido de Oliveira Júnior

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Gestão e Qualidade em TIC  
SIAPE: 1829625

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus por mais essa conquista, pois sei que sem Ele em nada teria permissão para a realização desse feito.

Ao longo de minha vida acadêmica várias pessoas contribuíram para o meu crescimento e sucesso, grande é a minha gratidão a todos os envolvidos direta e indiretamente.

Agradeço, à minha família, que me ensinou a perseverar, ter comprometimento, a valorizar minhas conquistas e através desse trabalho retribuo esse valioso ensinamento.

O muito obrigado ao Professor e Orientador Dr. Luciano Cabral, a quem tive a oportunidade de conhecer e admirar, e que soube guiar-me pelas etapas desde trabalho.

Aos envolvidos neste trabalho, meu muito obrigado pela participação ativa e pela determinação que possibilitou o sucesso desse trabalho.

## Resumo

O crescimento da demanda por tráfego de dados é ocasionado pelo aumento de assinantes e pelo aparecimento de novos aplicativos que exigem maiores taxas de transmissão. As redes ópticas têm sido o meio mais adequado para suportar essa demanda. Um dos grandes desafios enfrentados por essas redes é otimizar o uso do espectro disponível. Uma das tecnologias que permitem uma melhor utilização desse espectro é a que possibilita divisão do espectro em pequenas faixas espectrais. Essa abordagem conhecida como redes ópticas elásticas (EON, *Elastic Optic Network*). A rede óptica elástica translúcida é projetada em uma rede transparente acrescida de uma certa quantidade de regeneradores 3R distribuídos de forma estratégica na rede. Em uma rede translúcida, alguns nós são transparentes e outros são opacos ou translúcidos. Surge então a questão de decidir quais “nós” são translúcidos ou transparentes. Esse problema é conhecido como colocação de regeneradores (RP, *Regenerator Placement*). O RP consiste em decidir a quais “nós” das EONs serão adicionados regeneradores 3R e quantos deverão ser colocados em cada nó. Após ser resolvido o problema de RP, cabe ao algoritmo de atribuição de regeneradores (RA, *Regenerator Allocation*) determinar como usar esse recurso de regeneração 3R e determinar em que nó do caminho o regenerador será ou não usado. Nas EONs, o uso de regeneradores pode ser feito por falta de qualidade na transmissão, por conversão de espectro ou para melhorar o formato de modulação. Nesta dissertação, são analisados três algoritmos de atribuição de regeneradores para as EONs aplicadas à rede esparsa de tráfego dinâmico, visando à redução da probabilidade de bloqueio. O FLR-RA (*First Longest Reach Regenerator Assignment*), que economiza regeneradores na rede, o FNS-RA (*First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment*), que economiza espectro na rede, e o exaustivo, que escolhe uma das possíveis soluções ótimas, ou uma solução que apresenta o menor número total de *slots* para implementá-la (FNS-RA) ou uma solução que apresenta o menor número total de regeneradores para implementá-la (FLR-RA). Os algoritmos foram simulados em duas topologias de rede. Os resultados mostram que nos cenários simulados o FLR-RA atinge uma menor probabilidade de bloqueio quando o número de regeneradores adicionado na rede é pequeno, enquanto o FNS-RA atinge menores probabilidades de bloqueio nos casos nos quais muitos regeneradores são colocados na rede. As heurísticas FLR-RA e FNS-RA apresentam resultados similares ao exaustivo, isto mostra que as heurísticas apresentam um bom desempenho.

**Palavras-chave:** Redes ópticas elásticas, Colocação de regeneradores, Atribuição de regeneradores.

## Abstract

*The growth in data traffic is mainly caused due to both the increasing number of subscriber and new applications that require high transmission rates. Optical networks have been the most suitable way to support this demand. One of the biggest challenges faced by these networks is optimizing the use of the available spectrum. The technologies that may lead to better use of the available optical spectrum is the one that allows to divide the spectrum into narrow slices. This approach is known as Elastic Optical Networks (EON), EONs are an evolution of WDM (Wavelength Division Multiplexing) networks. Moreover translucent elastic optical network may be designed from a transparent network by the addition of certain amount of regenerators 3R distributed in a strategically way in the network. In a translucent network, some nodes are transparent and other ones are opaque or translucent. Therefore, in such networks the question of deciding which nodes are translucent or transparent arises. This problem is known as Regenerator Placement (RP). The RP consists of to decide at which of EONs will be deployed 3R regenerators and as well as the number of 3R should be placed at each node. After the RP problem is solved, the regenerator allocation algorithm (RA) is responsible to determine whether to use, or not, the 3R regenerators deployed in each intermediate node of a given route. In EONs, the use of regenerators can be done by lack of quality in the transmission, by spectrum conversion or to improve modulation format. In this thesis, three algorithms to perform regenerator assignment for EONs are proposed. EONs with sparse regeneration and dynamic traffic are considered. The proposed algorithms are: The FLR-RA (First Longest Reach Regenerator Assignment), which tries to use as less as possible regenerators along a route, the FNS-RA (First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment), which tries to use as less as possible spectrum along a route, and the exhaustive, that returns either the solution that uses the fewest possible number of regenerators or occupy fewest possible number of slots along a given route. The algorithms are simulated in two network topologies. The results show, in the simulated scenarios, that the FLR-RA reaches smaller blocking probabilities when the number of regenerators deployed in network is small, while the FNS-RA reaches smaller blocking probabilities in the cases in which many regenerators are placed in network. The FLR-RA and FNS-RA heuristics show similar results to the exhaustive, meaning that the heuristics present a good performance.*

**Keywords:** *Elastic Optic Network, Regenerators Placement, Regenerators Assignment.*

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Amplificadores Ópticos. ....	22
<b>Figura 2</b> - Exemplo de funcionamento do módulo ROADM. ....	23
<b>Figura 3</b> - Etapas da regeneração 3R. ....	24
<b>Figura 4</b> - Comparativo de utilização de espectro entre a rede WDM e a rede óptica elástica (XIA, 2014) adaptado. ....	28
<b>Figura 5</b> - Contiguidade de slots. ....	29
<b>Figura 6</b> - Constelação do sinal para 16QAM (A) e 64QAM (B). ....	30
<b>Figura 7</b> - Regeneradores distribuídos de forma de ilhas de transparências. ....	34
<b>Figura 8</b> - Regeneradores distribuídos de forma esparsa. ....	34
<b>Figura 9</b> - Fluxograma do algoritmo de roteamento e alocação de comprimentos de onda. ....	36
<b>Figura 10</b> - Funcionamento dos regeneradores de espectro seletivo de sub-canal (SSRs). ....	41
<b>Figura 11</b> - Algoritmo NDF (Nodal Degree First) ....	43
<b>Figura 12</b> - Algoritmo CNF (Centered Node First) ....	44
<b>Figura 13</b> - Algoritmo MU-RP (Most Used Regenerator Placement).....	45
<b>Figura 14</b> - Algoritmo MSU-RP (Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement) .....	46
<b>Figura 15</b> - Algoritmo SQP (Signal Quality Prediction) .....	47
Figura 16 - Algoritmo FLR-RA.....	51
<b>Figura 17</b> – Algoritmo FNS-RA.....	53
<b>Figura 18</b> - Algoritmo Exaustivo .....	55
<b>Figura 19</b> - Topologia 1 - NSFnet. Tamanho dos links em quilômetros (ADHYA & DATTA, 2012) .....	56
<b>Figura 20</b> - Topologia 2 - American Topology. Tamanho dos links em quilômetros (CHAVES, 2012) .....	57
<b>Figura 21</b> – Probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores por nó para três técnicas de atribuição de regeneradores - FLR-RA, FNS-RA e exaustivo – três quantidades de slots diferentes: 120, 160 e 200 e carga de 100 erlangs. ....	59
<b>Figura 22</b> - Probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores por nó, para duas técnicas de atribuição de regeneradores: FLR-RA e FNS-RA, três quantidades de slots diferentes: 160, 200 e 240 e carga de 100 erlangs. ....	61

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Exemplo de OSNRreq para alguns formatos de modulação e taxas de transmissão. ....	32
<b>Tabela 2</b> - Exemplo de quantidade de slots necessários para alguns formatos de modulação e taxas de transmissão. ....	32
<b>Tabela 3</b> - Problema de otimização multiobjetivo para as redes translúcidas adaptado (CHAVES, 2012). ....	48

## Tabela de Símbolos e Siglas

<b>ASE</b>	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
<b>ASK</b>	<i>Amplitude Shift Keying</i>
<b>B-ASK</b>	<i>Binary Amplitude Shift Keying</i>
<b>BP</b>	<i>Blocking Probability</i>
<b>BR</b>	<i>Bit-Rate</i>
<b>CAC</b>	Controlador de Admissão de Chamada
<b>CapEx</b>	<i>Capital Expenditure</i>
<b>CBCN</b>	Colocação Baseada em Contador de Nó
<b>CNF</b>	<i>Centered Node First</i>
<b>CWDM</b>	<i>Coarse Wavelength Division Multiplex</i>
<b>dB</b>	Decibel
<b>DLE</b>	<i>Dynamic Lightpath Establishment</i>
<b>DWDM</b>	<i>Dense Wavelength Division Multiplex</i>
<b>EDFA</b>	<i>Erbium-Doped Fiber amplifier</i>
<b>EON</b>	<i>Elastic Optic Network</i>
<b>ER</b>	<i>Elastic Regenerator</i>
<b>FF</b>	<i>First-Fit</i>
<b>FLR-RA</b>	<i>First Longest Reach Regenerator Assignment</i>
<b>FM</b>	<i>Format Modulation</i>
<b>FNS-RA</b>	<i>First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment</i>
<b>FSK</b>	<i>Frequency Shift Keying</i>
<b>ILA</b>	<i>In Line Amplifier</i>
<b>LASER</b>	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>M-ASK</b>	<i>Multilevel Amplitude Shift Keying</i>
<b>MINCOD</b>	<i>Minimum Coincidence and Distance according</i>
<b>MINCOD-Q</b>	<i>Minimum Coincidence and Distance according to Q factor</i>

<b>MORP</b>	<i>Multiobjective Optimization for Regenerator Placement</i>
<b>mOSNR</b>	<i>Minimum Optical Signal-To-Noise Ratio</i>
<b>MSU-RP</b>	<i>Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement</i>
<b>MU-RP</b>	<i>Most Used Regenerator Placement</i>
<b>NDF</b>	<i>Nodal Degree First</i>
<b>O/E/O</b>	<i>óptica-elétrica-óptica</i>
<b>OA</b>	<i>Optical Amplifiers</i>
<b>OOK</b>	<i>On-off Keying</i>
<b>OpEx</b>	<i>Operational Expenditure</i>
<b>OSNR</b>	<i>Optical Signal-To-Noise Ratio</i>
<b>OXC</b>	<i>Optical Crossconnect</i>
<b>PSK</b>	<i>Phase Shift Keying</i>
<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<b>QoT</b>	<i>Quality of Transmission</i>
<b>RA</b>	<i>Regenerator Assignment</i>
<b>RFA</b>	<i>Raman Fiber Amplifiers</i>
<b>RMSA</b>	<i>Routing, Modulation-level, and Spectrum Assignment</i>
<b>ROADM</b>	<i>Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers</i>
<b>RP</b>	<i>Regenerator Placement</i>
<b>RPP</b>	<i>Regenerator Placement Problem</i>
<b>RSA</b>	<i>Routing and Spectrum Assignment</i>
<b>RWA</b>	<i>Routing and wavelength assignment</i>
<b>SA</b>	<i>Spectrum Allocation</i>
<b>SQP</b>	<i>Signal Quality Prediction</i>
<b>SSE</b>	<i>Source Spontaneous Emission</i>
<b>SSRS</b>	<i>Spectrum-Selective Subchannel Regenerators</i>
<b>STA</b>	<i>Segmentos Transparente Armazenados</i>
<b>TON</b>	<i>Transparent Optical Network</i>

<b>TW</b>	<i>Transitional Weight</i>
<b>UDWDM</b>	<i>Ultra-Dense Wavelength Division Multiplex</i>
<b>VOD</b>	<i>Video On Demand</i>

## Sumário

1. Introdução .....	15
1.1. Descrição do Problema .....	16
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivo Geral .....	17
1.2.2. Objetivos Específicos .....	18
1.3. Motivação .....	18
1.4. Metodologia .....	18
1.5. Organização.....	19
2.1. Dispositivos ópticos .....	20
2.1.1. Transmissores ópticos.....	20
2.1.2. Receptores ópticos .....	21
2.1.3. Amplificadores Ópticos (OA, <i>Optical Amplifiers</i> ).....	21
2.1.4. Multiplexadores de Inserção/Remoção Óptica Reconfiguráveis (ROADM, <i>Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers</i> ).....	22
2.1.5. Regeneradores ( <i>transponders</i> ).....	23
2.2. Tipos de Redes.....	25
2.2.1. Redes Opacas .....	25
2.2.2. Redes transparentes (TON, <i>Transparent Optical Network</i> ) ou Redes Totalmente ópticas ( <i>All-Optical Network</i> ) .....	26
2.2.3. Redes Ópticas Translúcidas .....	26
2.2.4. Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM, <i>Wavelength Division Multiplexing</i> ).....	27
2.2.5. Redes Ópticas Elásticas (EON, <i>Elastic Optical Networks</i> ) .....	28
2.2.6. Formatos de Modulação Digitais .....	29
2.3. Algoritmos relevantes aplicáveis no projeto e na operação de redes ópticas. ...	33
2.3.1. Colocação de Regeneradores (RP, <i>Regenerator Placement</i> ).....	33
2.3.2. Atribuição de Regeneradores (RA, <i>Regenerator Allocation</i> ).....	35
2.3.3. Roteamento e atribuição de Comprimento de Onda (RWA, <i>Routing and wavelength assignment</i> ) .....	35
2.3.4. Roteamento e Alocação de Espectro (RSA, <i>Routing and Spectrum Assignment</i> ).....	37
2.3.5. Algoritmos mais utilizados para o RWA e RSA .....	37
3. Algoritmos de RA e RP.....	39
3.1. Revisão Bibliográfica sobre RP e RA .....	39
3.1.1. Algoritmos de RP.....	39



	14
3.1.1.1. NDF, <i>Nodal Degree First</i> .....	42
3.1.1.2. CNF, <i>Centered Node First</i> .....	43
3.1.1.3. MU-RP, <i>Most Used Regenerator Placement</i> .....	44
3.1.1.4. MSU-RP, <i>Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement</i> .....	45
3.1.1.5. SQP, <i>Signal Quality Prediction</i> .....	47
3.1.1.6. MORP, <i>Multiobjective Optimization for Regenerator Placement</i> .....	47
3.1.2. Algoritmos de RA .....	48
3.2. Proposta de RA .....	50
3.2.1. FLR-RA, <i>First Longest Reach Regenerator Assignment</i> .....	50
3.2.2. FNS-RA, <i>First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment</i> .....	52
3.2.3. Algoritmo Exaustivo .....	53
4. Resultados .....	56
4.1. Arranjo Experimental .....	56
4.2. Resultados do FLR-RA, FNS-RA e exaustivo sem utilização de algoritmo de RP - Topologia 1 .....	59
4.3. Resultados do FLR-RA e FNS-RA sem utilização de algoritmo de RP - Topologia 2 .....	60
5. Conclusão .....	62
5.1. Sugestões para trabalhos futuros .....	62
6. Referências Bibliográficas .....	64

## 1. Introdução

Nos últimos anos, tem-se observado um contínuo crescimento na transferência de dados, esta alta demanda é ocasionada pelo aumento de assinantes e do aparecimento de novos serviços que exigem maior largura de banda, tais como vídeos sob demanda (VOD, do inglês *Video On Demand*), IPTV, jogos 3D on-line, cursos on-line (*e-learning*) e a computação na nuvem (*cloud computing*) (XIA, 2014) (JINNO *et al.*, 2013) (ADHYA & DATTA, 2012) (CHAVES *et al.*, 2012).

Para atender a necessidade de banda cada vez maior, utiliza-se a plataforma de transporte óptico mais eficiente e escalável para uma taxa de transmissão superior a 100Gb/s (JINNO *et al.*, 2013) (ADHYA & DATTA, 2012). A multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM, do inglês *Wavelength-Division-Multiplexing*), tem grande capacidade de transmissão, porém enquanto a camada cliente tem uma demanda variável por capacidade, a inflexibilidade na atribuição nos comprimentos de onda leva a um desperdício de banda de transmissão, quando a demanda do cliente é menor que a capacidade de transmissão do comprimento de onda, a largura de banda restante é desperdiçada.

Uma das tecnologias que permitem uma melhor utilização da rede de fibra óptica escalável, possibilita divisão de faixa de espectro em faixas menores, essa abordagem é também conhecida como redes ópticas elásticas (EON, do inglês *Elastic Optic Network*). Ela é uma evolução das redes ópticas WDM (XIA, 2014). As EON's permitem que os recursos sejam atribuídos de acordo com a largura de banda necessária, porém, em conjunto, surge um novo problema de otimização, chamado de Roteamento e alocação de espectro (RSA, do inglês *Routing and Spectrum Allocation*).

As primeiras redes ópticas são conhecidas como redes opacas. Nelas, todo tipo de operação é realizado por circuitos eletrônicos, ou seja, sempre que alguma decisão e necessária ser realizada, o sinal é convertido do domínio óptico para elétrico e após o processamento é convertido novamente para domínio óptico. Esta conversão é conhecida como conversão óptica-elétrica óptica (O/E/O).

Os dispositivos de rede que realizam essa operação são chamados de *transponders*. Por definição, os *transponders* realizam três processos: reamplificação,

reformatação e o reajuste temporal do pulso, os quais são chamados de regeneração 3R.

Nas redes opacas, cada nó da rede necessita ter um *transponder* para cada comprimento de onda, elevando assim o custo financeiro de implantação da rede. Pensando neste elevado custo, foram realizadas pesquisas a respeito de novas formas de implantar sistemas ópticos, as redes ópticas de segunda geração.

Essas redes, também chamadas de redes totalmente ópticas (*All-Optical Network*) ou redes transparentes (TON, do inglês *Transparent Optical Networks*), nas quais a comunicação ocorre do nó origem até o nó destino em meio óptico sem se utilizar da conversão O/E/O, gerando assim um impacto positivo na redução do custo associado à implementação da rede, se comparada com as redes opacas. Entretanto, também apresentam suas desvantagens.

Por não haver conversão O/E/O na TON, as penalidades na camada óptica pode degradar o sinal transmitido a ponto de o sinal recebido alcançar níveis inaceitáveis para uma comunicação satisfatória. Para resolver esse problema, existem três estratégias que podem ser consideradas são elas: a utilização de dispositivos menos ruidosos, utilização de regeneradores 3R em alguns nós da rede e/ou desenvolvimento de algoritmos de roteamento de alto desempenho, capazes de encontrar rotas que minimizem o impacto das penalidades da camada óptica.

A partir dessas estratégias, foi proposta uma terceira forma de implantar redes ópticas, denominada de redes ópticas translúcidas. A ideia é combinar nas redes translúcidas as vantagens das redes opacas e das TON. Se na rede translúcida, alguns nós são transparentes e outros são opacos ou translúcidos, surge a questão de como decidir quais nós serão translúcidos (HUANG & LI, 2014).

## 1.1. Descrição do Problema

Existem duas abordagens para o tratamento da colocação de regeneradores (RP, do inglês *Regenerator Placement*): colocação esparsa e formação de ilhas de transparência. No que diz respeito às ilhas de transparência, os nós são divididos em grupos formando as ilhas de transparência. Os nós formam diversas ilhas ópticas,

sendo que os nós que formam as bordas e se comunicam com outras ilhas são nós totalmente opacos, enquanto os nós internos são totalmente transparentes.

Enquanto na colocação esparsa, os nós são definidos de forma não simétrica para colocação de regeneradores. O problema de RP, considerando regeneração esparsa, é computacionalmente complexo, principalmente se os números de nós são elevados, e, a depender de como é considerado o RP esparsa pode ser um problema NP-Completo ou NP-Difícil (HUANG & LI, 2014).

A RP consiste em decidir quais nós das EON's serão adicionados regeneradores 3R e quantos deverão ser colocados em cada nó. Este algoritmo influencia diretamente no investimento utilizado na aquisição de bens, chamado CaPEX (CapEx, do inglês *Capital Expenditure*), e o custo associado à manutenção dos equipamentos e outras despesas operacionais OpEX (OpEx, do inglês *Operational Expenditure*) e no desempenho da rede, pois quanto maior a quantidade de regeneradores colocados na rede e melhor o desempenho, conseqüentemente maior o custo com o CaPEX (pois cada regenerador tem um custo unitário) e OpEx (pois cada regenerador precisa ser energizado) (HUANG & LI, 2014).

A atribuição de regeneradores (RA do inglês *Regenerator Assignment*) deve ser resolvida logo após a solução do algoritmo de RP. A decisão de como usar esse recurso de regeneração 3R cabe ao algoritmo de RA, o qual vai determinar qual o caminho óptico e em que nó do caminho o regenerador será usado Huang & Li (2014).

O intuito deste trabalho é executar um estudo de caso de uma solução otimizada para as EON's, visando à redução de custo (CaPex e OpEx) e baixa probabilidade de bloqueio para uma rede esparsa de tráfego dinâmico.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

A pesquisa tem como principal objetivo, realizar o estudo de atribuição de regeneradores em redes ópticas elásticas (EON's) considerando características de custo de implantação (CapEx), custo de operação (OpEx), desempenho das redes em termos de probabilidade de bloqueio e utilização de espectro.

## 1.2.2. Objetivos Específicos

O objetivo deste trabalho será alcançado com o desdobramento das seguintes metas denominadas como objetivos específicos:

- Propor a utilização de algoritmos multiobjetivos para EON considerando custo e desempenho;
- Propor heurísticas para realizar o algoritmo de RP;
- Propor heurísticas para realizar o algoritmo de RA;
- Propor heurísticas para realizar o algoritmo de RSA;
- Propor arquitetura de nó para as EON;
- Estudo e análise entre a relação custo e desempenho.

## 1.3. Motivação

A decisão de como usar o regenerador 3R é de responsabilidade do algoritmo de atribuição de regeneradores, o qual vai determinar em que nó do caminho óptico o regenerador será usado. A atribuição de regeneradores deve ser resolvida logo após a solução do algoritmo de RP.

Devido as requisições na rede ocorrerem de forma dinâmica, é necessário decidir em qual nó o sinal é regenerado. Um algoritmo de RA que trabalhe de forma eficiente, ao mesmo tempo usa a menor quantidade de regeneradores possível e obtém o menor número de bloqueio possível, assim deixando regeneradores livres para atenderem futuras requisições na rede.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é desenvolver algoritmos de RA para redes ópticas elásticas translúcidas que levem em consideração a utilização de regeneradores e slots na rede.

## 1.4. Metodologia

O desenvolvimento deste projeto será realizado através de simulação computacional, de modo que não haverá implementação física (*hardware*) do sistema.

Após as implementações, o autor deverá obter, estudar e analisar as curvas de desempenho x custo (quantidade de adição de regeneradores) para toda a rede.

Um software de simulação foi desenvolvido pela equipe de pesquisa de redes ópticas da Universidade de Pernambuco e Universidade Federal de Pernambuco para efetuar simulações em redes ópticas. Com utilização desse software como base nas simulações foram implementadas as heurísticas aqui discutidas. Esse software é denominado simulador de redes ópticas transparentes (SIMTON, do inglês *Simulator for Transparent Optical Networks*). O SIMTON é um software de simulação orientado a eventos implementado em C++. O SIMTON considera os EONs com tráfego dinâmico, no qual não é conhecido, à priori (HUANG & LI, 2014).

O projeto tem que ser realizado de forma otimizada, no qual, devemos considerar o OpEx (números de nós translúcidos), CaPex (quantidade de regeneradores na rede), *Throughput* e probabilidade de bloqueio da rede óptica.

## 1.5. Organização

Esta monografia está organizada em 4 capítulos:

- Neste capítulo introdutório, descreveram-se as características do problema, pesquisas relacionadas ao assunto, o objetivo geral, os objetivos específicos, a motivação, a metodologia de pesquisa e as definições utilizadas na pesquisa utilizada para o trabalho.
- No capítulo 2 serão discutidos os fundamentos teóricos, dispositivos utilizados, tipos de redes e algoritmos das redes ópticas.
- No capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica dos algoritmos de RA e RP e os algoritmos de RA proposto nesse trabalho, bem como descreve as políticas utilizadas para selecionar as rotas encontradas.
- No capítulo 4, apresenta as topologias, os parâmetros e os resultados dos experimentos. Nesse Capítulo é realizada uma comparação de desempenho entre as heurísticas propostas.
- Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho proposto.

## 2. Referencial Teórico

Neste capítulo, são abordadas as principais características das redes ópticas. Na Seção 2.1, são abordados os dispositivos ópticos utilizados em uma rede óptica, incluindo uma visão geral sobre transmissores ópticos, amplificadores ópticos. Os tipos de redes ópticas estão descritos na Seção 2.2. Já na Seção 2.3, são mostradas as características dos algoritmos de roteamento, alocação de espectro, atribuição de comprimento de onda, colocação de regeneradores e atribuição de regeneradores.

### 2.1. Dispositivos ópticos

Os dispositivos ópticos são fundamentais para realizar a comunicação em redes ópticas. Nesta seção, são mostrados os principais tipos de dispositivos ópticos, como os transmissores ópticos, receptores ópticos, amplificadores ópticos (OA, *Optical Amplifiers*), multiplexadores de inserção/remoção óptica reconfiguráveis (ROADM). Na seção 2.1.5 são mostrados os regeneradores (*transponders*).

#### 2.1.1. Transmissores ópticos

Os transmissores ópticos têm como principal função transformar o sinal elétrico em sinal óptico e são compostos de uma fonte de luz, um modulador e um acoplador (FATH *et al.*, 2013). Os transmissores ópticos utilizados em sistemas de comunicação são os LEDs (*Light Emitting Diode*), baseados em emissão espontânea e os LASERS (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), baseados na emissão estimulada de irradiação (MARIA & CENNAMO, 2014) (ESSIAMBRE, 2008).

A principal característica de um transmissor para redes ópticas é a largura espectral. O LED tem a maior largura espectral quando comparamos aos LASERS (MARIA & CENNAMO, 2014) (ESSIAMBRE, 2008).

Os LASERS são mais utilizados, pois entre suas características há o menor espalhamento espectral e, conseqüentemente, o melhor acoplamento nas fibras ópticas (ESSIAMBRE, 2008) (JINNO & HIDEHIKO, 2012).

### 2.1.2. Receptores ópticos

Os receptores ópticos são responsáveis por absorver a luz transmitida pela fibra óptica e transforma-la em corrente elétrica (EL-HOWAYEK *et al.*, 2014).

O ideal é que os receptores ópticos consigam operar com os menores níveis de potência de recepção possíveis, e na conversão de óptico para elétrico e vice-versa, reduzir os efeitos do ruído (EL-HOWAYEK *et al.*, 2014).

### 2.1.3. Amplificadores Ópticos (OA, *Optical Amplifiers*)

No decorrer dos anos, a capacidade de transmissão das redes ópticas aumentou e os dispositivos responsáveis pela regeneração eletrônica dos sinais se tornaram cada vez mais complexos e caros. Nesse contexto, os amplificadores ópticos são responsáveis pela amplificação do sinal óptico sem necessidade de nenhuma conversão do domínio óptico-elétrico-óptico(O/E/O) (EL-HOWAYEK *et al.*, 2014) (PELOUCH *et al.*, 2015).

Os OAs podem ser divididos das seguintes formas (EL-HOWAYEK *et al.*, 2014) (PELOUCH *et al.*, 2015):

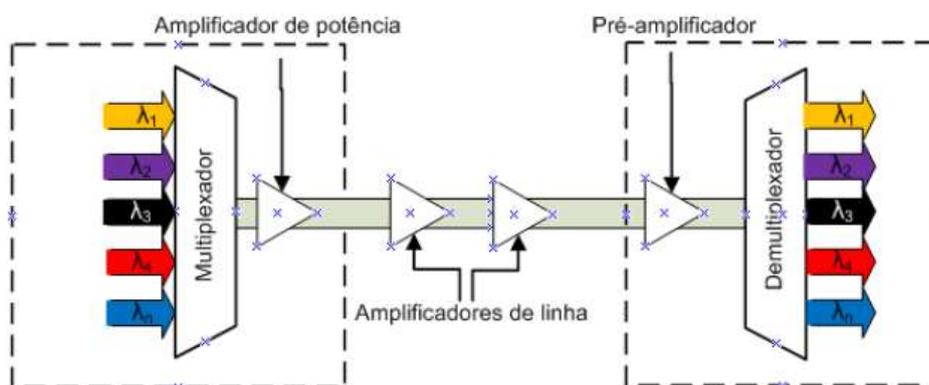
- **Amplificadores de Potência (*booster*)** - Responsáveis por aumentar a potência na saída do transmissor óptico (YOSHIKI, 1991);
- **Amplificadores de linha (ILA, *In Line Amplifier*)** - Responsáveis por compensar as atenuações do sinal na fibra óptica ao longo da transmissão (YOSHIKI, 1991) (PELOUCH *et al.*, 2015);
- **Pré-amplificadores** - Responsáveis por amplificar o sinal imediatamente antes do receptor óptico, assim elevando a amplitude do sinal em níveis aceitáveis de recepção (EL-HOWAYEK *et al.*, 2014).

Os tipos de amplificadores ópticos mais utilizados são (YOSHIKI, 1991) (PELOUCH *et al.*, 2015):

- Fibra Dopada com Érbio (EDFA, *Erbium-Doped Fiber Amplifier*) – consiste basicamente em uma fibra óptica com comprimento de dezenas de metros dopada com íons trivalentes de Érbio (YOSHIKI, 1991);
- Raman (RFA, *Raman Fiber Amplifiers*) - São utilizados principalmente para redes ópticas de grandes distâncias e são baseados no efeito não linear de espalhamento Raman estimulado (PELOUCH *et al.*, 2015).

A Figura 1, ilustra a utilização de cada amplificador óptico. Pode-se observar que após os sinais serem multiplexados, um amplificador de potência amplifica a saída da transmissão, em seguida, temos os amplificadores de linha que compensam as perdas do sinal durante a transmissão. E por último, antes do sinal chegar ao receptor o pré-amplificador eleva a amplitude do sinal em níveis aceitáveis de recepção.

**Figura 1** - Amplificadores Ópticos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

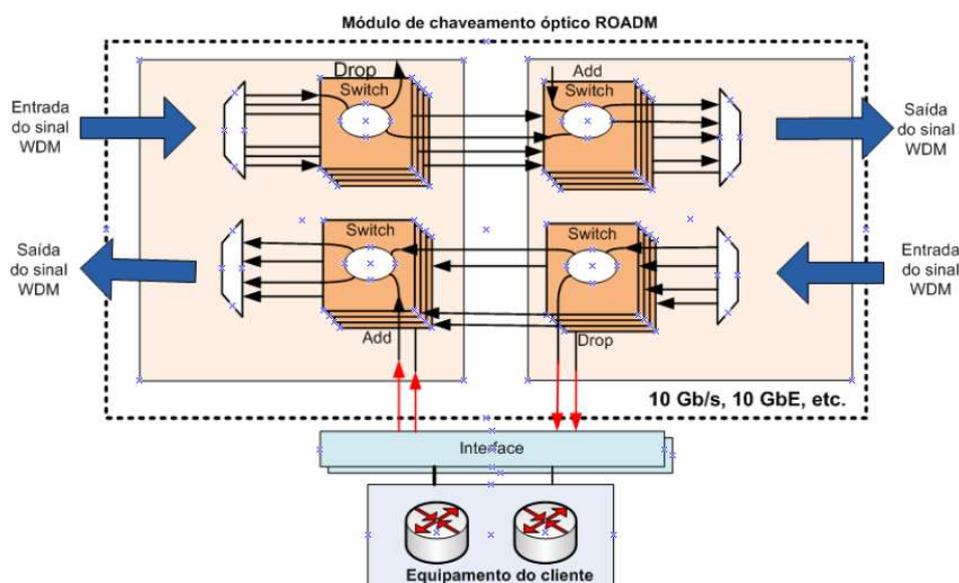
#### 2.1.4. Multiplexadores de Inserção/Remoção Óptica Reconfiguráveis (ROADM, *Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers*)

Os multiplexadores de inserção/remoção óptico reconfigurável (ROADM), possibilitam que seja alterado de forma remota o tráfego do sistema WDM. O ROADM permite a comutação de forma seletiva dos comprimentos de

onda, ou seja, por meio dele é configurado em quais canais será realizada a inserção, remoção ou chaveamento em um determinado nó da rede (WAY, 2012) (ABEDIFAR *et al.*, 2013).

A Figura 2 mostra as possíveis configurações de chaveamento de canais em um módulo ROADM. O sinal pode ser adicionado (*add*) ou retirado (*drop*) conforme configuração realizada na rede.

**Figura 2** - Exemplo de funcionamento do módulo ROADM.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.1.5. Regeneradores (*transponders*)

Um dos principais focos desta dissertação é a aplicação de regeneradores em redes ópticas. Os sinais que trafegam nas redes ópticas sofrem atenuações e distorções durante sua transmissão, devido às próprias características da fibra óptica. Com intuito de compensar esses efeitos, são utilizados os regeneradores de sinais (LÓPEZ *et al.*, 2014) (MIRANDA *et al.*, 2014).

Os regeneradores podem ser utilizados:

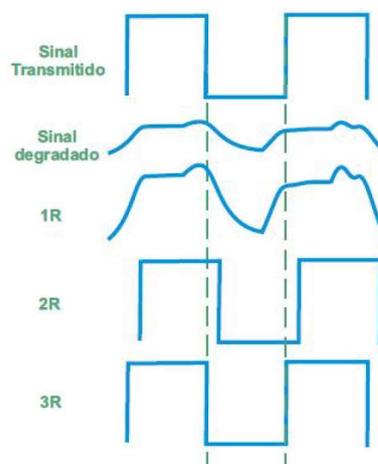
- Por falta de qualidade de transmissão - Ocorre quando a qualidade de transmissão do caminho óptico não estiver dentro de limiares aceitáveis;
- Para conversão de espectro - Ocorre quando um caminho óptico não tem disponibilidade de slots contíguos e consecutivos entre os nós de origem e destino;
- Para conversão de formato de modulação - Ocorre quando é necessário economizar espectro na rede, utilizando um formato de modulação mais eficiente e que necessite de uma quantidade pequena de slots.

Os regeneradores podem ser classificados das seguintes formas (ROCCATO *et al.*, 2014) (MIRANDA *et al.*, 2014):

- 1R - Apenas amplificam o sinal;
- 2R - Amplificam e reformatam o sinal;
- 3R - Amplificam, reformatam e retemporizam o sinal.

Na Figura 3, podemos observar o que acontece com o sinal óptico durante cada etapa de uma regeneração 3R. O sinal transmitido fica degradado devido as atenuações do sistema. Quando o regenerador 3R recebe o sinal, primeiro ele amplifica, em seguida reformata e por último retemporiza.

**Figura 3** - Etapas da regeneração 3R.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.2. Tipos de Redes

Nessa seção, são mostrados os tipos de redes conforme sua classificação: opacas, translúcidas e transparentes. A seção 2.2.4 explica de forma sucinta o funcionamento das redes WDM e a seção 2.2.5, mostra a estrutura das redes elásticas, e por último, a seção 2.2.6 são discutidos alguns formatos de modulação que podem ser usados em redes ópticas elásticas.

### 2.2.1. Redes Opacas

As redes opacas são chamadas de redes de primeira geração. Nelas, sempre que alguma comutação no sinal transmitido precisa ser realizada é necessário converter para o domínio eletrônico e depois novamente para o domínio óptico. Esse processo é conhecido na literatura como conversão óptica-elétrica-óptica (O/E/O). Os dispositivos de rede que realizam essa operação são os *transponders*. Nessas redes, a cada nó, o sinal óptico é regenerado resultando, normalmente, em uma elevada OSNR (*Optical Signal-To-Noise Ratio*) entregue no destino. Podemos observar as seguintes vantagens e desvantagens (CHAVES, 2012).

Vantagens (CHAVES, 2012):

- Fácil conversão de comprimentos de onda e espectro;
- Fácil obtenção de parâmetros para gerência de redes.

Desvantagens (CHAVES, 2012):

- A rede não fica transparente à modulação, à taxa de *bits* ou aos protocolos utilizados na transmissão. Logo, sempre que há uma mudança em algum desses itens, todos os *transponders* da rede precisam ser modificados;
- Para cada comprimento de onda instalado em um enlace óptico, dois *transponders* são necessários em cada nó da rede. A quantidade de *transponders* utilizada na rede, está ligada diretamente ao custo final de implantação da rede (CapEx) e o custo de operação da rede (OpEx).

### **2.2.2. Redes transparentes (TON, *Transparent Optical Network*) ou Redes Totalmente ópticas (*All-Optical Network*)**

O elevado custo de implementação das redes opacas, conforme discutido na seção 2.2.1, levou à pesquisa de novas maneiras de implantar redes ópticas. Paralelamente, com o surgimento de dispositivos como: OAs, ROADMs e OXCs (*Optical Cross-Connects*), foram propostas as redes ópticas de segunda geração (CHAVES, 2012) (BORZYCKI, 2003).

Essas redes são chamadas de redes Transparentes (TON, *Transparent Optical Network*) ou redes totalmente ópticas (*All-Optical Networks*), nelas todo tipo de chaveamento e roteamento são realizados na camada óptica, ou seja, a comunicação ocorre desde o nó de origem até o nó de destino em meio óptico sem sofrer conversão O/E/O.

Uma das vantagens dessa geração de redes ópticas, é a redução de CapEx, quando comparada às redes opacas. Contudo, como não há mais utilização de *transponders* nos nós intermediários na rede (a conversão O/E/O é apenas realizada nos nós de origem e destino), o acúmulo de penalidades na camada óptica pode deixar o sinal recebido muito degradado, de forma que não seja possível ter uma comunicação satisfatória (CHAVES, 2012) (RUMLEY *et al.*, 2015).

### **2.2.3. Redes Ópticas Translúcidas**

Uma das estratégias para contornar o problema do acúmulo de penalidades na camada óptica apresentado pelas redes transparentes, é distribuir regeneradores 3R em alguns nós da rede. Essa solução é denominada de redes ópticas translúcidas (CHAVES, 2012) (RUMLEY *et al.*, 2015).

As redes ópticas translúcidas tem o intuito de combinar as vantagens das redes ópticas opacas com as vantagens das TONs em uma única implementação, distribuindo os regeneradores na rede de forma estratégica. Assim, as redes ópticas translúcidas conseguem uma redução de custo na sua implementação, se

comparadas às redes opacas, e melhor qualidade de transmissão em relação às redes totalmente ópticas (CHAVES, 2012) (RAHMAN *et al.*, 2015).

Porém, surge um problema de como decidir quais nós serão transparentes ou translúcidos, neste caso é necessário aplicar um algoritmo que faça essa seleção. Esse algoritmo é conhecido como algoritmo de colocação de regeneradores cujo funcionamento está explicado na seção 2.3.1 (CHAVES, 2012).

#### **2.2.4. Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*)**

Com o objetivo de explorar a máxima capacidade da fibra óptica, a tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) é utilizada para transmitir pela fibra vários canais que transportam informações diferentes. Para que isso aconteça, são utilizados vários LASERs com espaçamentos apropriados entre os seus comprimentos de onda (NAGATA *et al.*, 2014) (TURKCU & SUBRAMANIAM, 2014).

Os tipos de sistemas WDM mais comuns são (NAGATA *et al.*, 2014) (TURKCU & SUBRAMANIAM, 2014):

- **CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*)**: sistema cuja multiplexação óptica possui espaçamento de 200 GHz e pode variar a quantidade de canais de 4 a 16, dependendo da fibra óptica adotada no projeto. Sua taxa de transmissão pode variar de E3 (34 Mb/s) a STM-16 (2,5 Gb/s);
- **DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*)**: sistema cuja multiplexação óptica possui espaçamento que varia de 25 GHz, 50 GHz e 100 GHz, e pode variar a quantidade de canais de 16 a 128. Sua taxa de transmissão pode variar de STM-1 (155 Mb/s) a STM-64 (10 Gb/s);

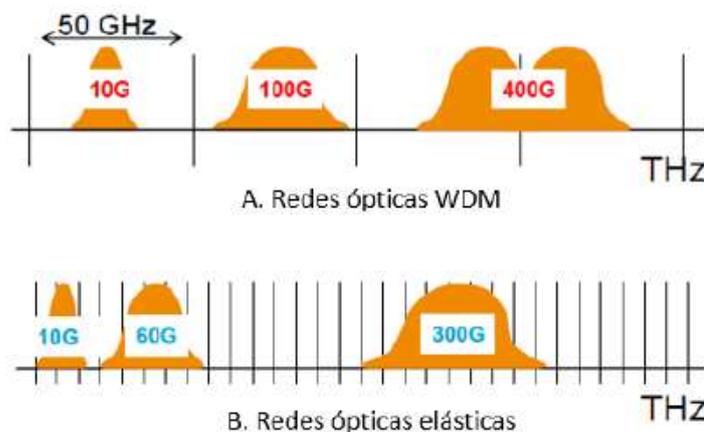
- **UDWDM (*Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing*)**: sistema cuja multiplexação óptica possui espaçamento menor que 25 GHz e possui uma quantidade de canais superior a 128.

### 2.2.5. Redes Ópticas Elásticas (EON, *Elastic Optical Networks*)

As redes de transporte estão evoluindo gradualmente para permitir uma utilização mais eficiente do espectro disponível na fibra óptica. Com esse objetivo, foram recentemente propostas as redes ópticas elásticas. Essa tecnologia permite que o espectro seja dividido em faixas menores comparada as redes WDM (DALLAGLIO *et al.*, 2015).

Na Figura 4, observar-se a divisão do espectro nas EON's em relação às redes WDM (XIA, 2014). A rede WDM introduz uma definição de grade rígida de 25, 50, 100 e 200 GHz. Por outro lado, a rede óptica elástica baseia-se numa grade que ocupa um espaçamento menor, de 6,25 GHz ou 12,5 GHz (XIA, 2014). Nas redes WDM, o espectro, na maioria das vezes, é muito desperdiçado por uma requisição na rede, enquanto na rede elástica, a divisão do espectro facilita a utilização de forma mais eficiente e otimizada.

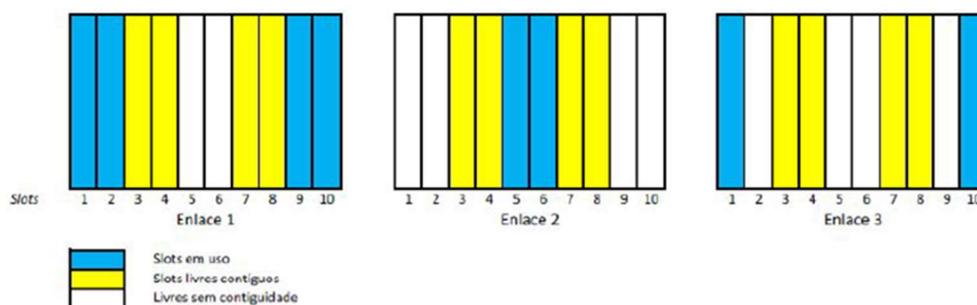
**Figura 4** - Comparativo de utilização de espectro entre a rede WDM e a rede óptica elástica (XIA, 2014) adaptado.



**Fonte:** Elaborada pelo autor.

As redes ópticas elásticas surgiram com um novo paradigma de rede, pois melhoram a eficiência no uso espectro disponível na rede. No entanto, temos um problema de utilização dos slots não consecutivos/contíguos, pois utilizar esses slots é necessário um alinhamento no espectro (XIA, 2014). A Figura 5 abaixo mostra uma rota com três enlaces e seus respectivos slots. Se na situação mostrada na figura fosse solicitado à rede o estabelecimento de uma chamada sem conversão de espectro que necessitasse de dois slots, apenas seria possível utilizar os slots 3 e 4 ou 7 e 8, pois eles são consecutivos e contíguos ao longo de toda a rota (XIA, 2014).

**Figura 5 -** Contiguidade de slots.



**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Outra característica importante numa EON, diz respeito à utilização de diferentes formatos de modulação.

## 2.2.6. Formatos de Modulação Digitais

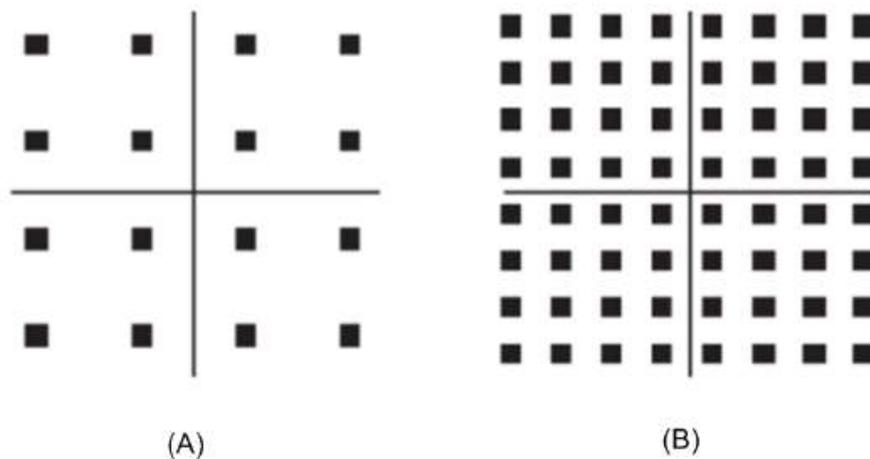
O sinal digital pode ser modulado por chaveamento de amplitude (ASK, *Amplitude Shift Keying*), por chaveamento de frequência (FSK, *Frequency Shift Keying*), por fase (PSK, *Phase Shift Keying*) e por fase e amplitude (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*).

As principais características da modulação ASK são: facilidade de modulação e demodulação, pequena largura de faixa e baixa imunidade a ruído. Algumas classificações da modulação ASK: OOK (*On-off Keying*), B-ASK (*Binary Amplitude Shift Keying*) e M-ASK (*Multilevel Amplitude Shift Keying*).

A principal característica da modulação por chaveamento de frequência (FSK) é uma boa imunidade a ruídos, quando comparada com a ASK. A modulação FSK é utilizada, geralmente, em modems e transmissão via rádio. A modulação QAM apresenta altas capacidades, devido a modificar de forma simultânea a amplitude e fase do sinal.

Conforme mostra na Figura 6(A), 16 QAM, usa 16 símbolos, sendo 4 em cada quadrante, enquanto o 64 QAM, usa 64 símbolos, 16 símbolos em cada quadrante, mostrado na Figura 6(B). Quanto mais símbolos por quadrante, melhor é a eficiência espectral do FM, devido aos símbolos ficarem muito próximos, e menor é sua imunidade à ruídos, exigindo assim um maior limiar da OSNR.

**Figura 6** - Constelação do sinal para 16QAM (A) e 64QAM (B).



**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Para que a transmissão de dados seja possível num sistema óptico, em geral, é necessário atender uma OSNR mínima. Um possível modelo para se calcular a OSNR em um sistema óptico é mostrado a seguir, a Equação (1) mostra o cálculo, em escala linear, da OSNR ao final de um trecho amplificado (XIA, 2014).

$$osnr = \frac{P}{2N_{ASE}B_{ref}} \quad (1)$$

em que:

$B_{ref}$ : Largura de banda de referência, geralmente considerada como sendo de 12,5GHz;

$P$ : Potência do sinal;

$NASE$ : Densidade espectral do ruído da emissão espontânea amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) em uma polarização;

A OSNR final de cada trecho da requisição deve ser maior ou igual ao OSNR mínima aceitável, conforme mostra a Equação (2) (XIA, 2014):

$$OSNR \geq OSNR_{min} \quad (2)$$

A OSNR mínima ( $OSNR_{min}$ ) aceitável no fim de cada conexão pode ser calculada conforme a Equação (3) (XIA, 2014):

$$OSNR_{min} = 10^{(OSNR_{ref} + M_{OSNR}/10)} \quad (3)$$

em que:

$OSNR_{req}(dB) = 10 \log_{10} OSNR_{req}$ ; Transforma o valor do  $OSNR_{req}$  em dB;

$M_{OSNR} = 3dB$ ; normalmente é utilizado este valor.

Logo, a  $OSNR_{req}$  para uma determinada taxa de transmissão pode ser calculada conforme a Equação (4) abaixo (XIA, 2014):

$$OSNR_{req} = \left( \frac{R_b \cdot OSNR_b}{2 \cdot B_{ref}} \right) \quad (4)$$

em que:

$B_{ref}$ : Largura de banda de referência, geralmente considerado como sendo de 12,5GHz;

$R_b$ : Taxa de transmissão (b/s);

$OSNR_b$ : é verificado na Tabela 1, conforme formato de modulação utilizado.

A Tabela 1 mostra  $OSNR_{req}$  para alguns formatos de modulação e taxas de bit. Para uma demanda de 200Gb/s e formato de modulação de 16-QAM (maior eficiência espectral da tabela), a  $OSNR_{req}$  é de 19,55dB. Caso não seja

possível estabelecer essa conexão com 16-QAM, por falta de qualidade de transmissão, pode ser tentado, caso a rede tenha suporte, um formato de modulação com menor eficiência espectral, e conseqüentemente menor  $OSNR_{req}$ . Essa verificação pode ser feita em conjunto com algoritmo de RA (XIA, 2014).

**Tabela 1** - Exemplo de  $OSNR_{req}$  para alguns formatos de modulação e taxas de transmissão.

		BR		
		100Gb/s	200Gb/s	400Gb/s
FM	4-QAM	12,81	15,82	18,83
	8-QAM	15,05	18,06	21,07
	16-QAM	16,54	19,55	22,56

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Após ser verificada a qualidade de transmissão no caminho óptico, é necessário verificar a disponibilidade de slots na rede. Utilizando a Equação (4), verifica-se a quantidade de slots necessários para cada formato de modulação e taxa bit, conforme mostrado na Tabela 2. Quando a equação não retorna um valor inteiro, é utilizado o menor inteiro maior que o valor calculado. Analisando a Tabela 2, pode-se verificar que o formato de modulação com a melhor eficiência espectral utiliza menos slots, enquanto o formato de modulação com a pior eficiência espectral necessita de mais slots (XIA, 2014).

**Tabela 2** - Exemplo de quantidade de slots necessários para alguns formatos de modulação e taxas de transmissão.

		BR		
		100Gb/s	200Gb/s	400Gb/s
FM	4-QAM	2	4	8
	8-QAM	2	3	6
	16-QAM	1	2	4

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

## 2.3. Algoritmos relevantes aplicáveis no projeto e na operação de redes ópticas.

Esta seção tem como objetivo mostrar quais são os principais algoritmos de colocação de regeneradores (RP), atribuição de regeneradores (RA), roteamento e atribuição de espectro (RSA) e roteamento e alocação de comprimento de onda (RWA), como também suas principais características.

### 2.3.1. Colocação de Regeneradores (RP, *Regenerator Placement*)

O problema de colocação de regeneradores (RPP, *Regenerator Placement Problem*), tem como principal objetivo definir quais nós da rede e quantos regeneradores por nó devem ser colocados com intuito de reduzir a probabilidade de bloqueio (NATH, 2014). Esse algoritmo influencia diretamente no CapEx, OpEx e no desempenho da rede, pois quanto mais regeneradores são colocados na rede, mais custosa fica a implementação da rede (CapEx) e maior o consumo de energia (OpEx) (CHAVES, 2012).

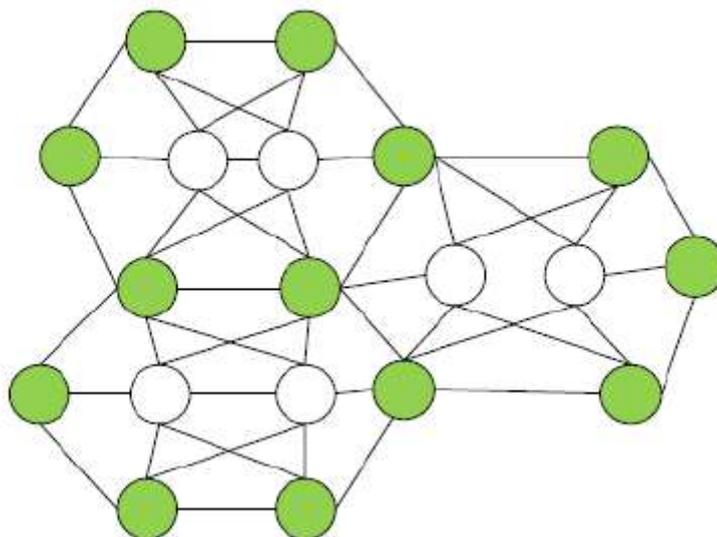
O planejamento para colocação de regeneradores, pode ser feito das seguintes formas (NATH, 2014):

- **Ilhas de transparências** - Apenas os nós de fronteira entre as ilhas possuem regeneradores 3R;
- **De forma esparsa** - Regeneradores 3R podem ser colocados em qualquer nó da rede de forma pré-determinada;
- **Regeneradores mistos** - Pode ser feita a opção pela colocação de regeneradores 1R, 2R e 3R em vez de apenas regeneradores 3R.

As Figuras 7 e 8 mostram, respectivamente, regeneradores distribuídos como ilhas de transparências e de forma esparsa. Os nós verdes são os nós que

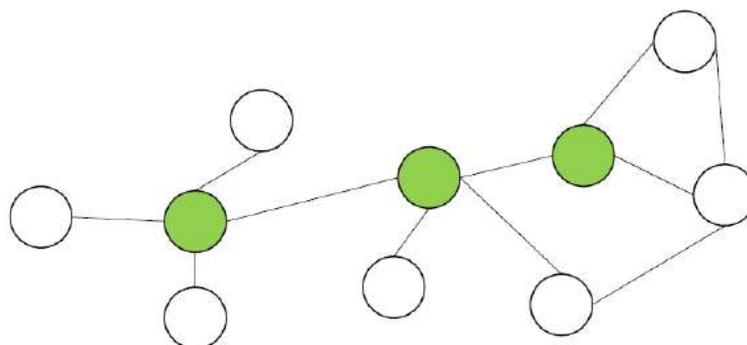
foram adicionados regeneradores, enquanto os nós de cor branca são nós transparentes (sem regeneradores).

**Figura 7** - Regeneradores distribuídos de forma de ilhas de transparências.



**Fonte:** Elaborada pelo autor.

**Figura 8** - Regeneradores distribuídos de forma esparsa.



**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Na abordagem de colocação de regeneradores em redes translúcidas de forma esparsa, qualquer nó da rede pode ser selecionado para receber regenerador durante o planejamento. Geralmente, neste tipo de estratégia são utilizados menos regeneradores do que na abordagem de ilhas de transparências para se obter o mesmo desempenho (NATH, 2014).

### **2.3.2. Atribuição de Regeneradores (RA, *Regenerator Allocation*)**

O problema de RA é verificado durante o estabelecimento dos circuitos ópticos, pois o algoritmo de atribuição de regeneradores decide regenerar ou não um sinal óptico em um nó com capacidade de regeneração de acordo com a qualidade de transmissão (QoT) e disponibilidade de regeneradores no nó em questão (FONTINELE *et al.*, 2014) (CHAVES *et al.*, 2015). Esse algoritmo se aplica apenas às redes translúcidas, após resolver o problema de colocação de regeneradores.

A atribuição de regeneradores deve ser resolvida durante a operação da rede. Uma vez que se resolveu o RP, os regeneradores estão disponíveis para uso em cada nó da rede. A decisão de como usar esse recurso de regeneração 3R cabe ao algoritmo de RA, ou seja, um caminho óptico pode seguir da origem até o destino totalmente no domínio óptico ou então ser regenerado em algum nó da rede.

O RA para ser eficiente tenta usar o mínimo de regeneradores, preservando recurso para atender futuras demandas e evitando o bloqueio de chamadas. Em EONs, o algoritmo de RA também pode ser responsável pela conversão de espectro no caso de não contiguidade de slots, conforme mostrado na seção 2.2.5. O algoritmo de RA tem como objetivo recuperar o sinal transmitido muito degradado, com isso reduzir os bloqueios por falta de qualidade de sinal óptico, atribuindo o uso de regeneradores quando necessário (FONTINELE *et al.*, 2014) (CHAVES *et al.*, 2015).

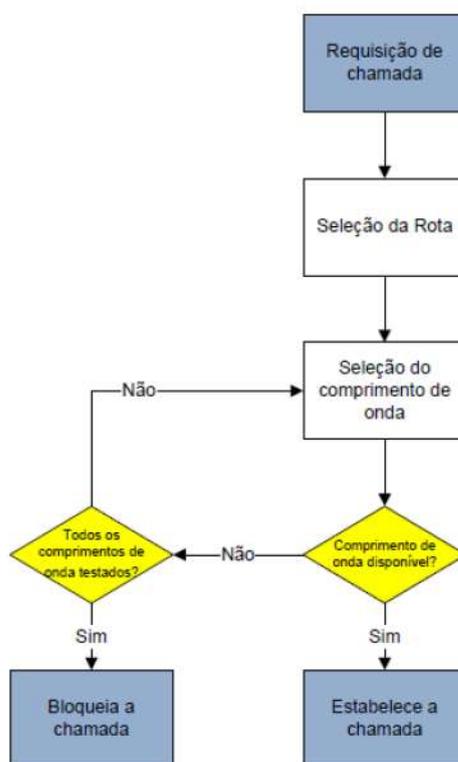
### **2.3.3. Roteamento e atribuição de Comprimento de Onda (RWA, *Routing and wavelength assignment*)**

O problema de estabelecer os caminhos ópticos para cada solicitação de conexão, escolhendo uma rota apropriada e atribuindo o comprimento de onda, é chamado de problema de roteamento e alocação de comprimento de

onda (RWA) (CHATTERJEE *et al.*, 2015). Em redes ópticas dinâmicas WDM sem conversores de comprimento de onda, o mesmo comprimento de onda deve ser usado em todos os enlaces pertencentes ao caminho óptico (MUKHERJEE, 2006). O objetivo do algoritmo de RWA é a criação de caminhos ópticos e atribuição de comprimentos de onda de maneira que minimize a quantidade de bloqueio das requisições da rede (ZHANG *et al.*, 2002).

O funcionamento básico de um algoritmo de RWA pode ser mostrado no fluxograma contido na Figura 9. O RWA pode ser dividido em duas etapas independentes: O roteamento e atribuição de comprimento de onda. Para cada demanda solicitada na rede é escolhida uma rota (R). Após a seleção de rota, o algoritmo de atribuição de comprimento de onda define se existe um comprimento disponível. Caso negativo, outros comprimentos de onda na rota escolhida podem ser tentados. Se houver um comprimento de onda disponível a chamada é estabelecida. Caso contrário, a chamada é bloqueada.

**Figura 9** - Fluxograma do algoritmo de roteamento e alocação de comprimentos de onda



**Fonte:** Elaborada pelo autor.

#### **2.3.4. Roteamento e Alocação de Espectro (RSA, *Routing and Spectrum Assignment*)**

O problema de RSA em redes ópticas elásticas é equivalente ao problema de RWA nas redes ópticas WDM (CHATTERJEE *et al.*, 2015). O RSA é utilizado para encontrar as rotas apropriadas para um par de origem e destino e atribuir a faixa de espectro adequada ao caminho óptico solicitado (MUKHERJEE, 2006). A diferença de RSA e RWA é devida à capacidade da arquitetura da rede óptica elástica flexível para oferecer atribuição de espectro para atender às taxas de dados solicitados (MUKHERJEE, 2006).

Para acomodar uma demanda em uma EON, o plano de controle de rede deve encontrar um caminho e uma faixa de espectro disponível (ABEDIFAR *et al.*, 2013). O problema de RSA em EONs é mais desafiador do que o roteamento e alocação de comprimento de onda (RWA) (ABEDIFAR *et al.*, 2013). Em vez de comprimentos de ondas, uma demanda de tráfego pode solicitar vários slots do espectro contíguos. O algoritmo de RSA deve evitar a fragmentação dos recursos espectrais de forma não contíguas por links de fibras (ABEDIFAR *et al.*, 2013). Além disso, a distância de transmissão e largura de banda estão intimamente relacionadas com o formato de modulação do sinal (ABEDIFAR *et al.*, 2013). Assim, surge um novo problema: A atribuição de formato de modulação. Assim, o problema de RSA pode ser estendido para um roteamento, em formato de modulação e atribuição de espectro (RMSA, *Routing, Modulation-level, and Spectrum Assignment*) (ABEDIFAR *et al.*, 2013).

#### **2.3.5. Algoritmos mais utilizados para o RWA e RSA**

O problema de roteamento e alocação de espectro/alocação de comprimento de onda (RSA e RWA), é dividido em duas etapas. Na fase do roteamento (R) o algoritmo mais utilizado é o Dijkstra. Esse algoritmo tem como função localizar o menor caminho entre o nó de origem e o nó de destino. Na fase de alocação de espectro SA (SA, *Spectrum Assignment*) e atribuição de

comprimento de onda (WA, *Wavelength Assignment*) o algoritmo mais simples é o *First-Fit* (FF) (GEISLER *et al.*, 2011), que consiste em acomodar uma nova rota óptica nos slots do espectro disponível que atendem às condições de continuidades e contiguidade. O RSA FF tem como principal estratégia a atribuição espectral e o uso do caminho de menor distância. Contudo, esse algoritmo não avalia as condições de continuidades e contiguidade de slots para uma atribuição futura (KELLER *et al.*, 2012).

### 3. Algoritmos de RA e RP

Este capítulo tem como objetivo efetuar uma revisão bibliográfica dos algoritmos de colocação de regeneradores (RP) e atribuição de regeneradores (RA) propostos na literatura, como também apresentar os algoritmos de RA propostos nesse trabalho. Na seção 3.1.1 são apresentados os algoritmos de RP propostos por outros trabalhos. As características dos algoritmos de RA propostos em outros trabalhos estão na Seção 3.1.2.

Na Seção 3.2 são apresentados os algoritmos RA propostos nessa dissertação: o FLR-RA (*First Longest Reach Regenerator Assignment*), FNS-RA (*First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment*) e o exaustivo.

#### 3.1. Revisão Bibliográfica sobre RP e RA

O objetivo principal desta Seção é fazer um estudo de dois aspectos do projeto de redes ópticas elásticas translúcidas no tocante aos regeneradores: Planejamento implantação da rede (colocação de regeneradores) e operação da rede (atribuição de regeneradores). Nesta seção é feita uma revisão da literatura dos trabalhos sobre esses dois aspectos.

##### 3.1.1. Algoritmos de RP

Como visto na seção 2.3.1, em uma rede translúcida alguns nós são transparentes e outros são translúcidos, surgindo a questão de escolher como deverão ser definidos os nós na rede. Além disso, há também outra decisão a ser tomada: a quantidade de regeneradores que devem ser adicionados em cada nó translúcido. Esse problema é conhecido na literatura como problema de colocação de regeneradores (RPP ou RP) (CHAVES, 2012).

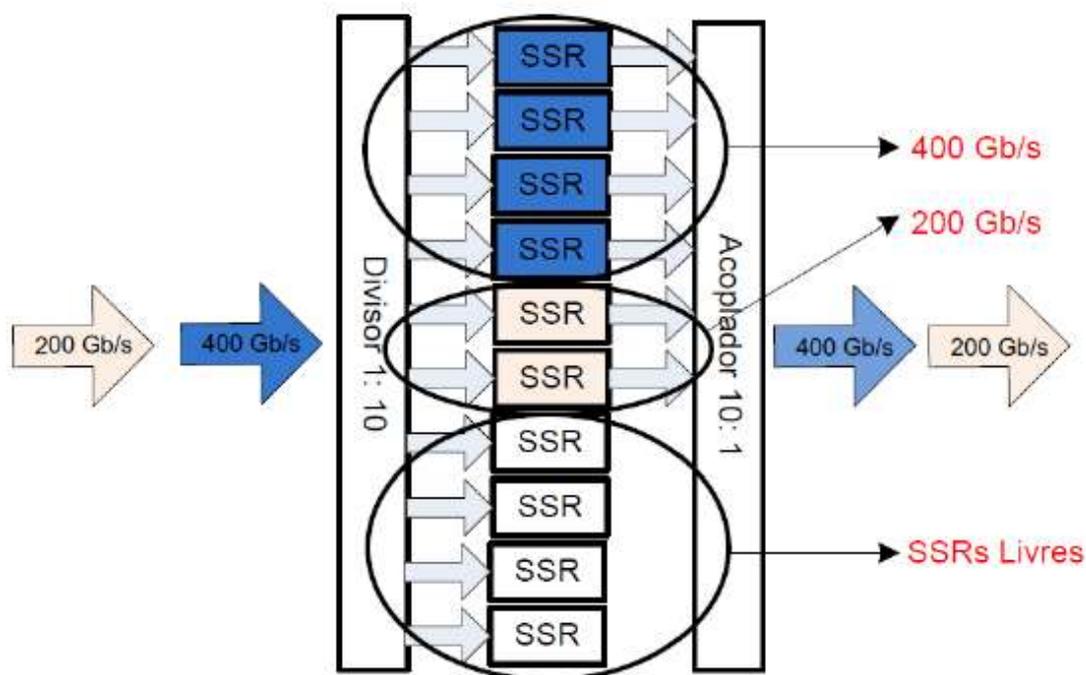
A colocação de regeneradores é definida no planejamento da rede, ou seja, é um problema a ser resolvido antes de sua operação. As principais abordagens de colocação de regeneradores são: colocação esparsa e formação de ilhas de transparência (CHAVES, 2012). Em relação à colocação

de regeneradores em forma de ilhas de transparências, são formadas diversas redes transparentes na rede óptica (CHAVES, 2012). A divisão é feita em diversos grupos, que são chamados de ilhas de transparência. É necessário que haja pelo menos um caminho com QoT entre os nós dentro da ilha. Nas extremidades de cada ilha, são colocados nós opacos, enquanto os nós que ficam dentro da ilha são nós transparentes. Logo, como temos apenas regeneradores nas bordas da ilha, todas as comunicações realizadas dentro de uma mesma ilha são realizadas de forma totalmente óptica. As requisições entre duas ou mais ilhas são sempre possíveis, pois o sinal é regenerado entre uma ilha e outra (CHAVES, 2012).

Na abordagem de colocação esparsa, os nós translúcidos da rede são escolhidos de forma assimétrica. Os demais nós são transparentes (CHAVES, 2012). Com esse tipo de colocação, temos uma flexibilidade grande, pois o regenerador só é colocado no nó que é necessário. Este tipo de colocação é complexo computacionalmente, principalmente se o número de nós é muito elevado. O problema de colocação de regeneradores de forma esparsa pode ser considerado um problema NP-completo ou NP-difícil (CHAVES, 2012).

As redes ópticas tendem a suportar uma vasta variedade de taxa de transmissão, como por exemplo, de 100 Gb/s até 1 Tb/s. Com o intuito de garantir essa escalabilidade, Jinno *et al.* (2013) propuseram uma abordagem escalável para implementação de regeneradores em EON's (JINNO *et al.*, 2013). A arquitetura proposta visa conseguir uma regeneração mais eficaz, nos quesitos custo e eficiência. A Figura 10 mostra a arquitetura dos regeneradores elásticos (ER, *Elastic Regenerator*) proposta por Jinno *et al* (2013). O ER consiste em um conjunto de regeneradores de espectro seletivo sub-canal (SSRS, *Spectrum-Selective Subchannel Regenerators*) que atua em conjunto com regeneração virtualizada de 100 Gb/s. Conforme a taxa de transmissão solicitada na rede, é agregado o número necessário de SSRs para regenerar o sinal óptico. Os regeneradores disponíveis por cada nó são compartilhados para qualquer requisição de rede. Por exemplo, para uma taxa de transmissão de 400 Gb/s quatro SSRs são escolhidos para regenerar essa demanda (JINNO *et al.*, 2013). Essa arquitetura é utilizada neste trabalho.

**Figura 10** - Funcionamento dos regeneradores de espectro seletivo de sub-canal (SSRs)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste trabalho discute-se apenas a utilização de regeneração esparsa, logo são mostradas somente as principais estratégias de solução de RP que utilizam essa abordagem (CHAVES, 2012). Grande parte dos algoritmos de colocação de regeneradores na literatura utilizam a decisão de colocação baseada na topologia da rede ou no tráfego previsto (CHAVES, 2012). Os algoritmos de colocação de regeneradores baseados na topologia utilizam em sua decisão apenas informações de topologia de rede, como: o número de nós e o grau do nó (CHAVES, 2012). Essas abordagens são facilmente implantadas, porém, geralmente não retornam soluções que tenham alto desempenho de rede (CHAVES, 2012), pois os padrões de tráfego aos que a rede está sujeita. Não são considerados na implantação de regeneradores. A estratégia de colocação de regeneradores baseada no tráfego na rede, em geral, tem melhor desempenho de rede, embora, em geral, seja mais lenta. Isso ocorre em razão de o RP considerar características do tráfego durante sua colocação de regeneradores. No entanto, caso os parâmetros de tráfego sejam muito diferentes do real, o RP pode não conseguir o desempenho de rede satisfatório (CHAVES, 2012).

Grande parte dos algoritmos heurísticos na literatura para colocação de regeneradores que consideram estabelecimento dinâmico de caminho óptico (DLE, *Dynamic Lightpath Establishment*) são baseados em duas ideias principais (CHAVES, 2012):

- **CBCN, Colocação Baseada em Contador de Nó** - É atribuído um contador para cada nó na rede. Esse contador é incrementado conforme a heurística de colocação de regeneradores. No final de todo processo, os nós são ordenados em uma lista decrescente, de acordo com o valor recebido (CHAVES, 2012);
- **TW, *Transitional Weight*** - É uma métrica utilizada para descobrir os nós mais centralizados na rede. O intuito dessa ideia é testar todas as possíveis rotas e contabilizar o número de vezes em que o nó é utilizado como rota entre cada par origem-destino (CHAVES, 2012).

A política-NX é a mais utilizada para definir quais nós devem receber regeneradores e o número de regeneradores que devem ser adicionados em cada nó. A política-NX tem como entrada para iniciar o algoritmo de colocação de regeneradores a quantidade de nós translúcidos desejados (N) e a quantidade de regeneradores adicionados por nó (X). Essa política é usada em conjunto com CBCN, no qual são colocados X regeneradores em N nós com os maiores números armazenados em seus respectivos contadores (CHAVES, 2012).

Normalmente essas duas estratégias são utilizadas em conjunto pelos algoritmos de RP.

### 3.1.1.1. NDF, *Nodal Degree First*

Uma das estratégias de colocação de regeneradores que é baseado em CBCN é o NDF (*Nodal Degree First*), na qual, todos os nós da rede são classificados em uma lista decrescente de grau dos nós. O nó de mais alto grau é retirado da lista inicial e adicionado na lista de nós aos quais serão adicionados regeneradores, e o grau nodal de todos os vizinhos é reduzido de uma unidade. Assim, a lista original é reavaliada. Esse

processo ocorre até  $N$  nós serem escolhidos (NATH, 2014). São adicionados  $X$  regeneradores em cada nó. O NDF é um algoritmo baseado na política-NX para colocação de regeneradores (NATH, 2014). O pseudocódigo do NDF é mostrado no Figura 11. Esse algoritmo é utilizado neste trabalho para análise da proposta de RA.

**Figura 11** - Algoritmo NDF (*Nodal Degree First*)

---

**Algoritmo 1** *Nodal Degree First* (NDF).

---

- 1: Atribua a cada nó  $i$  um número  $R_i$  igual ao seu grau  $G(i)$ , em que  $N$  é o número total de nós na rede;
  - 2: **for**  $k = 1$  até  $N$  **do**
  - 3:   Selecione o nó  $j$  com o máximo  $R_j$ , e coloque  $X$  regeneradores no nó  $j$ . Se houver empate, escolha  $j$  de forma aleatória entre os nós empatados;
  - 4:   Remova o nó  $j$ , escolhido no passo anterior, e diminua de uma unidade os números  $R_i$  de todos os nós  $i$  conectados ao nó  $j$ .
  - 5: **end for**
- 

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

### 3.1.1.2. CNF, Centered Node First

No algoritmo CNF (*Centered Node First*), a colocação de regeneradores é feita organizando todos os nós em uma lista de ordem decrescente, conforme sua centralidade topológica (abordagem *Transitional Weight*). Essa centralidade é determinada para cada nó  $i$ , que é contabilizada pela quantidade de vezes em que o nó  $i$  é atravessado por um caminho mais curto ligando dois pares de nós quaisquer, todas as combinações de pares de nós são consideradas nesse processo. Após concluída a lista, são escolhidos  $N$  nós para receberem  $X$  regeneradores na rede (NATH, 2014). Esse algoritmo, como o NDF, também é utilizado neste trabalho para análise da proposta de RA.

**Figura 12** - Algoritmo CNF (Centered Node First)

---

**Algoritmo 2** *Centered Node First (CNF)*.

---

```
1:  $N \leftarrow$  Quantidade de nós translúcidos;  
2:  $X \leftarrow$  Quantidade de regeneradores por nó;  
3: for  $i = 0$  até  $N$  do  
4:   for  $j = 0$  até  $N$  do  
5:     if  $i \neq j$  then  
6:       Escolha o menor caminho  $\pi$  entre os nós  $i$  e  $j$ ;  
7:        $C_n \leftarrow C_n + 1$ . Para todos os nós  $n$  intermediários pertencentes ao caminho  $\pi$ .  
8:     else  
9:        $j \leftarrow j + 1$ ;  
10:    end if  
11:  end for  
12: end for  
13: Organize uma lista decrescente de acordo com o contador ( $C_n$ ) de cada do nó ;  
14: Em caso de empate escolha o nó aleatoriamente;  
15: Selecione os primeiros  $N$  nós como nós com capacidade de regeneração e coloque  $X$   
    regeneradores em cada um desses nós.
```

---

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

### 3.1.1.3. MU-RP, *Most Used Regenerator Placement*

Esse algoritmo tem por função a colocação de regeneradores mais usados (MU-RP, *Most Used Regenerator Placement*), analisando o tráfego da rede. Nesse algoritmo é utilizada a política-NX de colocação de regeneradores, ou seja, são adicionados  $X$  regeneradores em  $N$  nós na rede e são considerados as entradas do algoritmo (CHAVES, 2012).

O algoritmo funciona da seguinte forma: é criado um contador iniciado em zero para cada nó da rede, a capacidade de regeneração é considerada ilimitada e os parâmetros de requisições (e.g. 1e6 pedidos de conexão) na rede e carga (e.g. 100 erl) são preestabelecidos antes de iniciar o algoritmo de RP. Cada momento que o algoritmo de RA opta em utilizar um determinado nó  $i$  como ponto de regeneração, o contador do nó é acrescentado em uma unidade. Após o término do último pedido de conexão, os  $N$  nós com os maiores valores no contador recebem  $X$  regeneradores compartilhados (CHAVES, 2012). O pseudocódigo do algoritmo MU-RP é mostrado no Figura 13 (CHAVES, 2012).

**Figura 13** - Algoritmo MU-RP (*Most Used Regenerator Placement*)

---

**Algoritmo 3** *Most Used Regenerator Placement* (MU-RP).

---

```
1: Defina  $R_i \leftarrow 0$  para cada nó na rede;  
2: Inicie uma simulação offline (tráfego dinâmico);  
3: for cada solicitação de chamada do  
4:   Encontre uma rota. Execute o algoritmo RA;  
5:   if o algoritmo de RA decide regenerar o sinal no nó  $i$  then  
6:      $R_i \leftarrow R_i + 1$ ;  
7:   end if  
8: end for  
9: Coloque  $X$  regeneradores nos  $N$  nós que têm os maiores valores de  $R_i$ 
```

---

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

#### 3.1.1.4. MSU-RP, Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement

Este algoritmo é chamado de Colocação de Regeneradores Baseada no Máximo de Regeneradores Simultaneamente Utilizados (MSU-RP, *Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement*) (CHAVES, 2012), ele não utiliza a política-NX. É distribuída uma quantidade de regeneradores baseados na quantidade máxima de um determinado nó em uma simulação *offline* (CHAVES, 2012).

O parâmetro que define o número total de regeneradores na rede é  $R_e$ , ele é definido conforme a Equação (5)

$$R_e = N \cdot X \quad (4)$$

O algoritmo MSU-RP funciona de forma similar ao MU-RP, uma vez que  $N:X$  é o número total de regeneradores a serem distribuídos na rede por qualquer algoritmo que utilize a política-NX de RP, como por exemplo o MU-RP (CHAVES, 2012).

O MSU-RP define um contador  $R_i$  para cada nó da rede. O pseudocódigo desse RP é mostrado no Figura 14. Todos os contadores são iniciados com zero. A capacidade de regeneração é considerada ilimitada e os parâmetros de requisições (e.g.  $1e^6$  pedidos de conexão) na rede e carga

(e.g. 100 erl) são preestabelecidos antes de iniciar o algoritmo de RP. Cada vez que o algoritmo de RA opta em utilizar um determinado nó  $i$  como ponto de regeneração, o contador  $R_i$  do nó é atualizado de acordo com o contador  $r_i$ , número atual de regeneradores que está sendo utilizado nesse nó no momento que a conexão atual está sendo estabelecida (CHAVES, 2012).

Se o número atual de regeneradores  $r_i$  é maior que o número armazenado em  $R_i$ , logo  $R_i$  recebe  $r_i$ . Caso  $R_i$ , seja maior que  $r_i$ , o contador  $R_i$  não sofrerá alterações. Essa estratégia armazena em  $R_i$ , o maior número de regeneradores utilizado de forma simultânea em cada nó  $i$ . Com essa estratégia, é possível decidir que o algoritmo de RP considere o pior caso. Então, Re regeneradores (entrada do algoritmo MSU-RP) são distribuídos de forma proporcional entre os nós da rede, conforme o  $R_i$  de cada nó.  $N$  é o número total de nós na rede e a função  $ROUND(w)$  retorna o número inteiro mais próximo a  $w$  (CHAVES, 2012).

Após o término do último pedido de conexão, cada nó tem armazenado em seu  $R_i$  o caso com o pior uso de regeneradores. Então, os Re regeneradores dados como entrada para MSU-RP são proporcionalmente distribuídos entre os nós da rede de acordo com o  $R_i$  de cada nó.

**Figura 14** - Algoritmo MSU-RP (*Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement*)

---

**Algoritmo 4** *Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement* (MSU-RP).

---

- 1: Defina  $R_i \leftarrow 0$  para cada nó na rede;
  - 2: Inicie uma simulação offline (tráfego dinâmico);
  - 3: **for** cada solicitação de chamada **do**
  - 4:   Encontre uma rota. Executar o algoritmo RA;
  - 5:   **if** o algoritmo de RA decide regenerar o sinal no nó  $i$  **then**
  - 6:      $R_i \leftarrow \max(R_i, r_i)$ ; //  $\max(R_i, r_i)$  retorna o maior entre  $R_i$  e  $r_i$
  - 7:   **end if**
  - 8: **end for**
  - 9: Coloque  $ROUND(R_i / \sum_{i=1}^n R_i)$  regeneradores no nó  $i$
- 

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

### 3.1.1.5. SQP, *Signal Quality Prediction*

O SQP é um algoritmo de colocação de regeneradores baseado no tráfego da rede, ele usa as ideias de CBCN, TW e a política-NX. O seu pseudocódigo pode ser visto na Figura 15 (CHAVES, 2012). Pode-se observar no algoritmo que há o valor  $LN_{max}$ . Ele indica que o sinal óptico pode trafegar de forma transparente até no máximo  $LN_{max}$  enlaces sem sair do limiar da qualidade de transmissão (CHAVES, 2012).

**Figura 15** - Algoritmo SQP (*Signal Quality Prediction*)

---

**Algoritmo 5** *Signal Quality Prediction* (SQP).

---

- 1: Atribua a cada nó  $i$  um número  $C_i$ , inicializado com zero;
- 2: Execute um algoritmo de RWA predefinido para um número de pedidos de conexão gerados aleatoriamente e seguindo o padrão de tráfego previsto para a rede;
- 3: Para cada caminho óptico computado pelo RWA, faça o seguinte: Para o  $j$ -ésimo nó contando a partir da fonte para o destino, ao longo do caminho óptico, calcule o valor incremental:

$$I_j = \begin{cases} 1, & \text{Se } j \bmod LN_{max} = 0 \text{ ou } (j \pm 1) \bmod LN_{max} = 0; \\ 0, & \text{Caso contrário} \end{cases}$$

- 4: Ordene os nós em ordem decrescente de  $C_i$ ;
  - 5: Selecione os primeiros  $N$  nós como nós translúcidos e coloque  $X$  regeneradores em cada um dos  $N$  nós.
- 

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

### 3.1.1.6. MORP, *Multiobjective Optimization for Regenerator Placement*

De acordo com aos algoritmos de RP mostrados anteriormente, podemos concluir que um projeto de rede translúcida que considera regeneração esparsa, é um problema multiobjetivo (CHAVES, 2012). Devido ao fato de ser necessário reduzir o número de regeneradores, com isso reduzindo o CapEx, bem como devido à importância de se reduzir a probabilidade de bloqueio (BP, *Blocking Probability*) (CHAVES, 2012), surge uma questão, pois quando reduzimos a quantidade de regeneradores na rede, aumentamos a probabilidade de bloqueio e, de forma contrária,

quando aumentamos a quantidade de regeneradores na rede, diminuimos a probabilidade de bloqueio.

O MORP, propõe resolver o seguinte problema: dada uma topologia de rede já implantada, um RWA e um RA, o MORP terá que determinar quais nós terão a capacidade de regeneração compartilhada, com isso, reduzindo o custo de implantação de rede (CapEx) e conseqüentemente o de operação de rede (OpEx) (CHAVES, 2012). A Tabela 3.1 abaixo mostra o problema de otimização multiobjetivo para as redes translúcidas (CHAVES, 2012).

**Tabela 3** - Problema de otimização multiobjetivo para as redes translúcidas adaptado (CHAVES, 2012).

Dado	Topologia física; Matriz de tráfego dinâmica para a rede óptica a ser projetada; RWA e RA;
Minimize	O número total de regeneradores implantados na rede (MORP); A probabilidade de bloqueio total da rede (MORP);
Variáveis do Projeto	Número de regeneradores em cada nó da rede;
Restrições	QoT mínima aceitável para todos os caminhos ópticos; Número máximo de regeneradores em um determinado nó.

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

### 3.1.2. Algoritmos de RA

Conforme mostrado na Seção 3.1.1, o processo do algoritmo de RP acontece durante o planejamento de rede. Após resolvido esse problema de RP, em uma regeneração esparsa, surge um novo problema durante a operação da rede: como devem ser utilizados e liberados os regeneradores já distribuídos na rede pelo algoritmo de colocação de regeneradores. Como as requisições da rede vão ocorrendo de forma dinâmica, é necessário decidir, conforme a demanda, quando e em qual nó o sinal óptico deve ser regenerado. Esse problema é conhecido como atribuição de regeneradores ou alocação de regeneradores (RA) (CHAVES, 2012). Um algoritmo de RA eficiente usa o

menor número de regeneradores possível, dessa forma, deixa os ativos livres para atender futuras demandas de conexões (CHAVES, 2012).

No caso das EON's, o algoritmo de RA teria o melhor desempenho caso fosse abordado em conjunto com RSA. Contudo, a complexidade computacional fica bastante elevada para resolver os dois algoritmos (RSA e RA) em conjunto. O algoritmo de atribuição de regeneradores divide o caminho óptico em várias sub rotas de segmentos transparentes. Em uma rede EON, há três principais motivos pelos quais o uso de regenerador melhora o desempenho da rede. Sendo assim, o algoritmo de RA pode utilizar qualquer uma dessas estratégias para regeneração, são eles (CHAVES, 2012):

- **Regeneração motivada por QoT abaixo do limiar mínimo** - Ocorrerá quando o algoritmo de RSA encontrar um caminho óptico válido, mas a qualidade de transmissão desse caminho óptico não estiver dentro dos limites aceitáveis. Nesse caso, o algoritmo de atribuição de regeneradores verificará a falta de QoT e, conforme suas premissas preestabelecidas, decidirá em qual nó deve utilizada a regeneração;
- **Regeneração motivada por não contiguidade dos slots no espectro** – Ocorre quando o algoritmo de RSA encontra uma rota, porém nesta rota, não existe contiguidade dos slots no espectro. O algoritmo de RA verifica em qual nó pode realizar a conversão do espectro para não bloquear a chamada. Essa conversão é realizada quantas vezes for necessária ao longo do caminho óptico, conforme disponibilidade dos regeneradores.
- **Regeneração por compressão de espectro** - Ocorre quando o algoritmo de RA decide economizar fatias de espectro disponível na rede, utilizando diferentes formatos de modulação ao longo do caminho óptico.

Neste trabalho são propostas três novas estratégias para atribuição de regeneradores. As propostas desses algoritmos RA são mostradas na seção 3.2.

## 3.2. Proposta de RA

Neste trabalho, são propostos para estudo três algoritmos para executar atribuição de regeneradores para redes ópticas translúcidas. A proposta FNS-RA (*First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment*) utiliza o formato de modulação com a maior eficiência espectral, enquanto o FLR-RA (*First Longest Reach Regenerator Assignment*) tem como objetivo transmitir o sinal óptico mais distante possível utilizando o regenerador apenas em último caso.

O algoritmo FLR-RA tende a usar um número inferior de regeneradores, contudo, utiliza mais largura de banda que o FNS-RA. Por outro lado, o FNS-RA tende a utilizar uma quantidade maior de regeneradores, mas economiza largura de banda. Enquanto o exaustivo, tenta encontrar uma solução ótima em termos de menor utilização de número de regeneradores e slots na rede.

Após o controlador de admissão de chamadas (CAC) do plano de controle executar o algoritmo de roteamento para a solicitação atual, um dos três algoritmos de atribuição de regeneradores (RA) é solicitado dentro de uma rede óptica elástica translúcida. O algoritmo RA decide não só em quais nós os regeneradores devem ser utilizados, mas também decide qual o formato de modulação a ser aplicado e chama o algoritmo de atribuição de espectro (SA, *Spectrum Allocation*) para cada trecho transparente. Também foi assumido um cenário em que os pedidos de conexão exigem diferentes taxas de bits, que é uma entrada para ambas as heurísticas propostas. Deve-se observar que cada demanda pode solicitar diferentes taxas de transmissão. Nas próximas seções, serão discutidas melhor essas propostas de RA: FLR-RA, FNSRA e o algoritmo exaustivo.

### 3.2.1. FLR-RA, *First Longest Reach Regenerator Assignment*

Esse algoritmo busca reduzir a utilização da quantidade de regeneradores na rede, utilizando regeneradores ou para efetuar a conversão de espectro, quando não existem slots contíguos disponíveis na rede, ou por falta de qualidade de transmissão (QoT). Dada uma rota  $P$  com  $N$  nós,  $P = (n_0, n_1, \dots, n_x, \dots, n_N -$

1), e considerando a lista de formatos de modulações permitidos, estabelece o segmento mais longo transparente que atenda tanto OSNR quanto os critérios de disponibilidade e contiguidade de espectro do  $n_0$  nó de origem para um nó em  $n_x$  com capacidade de regeneração. Se existir um tal nó com capacidade de regeneração, o sinal é regenerado a  $n_0 - n_x$ , e torna-se o novo nó de origem e o processo reinicia até que o destino seja atingido. FLR-RA é apresentado no Figura 16.  $s$  é o nó origem. Existem duas funções usadas nesse algoritmo:  $isThereFreeRegenAt(n_x, b_r)$ , uma função booleana que retorna verdadeiro, se houver regeneradores livres no nó  $n_x$  para regenerar fluxos de taxa de bits (BR), e falso, caso contrário;  $isThereSpectrumAndOSNR(n_s, n_x)$ , uma função booleana que retorna verdadeiro se houver pelo menos um formato de modulação capaz de ser atribuído ao segmento transparente entre nós  $n_s$  e  $n_x$ , tanto em termos de OSNR e espectro disponível, e falso caso contrário.

**Figura 16** - Algoritmo FLR-RA

---

**Algoritmo 9** *First Longest Reach Regenerator Assignment (FLR-RA).*

---

```

1: Entrada: Taxa de bit (BR);
2: Entrada: Rota  $P = (n_0, n_1, n_x, \dots, n_{N-1})$ , em que  $n_{N-1} = destino$ ;
3:  $r \leftarrow 0$ ; (ponto de possível regeneração)
4: for  $s$  de 0 até  $N - 1$  ( $s$  é o nó origem) do
5:   for  $x$  de  $s + 1$  até  $N - 1$  ( $x$  é o índice do nó. É iniciado o nó de origem ( $s$ ) + 1 para
   ir para o nó  $n_x$ ) do
6:   if ( $isThereFreeRegenAt(n_x, BR)$  ou ( $n_x = destino$ )) (verifica se tem regeneradores
   disponíveis para um determinada taxa de bit (BR)) then
7:     if ( $isThereSpectrumAndOSNR(n_s, n_x)$ ) (Verifica se tem algum formato de mo-
   dulação capaz de atribuído um determinado segmento transparente ( $n_s, n_x$ ))
     then
8:       if ( $n_x = destino$ ) then
9:         Atribuir o formato de modulação com o maior eficiência espectral possível
         em todos os segmentos transparentes armazenados (STA);
10:        Execute a atribuição do espectro em todos os STA;
11:        Estabeleça todos STA;
12:        Finalize o algoritmo.
13:       else
14:          $r \leftarrow x$  (atualiza o nó de possível regeneração)
15:       end if
16:     else
17:       if  $r \neq x$  then
18:         Armazene o segmento transparente de  $n_s$  até  $n_r$ ;
19:          $s \leftarrow r$ ;
20:          $x \leftarrow r$ ;
21:       else
22:         Requisição atual bloqueada.
23:       end if
24:     end if
25:   end if
26: end for
27: end for

```

---

### 3.2.2. FNS-RA, First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment

Essa proposta busca usar o formato de modulação de melhor eficiência espectral em todos os segmentos do caminho óptico, reduzindo assim o total de número de slots necessário para estabelecer a conexão. Dada uma rota  $P = (n_0, n_1, \dots, n_x, \dots, n_N - 1)$ , o algoritmo começa considerando o melhor formato de modulação com índice  $m = 1$ . Em seguida, ele procura o segmento mais longo transparente que atenda tanto  $OSNR$ , quanto aos critérios de disponibilidade de espectro para este formato de modulação. Se não houver nenhuma solução para o melhor formato de modulação ( $m = 1$ ), o algoritmo repete o processo e tenta encontrar, sequencialmente, o segmento mais curto transparente para  $m = 1, 2, 3, \dots$  se um segmento transparente for encontrado, o sinal é regenerado e o processo é repetido até que o nó de destino seja atingido.

FNS-RA é apresentado no Algoritmo 10. Existem duas funções usadas nesse algoritmo:  $isThereFreeRegenAt(n_x, b_r)$ , uma função booleana que retorna verdadeiro se houver regeneradores livres no nó  $n_x$  para regenerar fluxos de taxa de bits ( $BR$ ), e falso, caso contrário (a mesma função citada no FLR-RA);  $isThereSpectrumAndOSNR(n_s, n_x, m)$ , uma função booleana que retorna verdadeiro para o melhor formato de modulação que seja capaz de ser atribuído ao segmento transparente entre nós  $n_s$  e  $n_x$ , tanto em termos de  $OSNR$  e espectro disponível, e falso, caso contrário.

Figura 17 – Algoritmo FNS-RA

---

**Algoritmo 10** *First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment (FNS-RA).*

---

```

1: Entrada: Taxa de bit (BR);
2: Entrada: Rota  $(n_0, n_1, n_x, \dots, n_{N-1})$ , em que  $n_{N-1} = destino$ ;
3:  $r \leftarrow 0$ ;
4:  $m \leftarrow 1$ ;
5: for  $s \leftarrow 0$  até  $N - 1$  do
6:   for  $x \leftarrow s + 1$  até  $N - 1$  do
7:     if (isThereFreeRegenAt( $n_x, BR$ ) ou ( $n_x = destino$ )) then
8:       if (isThereSpectrumAndOSNR( $n_s, n_x, m$ )) then
9:         if ( $n_x = destino$ ) then
10:          Atribua o formato de modulação com o maior eficiência espectral possível
11:          em todos os segmentos transparentes armazenados (STA);
12:          Execute a atribuição do espectro em todos os STA;
13:          Estabeleça todos STA;
14:          Finalize o algoritmo.
15:        else
16:          if ( $M \neq 1$ ) then
17:            STA de  $n_s$  para  $n_r$ .
18:             $r \leftarrow x$ ;
19:             $s \leftarrow x$ ;
20:             $m \leftarrow 1$ ;
21:          else
22:             $r \leftarrow x$ ;
23:          end if
24:        end if
25:      else
26:        if  $r \neq x$  then
27:          Armazene o segmento transparente de  $n_s$  até  $n_r$ ;
28:           $s \leftarrow r$ ;
29:           $x \leftarrow r$ ;
30:        else
31:           $x \leftarrow x - 1$ ;
32:           $m \leftarrow m + 1$ ;
33:          if ( $m > M$ ) then
34:            Requisição atual bloqueada;
35:          end if
36:        end if
37:      end if
38:    end for
39:  end for

```

---

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.3. Algoritmo Exaustivo

A ideia desse algoritmo é se encontrar a solução ótima para o problema de RA em uma rota. Há dois aspectos a discutir com respeito a essa otimalidade em uma rede elástica. Primeiro, a solução ótima deve minimizar simultaneamente o número de regeneradores e o número de slots usados na solução. Isso porque soluções que usam mais regeneradores podem usar menos slots e vice-versa. Esses dois números afetam de forma significativa a probabilidade de bloqueio, que

é o que se quer otimizar com um RA eficiente. Segundo, é importante notar que o problema de RA em uma rota pode ter várias soluções ótimas, por exemplo: em uma rota de 10 hops que necessita de exatamente uma regeneração, pode ser possível regenerar o sinal no quarto, no quinto ou no sexto nó da rota, pois todas as soluções poderiam apresentar o mesmo número de regeneradores e o mesmo número de slots, atendendo todas elas aos critérios de qualidade de sinal e contiguidade de slots.

Essa proposta faz uma varredura de todas as possíveis soluções para o RA em uma rota. Dada a rota  $P$  com  $N$  nós  $P = (n_0, n_1, \dots, n_x, \dots, n_{N-1})$ , o algoritmo analisa todas as possíveis soluções com regeneração entre os nós  $n_0$  e  $n_{N-1}$ , considerando a lista de formato de modulação permitidos. No total, são verificadas  $2^{N-2}$  soluções. Apenas as possíveis soluções que atendem aos critérios  $OSNR$ , disponibilidade de slots e disponibilidade de regeneradores no momento da requisição são armazenadas como solução candidatas  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_x; \dots; s_f$ . Para cada solução  $s_x$ , são calculadas e armazenadas a quantidade de slots (slots) e de regeneradores utilizados (REG). Logo, é aplicada a relação de dominância entre as soluções candidatas. Podemos dizer que uma solução  $S_1$  domina uma solução  $S_2$  se,  $s_1(REG) \geq s_2(REG)$  e  $s_1(slots) > s_2(slots)$  ou  $s_1(slots) \geq s_2(slots)$  e  $s_1(REG) > s_2(REG)$ . Todas as soluções não-dominadas formam o pareto-ótimo. O sub-conjunto de soluções do pareto que usa o menor número de slots é formado para o exaustivo do FNS-RA, enquanto o subconjunto que usa o menor número de regeneradores é formado para o exaustivo do FLR-RA. A primeira solução de cada lista é escolhida e estabelecida, respectivamente para cada algoritmo.

O exaustivo é apresentado no Figura 18. Existem duas funções usadas nesse algoritmo:  $isThereFreeRegenAt(n_x, b_r)$ , uma função booleana que retorna verdadeiro, se houver regeneradores livres no nó  $n_x$  para regenerar fluxos de taxa de bits ( $BR$ ), e falso, caso contrário;  $isThereSpectrumAndOSNR(n_s, n_x)$ , uma função booleana que retorna verdadeiro, se houver pelo menos um formato de modulação capaz de ser atribuída ao segmento transparente entre nós  $n_s$  e  $n_x$ , tanto em termos de  $OSNR$  e espectro disponível, e falso caso contrário.

Figura 18 - Algoritmo Exaustivo

---

**Algoritmo 11** Exaustivo.

---

```
1: Entrada: Taxa de bit (BR);
2: Entrada: Rota  $P = n_0, n_1, \dots, n_x, \dots, n_{N-1}, n_N$ , em que  $n_N = destino$  e  $N$  é quantidade de nós da rota;
3:  $S = 2^{N-2}$  (Quantidade de soluções possíveis);
4: for  $i \leftarrow 0$  até  $S$  do
5:   if (isThereFreeRegenAt( $n_x, br$ ) ou ( $n_x = destino$ )) then
6:     if (isThereSpectrumAndOSNR( $n_s, n_x$ )) then
7:       Armazene a solução em  $s_i$  com número de regeneradores e slots que serão utilizados para essa solução.
8:     else
9:       Solução  $s_i$  bloqueada.
10:    end if
11:  else
12:    Solução  $s_i$  bloqueada.
13:  end if
14: end for
15: for  $i \leftarrow 0$  até  $S$  do
16:   Faça a relação de dominância entre as soluções do conjunto  $S$ ;
17: end for
18: if (Exaustivo do FLR-RA = TRUE) then
19:   Organize as soluções do Pareto em ordem crescente em relação ao número de regeneradores utilizados para cada solução; (Retorne o exaustivo do FLR-RA).
20: else
21:   Organize as soluções do Pareto em ordem crescente em relação ao número de slots utilizados para cada solução; (Retorne o exaustivo do FNS-RA).
22: end if
23: Escolha a primeira opção da lista;
24: Finalize o algoritmo.
```

---

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

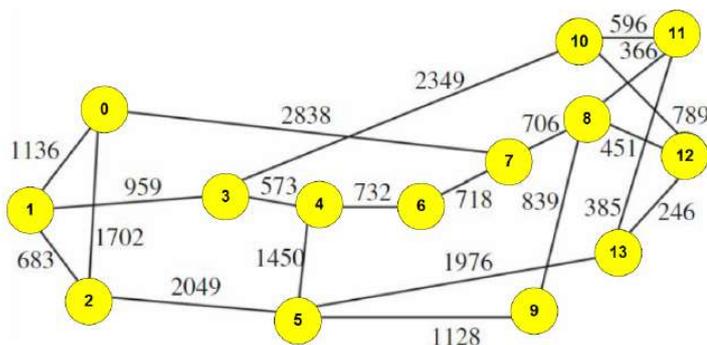
## 4. Resultados

Este capítulo tem como objetivo avaliar o desempenho dos algoritmos de atribuição de regeneradores propostos, FLR-RA, FNS-RA e o exaustivo. Na Seção 4.1 são apresentadas as topologias de rede utilizadas nas simulações e as características das simulações e os parâmetros utilizados. Na Seção 4.2 são apresentados os resultados do FLR-RA, FNSRA e exaustivo sem algoritmo de RP para a topologia 1 em relação à probabilidade de bloqueio, média de utilização de regeneradores, média de uso de slots e média de tempo durante a simulação. Na Seção 4.3, são mostrados os resultados do FLR-RA e FNSRA para a Topologia 2, com análise da probabilidade de bloqueio, média de utilização de regeneradores, média de uso de slots e média de tempo em relação à distribuição de regeneradores e slots na rede. Nas Seções 4.4 e 4.5, é realizada uma comparação de desempenho entre os algoritmos de RP: CNF e NDF.

### 4.1. Arranjo Experimental

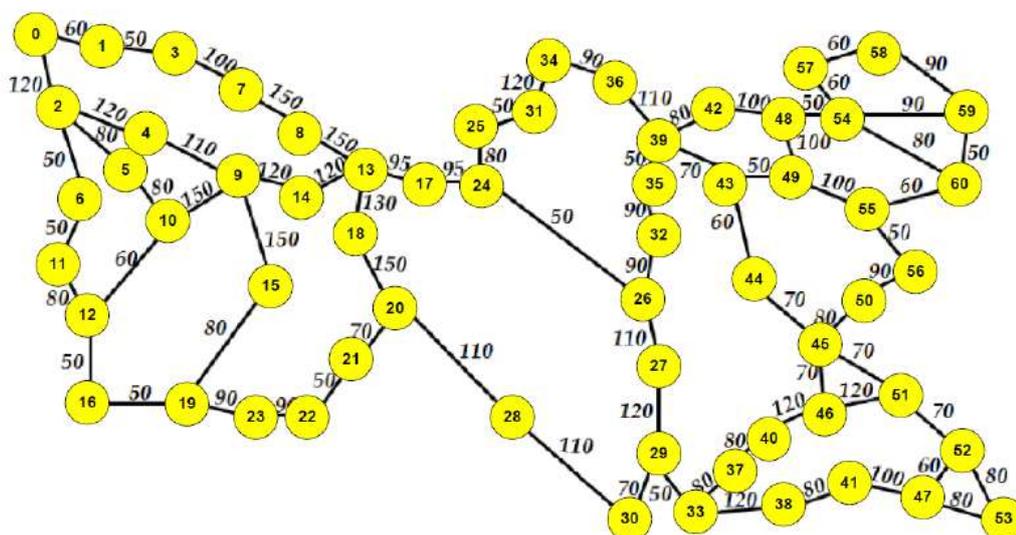
Nas simulações foram utilizadas duas topologias de rede: A Topologia 1 (NSFnet), composta por 14 nós e 42 links, e a Topologia 2 (*American Topology*), composta por 61 nós e 152 links, mostradas nas Figuras 11 e 12, respectivamente. As distâncias entre os nós estão mostradas nas figuras para cada rede, em quilômetros. Os nós da rede são interligados por um par de fibras ópticas.

**Figura 19** - Topologia 1 - NSFnet. Tamanho dos links em quilômetros (ADHYA & DATTA, 2012)



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 20** - Topologia 2 - *American Topology*. Tamanho dos links em quilômetros (CHAVES, 2012)



**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Para cada simulação realizada, foi gerado um conjunto de 1.000.000 de requisições. Durante o processo de chamada, os pedidos de conexões (requisições ou chamadas) na rede são realizados de forma dinâmica, sendo este processo de geração de chamadas um processo estocástico (processo de Poisson) e o tempo de chamada segue uma distribuição exponencial. As simulações foram realizadas com uma carga variável e fixa (100 *erlangs*).

Para cada pedido de conexão na rede, dois nós são escolhidos de forma aleatória, seguindo uma distribuição uniforme. Todos os nós da rede têm a mesma probabilidade de serem escolhidos. Cada solicitação de chamada é estabelecida por meio de um caminho óptico unidirecional. No algoritmo de RSA, foi utilizado o caminho mais curto para definir o caminho óptico e a política de *First Fit* para alocação de espectro. A taxa de bits de transmissão de cada chamada é escolhida aleatoriamente entre os 100, 200 ou 400 Gb/s. Consideramos que os regeneradores 3R são capazes de executar tanto a conversão do espectro, quanto a conversão de formato de modulação. Cada nó é equipado com grupo de R regeneradores virtuais compartilhados (JINNO *et al.*, 2013). As requisições podem utilizar os regeneradores de um nó em questão, até que esse nó não tenha mais regeneradores disponíveis, devido à utilização para outras conexões. Cada regenerador tem uma capacidade de

regenerar uma taxa de transmissão específica. É possível combinar vários regeneradores, a fim de regenerar fluxos de taxa de transmissão mais elevada. Por exemplo, se um regenerador pode regenerar um fluxo de 100 Gb/s, uma conexão de 100 Gb/s para ser regenerada requer a utilização de um regenerador, enquanto uma demanda de 400 Gb/s requer o uso de 4 regeneradores (JINNO *et al.*, 2013). Cada link é composto por vários lances ópticos com amplificadores EDFA (*Erbium-Doped Fiber amplifier*) de aproximadamente 80km de distância entre os amplificadores. O ganho do EDFA compensa as perdas.

A figura de ruído do EDFA é de 5dB. Os ruídos do EDFA ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) e do transmissor SSE (*Source Spontaneous Emission*) degradam o sinal transmitido na rede. A potência do sinal no transmissor é de 0 dBm. Três formatos de modulação foram considerados: 4 QAM, 8 QAM e 16 QAM. Cada link de rede é considerado com 120, 160 ou 200 slots disponíveis para a Topologia 1 (Figura 4.1) e 160, 200 e 240 slots disponíveis para a Topologia 2 (Figura 21) os slots foram considerados de 12,5 GHz. Todas as simulações foram realizadas num computador com um processador Intel i5 (2.6 GHz) com 8 GB de RAM.

Algumas métricas foram utilizadas para avaliação de desempenho: probabilidade de bloqueio, média de regeneradores utilizados, média de slots utilizados, média de tempo da simulação.

A probabilidade de bloqueio é a probabilidade de requisições que foram bloqueadas na rede.

$$PB = \frac{ReqBloq}{TotalReq} \quad (6)$$

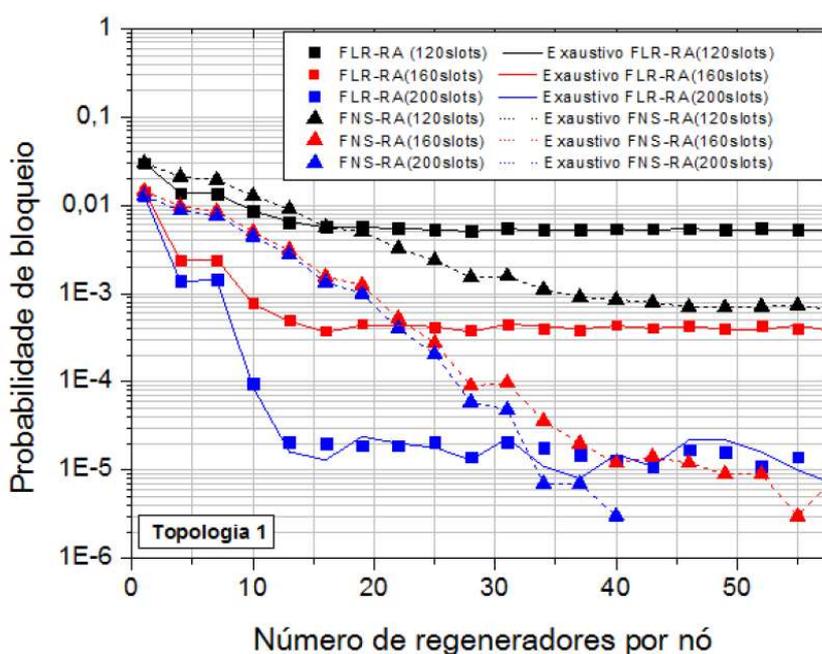
Ela é calculada por meio da razão entre o número de requisições bloqueadas pela quantidade total de requisições solicitadas na rede, conforme mostra a Equação (6).

## 4.2. Resultados do FLR-RA, FNS-RA e exaustivo sem utilização de algoritmo de RP - Topologia 1

A Figura 21 mostra a probabilidade de bloqueio por número de regeneradores por nó translúcido para a Topologia 1 (Figura 19). Três algoritmos de atribuição de regeneradores foram utilizados: FLR-RA, FNS-RA e o exaustivo. Três quantidades de slots diferentes: 120, 160 e 200 e a carga utilizada é de 100 erlangs. Não foi utilizado nenhum algoritmo de RP para esses resultados, ou seja, todos os nós são translúcidos, pois a intenção é analisar primeiramente o algoritmo de RA proposto.

A Figura 21 mostra a probabilidade de bloqueio dos algoritmos de RA. Pode-se observar que a probabilidade de bloqueio diminui com aumento dos regeneradores na rede. Na comparação dos casos com a mesma quantidade de slots (comparação entre as curvas da mesma cor), é verificada uma inversão de desempenho (probabilidade de bloqueio) entre as heurísticas, e quanto menos slots disponíveis na rede, menor é a quantidade de regeneradores para o ponto de inversão. Percebe-se ainda que as probabilidades de bloqueio encontradas pelo exaustivo e pelas heurísticas são semelhantes.

**Figura 21** – Probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores por nó para três técnicas de atribuição de regeneradores - FLR-RA, FNS-RA e exaustivo – três quantidades de slots diferentes: 120, 160 e 200 e carga de 100 erlangs.



Fonte: Elaborada pelo autor.

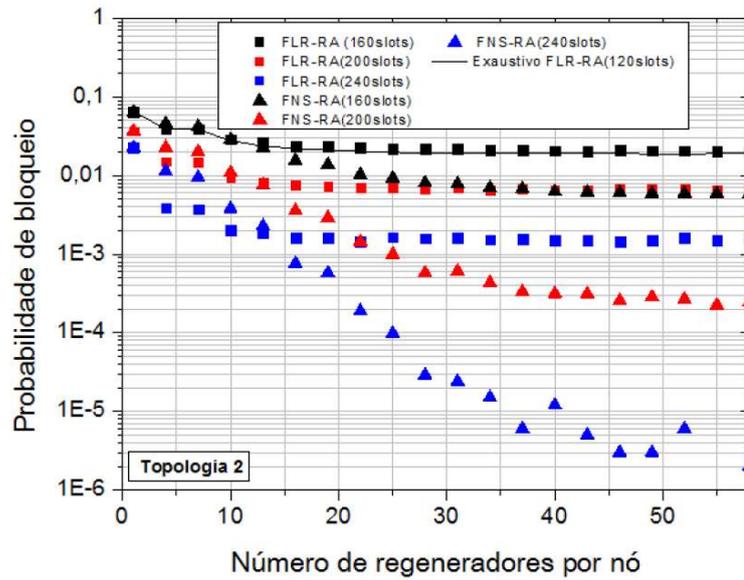
### **4.3. Resultados do FLR-RA e FNS-RA sem utilização de algoritmo de RP - Topologia 2**

As Figuras 22 mostra a probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores em todos os nós da Topologia 2 (Figura 20). Dois algoritmos de atribuição de regeneradores foram utilizados: FLR-RA e FNS-RA, três quantidades de slots diferentes: 160, 200 e 240 com a carga de 100 erlangs. Os regeneradores são distribuídos por nó translúcido, nesse caso, todos os nós são translúcidos. Não foi utilizado nenhum algoritmo de RP para esses resultados, pois a intenção é analisar primeiramente o algoritmo de RA proposto.

A Figura 22 mostra as probabilidades de bloqueio das heurísticas de RA. São mostrados resultados do exaustivo do FLR-RA com 160 slots (linha preta) e mostram resultados semelhantes ao heurístico (quadrado preto). Não foi possível simular os demais resultados do exaustivo, devido ao elevado tempo de simulação dessas curvas, porém espera-se que o exaustivo e as heurísticas apresentam resultados semelhantes, conforme mostrado na topologia 1.

Pode-se observar que a probabilidade de bloqueio sempre diminui com aumento de regeneradores na rede. Na comparação dos casos com a mesma quantidade de slots disponíveis para uso na rede (comparação entre as curvas da mesma cor), é verificada uma inversão de desempenho (probabilidade de bloqueio) entre as heurísticas com 200 e 240 slots disponíveis (curvas vermelha e azul), essa inversão para estas curvas acontecem praticamente no mesmo ponto. Essa inversão não é verificada quando disponível 160 slots na rede (curva preta).

**Figura 22-** Probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores por nó, para duas técnicas de atribuição de regeneradores: FLR-RA e FNS-RA, três quantidades de slots diferentes: 160, 200 e 240 e carga de 100 erlangs.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5. Conclusão

Nesta dissertação, foram propostos três algoritmos para resolver o problema de atribuição de regeneradores (RA) em redes ópticas elásticas: FLR-RA, FNS-RA e exaustivo.

O algoritmo FLR-RA procura economizar o uso de regeneradores na rede. Em cada rota, o algoritmo tenta ir o mais distante possível de forma transparente e, quando não é possível, retorna ao nó anterior, ao que não tem QoT suficiente e regenera o sinal. O FNS-RA procura economizar banda, porém utiliza um número bem maior de regeneradores, se comparado ao FLR-RA. O exaustivo encontra as soluções ótimas para o RA quando se consideram ao mesmo tempo menor número de regeneradores e menor número de slots usados para se estabelecer uma conexão.

Os algoritmos foram testados em duas topologias de rede sem RP e com dois algoritmos de colocação de regeneradores. Pelos resultados obtidos nas simulações, percebe-se que a melhor política para atribuição de regeneradores é fortemente dependente da infraestrutura da rede, i.e., número de slots disponíveis nos enlaces, número de regeneradores disponíveis por nó e da carga a qual a rede é submetida.

Esses três fatores em conjunto determinam a melhor política de RA a ser usada na rede. O FNS-RA tende a obter menores probabilidades de bloqueio nas situações de carga alta e número de slots reduzido, enquanto o FLR-RA tende a obter menores probabilidades de bloqueio em situações nas quais há poucos regeneradores instalados.

### 5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Alguns temas podem ser discutidos como continuação deste trabalho. Abaixo seguem algumas sugestões:

- Propor um novo algoritmo de RA para comparar com o FLR-RA e FNSRA - Como foi observado, um algoritmo de atribuição de regeneradores mais eficiente, ou seja, que consiga poupar o máximo de regeneradores deixando

livres para demandas futuras, reduzindo a probabilidade de bloqueio é de extrema importância. Uma sugestão é desenvolver novas políticas que possam otimizar o FLR-RA e FNS-RA.

- Propor um novo algoritmo de RP e simular as heurísticas aqui discutidas - neste trabalho, foram implementados novos algoritmos de RA, porém, o algoritmo de RP utilizado foi o NDF e CNF já proposto em outros trabalhos. Assim, a ideia é propor um novo algoritmo de colocação de regeneradores que trabalhe de forma mais eficiente com os algoritmos de RA propostos nesse trabalho.
- **Comparar custos de processamento e economia de slots com outras heurísticas publicadas em revistas, artigos científicos, dissertações e teses.**

## 6. Referências Bibliográficas

- ABEDIFAR, V.; SHAHKOOR, S. A.; EMAMI, A.; POURESLAMI, A. and AYOUGH, S. A. **Design and simulation of a ROADM-based DWDM network**, 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2013, pp. 3–6, 2013.
- ADHYA, A. and DATTA, D. **Lightpath Topology Design for Wavelength-Routed Optical Networks in the Presence of Four-Wave Mixing**, Journal of Optical Communications and Networking, vol. 4, no. 4, p. 314, 2012.
- BORZYCKI, K. **Labeling of Signals in Transparent Optical Networks**, ICTON 2003, pp. 4–7, 2003.
- CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N. and OKI, E. **Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial**, vol. 17, no. 3, pp. 1776–1800, 2015.
- CHAVES, D. a. R.; CARVALHO, R. V. B. PEREIRA, H. A. BASTOS-FILHO, C. J. A. and MARTINS-FILHO, J. F. **Novel strategies for sparse regenerator placement in translucent optical networks**, Photonic Network Communications, vol. 24, no. 3, pp. 237–251, 2012.
- CHAVES, D. A. R.; SILVA, E. F. BASTOS-FILHO, C. J. A. and PEREIRA, H. A. **Heuristic algorithms for regenerator assignment in dynamic translucent elastic optical networks**, Icton, 2015.
- CHAVES, D. **Projeto de redes ópticas de alta capacidade utilizando técnicas de otimização bioinspiradas**, Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2012.
- DALLAGLIO, M.; GIORGETTI, A.; SAMBO, N.; VELASCO, L. and CASTOLDI, P. **Routing, Spectrum, and Transponder Assignment in Elastic Optical Networks**, Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 22, pp. 4648–4658, 2015.
- EL-HOWAYEK, G. ZHANG, C. LI, Y. NG, J. S. DAVID, J. P. R. and HAYAT, M. M. **On the Use of Gaussian Approximation in Analyzing the Performance of Optical Receivers**, IEEE Photonics Journal, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 2014.
- ESSIAMBRE, R. J.; FOSCHINI, G. J.; WINZER, P. J.; KRAMER, G. and BURROWS, E. C. **The capacity of fiber-optic communication systems**, OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, pp. 2–4, 2008.
- FATH, T.; HELLER, C. and HAAS, H. **Power Level Stepping**, vol. 31, no. 11, pp. 1734–1743, 2013.
- FONTINELE, A.; SANTOS, I.; DURAES, G. M.; MARANHÃO, J. and SOARES, A. **Preventive Assignment of Regenerator in Translucent Optical Networks**, 2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems, pp. 353–360, 2014.
- GEISLER, D. J.; FONTAINE, N. K.; SCOTT, R. P.; HE, T.; PARASCHIS, L.; GERSTEL, O.; HERITAGE, J. P. and YOO, S. J. B. **Bandwidth scalable, coherent transmitter based on the parallel synthesis of multiple spectral slices using optical arbitrary waveform generation**. Optics express, vol. 19, no. 9, 2011.
- HUANG, I. and LI, B. **A Genetic Algorithm Using Priority-Based Encoding for Routing and Spectrum Assignment in Elastic Optical Network**, 2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, pp. 5–11, 2014.
- JINNO, M. and HIDEHIKO, T. **Elastic Optical Transponder and Regenerator: Toward Energy and Spectrum Efficient Optical Transport Networks**, 2012 International Conference on Photonics in Switching (PS), 2012.

- JINNO, M. TAKARA, H. YONENAGA, K. and HIRANO, A. **Virtualization in Optical Networks from Network Level to Hardware Level [Invited]**, vol. 5, no. 10, pp. 46–56, 2013.
- KELLER, G.; TIGHE, M.; LUTFIYYA, H. and BAUER, M. **An analysis of first fit heuristics for the virtual machine relocation problem**, Network and service management (cnsm), 2012 8th international conference and 2012 workshop on systems virtualization management (svm), pp. 406–413, 2012.
- LÓPEZ, V.; CRUZ, B. D.; DIOS, Ó. G. D.; GERSTEL, O.; AMAYA, N.; ZERVAS, G.; SIMEONIDOU, D. and FERNANDEZ-PALACIOS, J. P. **Finding the Target Cost for Sliceable Bandwidth Variable Transponders**, J. OPT. COMMUN. NETW./VOL. 6, NO. 5, vol. 6, no. 5, pp. 476–485, 2014.
- MARIA, L. D. and CENNAMO, N. **Optical chemical sensor for oil-filled power transformer Nunzio**. Photonics Technologies, 2014 Fotonica AEIT Italian Conference, vol. 12, pp. 1–3, 2014.
- MIRANDA, B.; de la CRUZ GONZALEZ de DIOS, O.; LOPEZ, V. and FERNÁNDEZ-PALACIOS, J.-P. **OpEx savings by reduction of stock of spare parts with Sliceable Bandwidth Variable Transponders**, Optical Fiber Communication Conference, p. W3A.5, 2014.
- MUKHERJEE, B. Optical WDM Networks, ser. **Optical Networks**. Springer, 2006.
- NAGATA, Y.; ASATANI, K. and Otsuka, H. **A New Load-Balancing Method Applying Link-Cost Adjustment Based on Betweenness Centrality in WDM Networks**, no. 1, pp. 59–60, 2014.
- NATH, I. **A Survey on Regenerator Placement Problem in Translucent Optical Network**, International Conference on Circuits, System, Communication and Information Technology Applications, pp. 408–413, 2014.
- PELOUCH, W.; PEDRO, H. D.; FEVRIER, H. CLESCA, B. and PERRIER, P. **Raman Amplification: an Enabling Technology for High-Capacity, Long-Haul Transmission History of Raman What is Raman Amplification** pp. 1–30, 2015.
- RAHMAN, Q.; BANDYOPADHYAY, S. and ANEJA, Y. **Optimal regenerator placement in translucent optical networks**, Optical Switching and Networking, vol. 15, pp. 134–147, 2015.
- ROCCATO, D.; QUAGLIOTTI, M.; SCHIANO, M.; ITALIA, T.; REISS, V. G. and TORINO, R. **Economic viability of high bit rate and high spectral efficiency transponders**, ONDM 2014: The 18th International Conference on Optical Network Design and Modelin, pp. 19–22, 2014.
- RUMLEY, S.; CALHOUN, D. M.; RODRIGUES, A.; HAMMOND, S. and BERGMAN, K. **Toward Transparent Optical Networking in Exascale Computers**, Columbia University, pp. 1–3, 2015.
- TURKCU, O. and SUBRAMANIAM, S. **Optimal Wavebanding in WDM Ring Networks**, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 22, no. 1, pp. 179–190, 2014.
- WAY, W. I. **Next Generation ROADM Architectures**, Asia Communications and Photonics Conference, p. AS1G.3, 2012.
- XIA, M. **Elastic Optical Networking and Routing and Spectrum Assignment**, Photonics Conference (IPC), vol. 1, pp. 84–85, 2014.
- YOSHIKI, A. K.-i. I. S. **Transmission, Optical Using, Systems Amplifiers, Er-doped Fiber Optical, Containing**, IEEE TRANSACTIONS PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 3, NO. 11, vol. 3, no. 11, pp. 1001–1003, 1991.
- ZHANG, Y.; TAIRA, K.; TAKAGI, H. and DAS, S. K. **An Efficient Heuristic for Routing and Wavelength Assignment in Optical WDM Networks**, IEEE ICC, pp. 2734–2739, 2002.