



Universidade Federal do Piauí  
Centro de Ciências da Natureza  
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

# **Alocação de Regeneradores com Tonificação de Circuitos Para Redes Ópticas Elásticas**

**Ítalo Barbosa Brasileiro**

**Teresina-PI, Maio de 2017**



Ítalo Barbosa Brasileiro

# **Alocação de Regeneradores com Tonificação de Circuitos Para Redes Ópticas Elásticas**

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Redes de Computadores), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: André Castelo Branco Soares

Coorientador: José Valdemir dos Reis Júnior

Teresina-PI

Maio de 2017

*Aos meus pais Dayene e Herden,  
por todo o trabalho e esforço para que esse objetivo pudesse se concretizar.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por Seu imenso cuidado e amor, por sempre iluminar meus passos, me proteger e manter cercado de pessoas de bem. Agradeço aos meus pais, pela educação e criação, por todas as lutas enfrentadas para que eu e meus irmãos tivéssemos boas oportunidades. Agradeço aos meus irmãos e primos, fiéis companheiros nessa jornada, sempre dispostos a ajudar em qualquer situação. Agradeço às minhas tias, pelo companheirismo e por lições tão importantes para a conclusão dessa etapa. Agradeço aos meus amigos, que sempre me acompanharam e prestaram palavras de amparo nos momentos difíceis. Agradeço aos meus dois orientadores, pessoas de grande competência e sabedoria, exemplos de conduta profissional e pessoal que me inspiram. Agradeço aos professores do Departamento de Computação, que tiveram papel importante para a minha formação acadêmica e profissional. Agradeço à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI), que motiva fortemente o desenvolvimento da pesquisa no Estado.



*“ - Histórias são criaturas selvagens - afirmou o monstro.  
- Quando você as solta, quem sabe o que podem causar? ”  
(Patrick Ness)*



# Resumo

As redes ópticas elásticas surgem como fortes candidatas para suprir a crescente demanda de tráfego, problema acarretado pela popularização dos dispositivos móveis e crescimento de aplicações com tráfego de grande volume de dados. Entretanto, alguns problemas precisam ser solucionados, a fim de obter maior aproveitamento dos recursos das redes ópticas elásticas. Problemas como roteamento, escolha de modulação, alocação de espectro, fragmentação, e imperfeições de camada física são alvos de estudo para pesquisadores da área. O principal objetivo deste trabalho é a proposta de um algoritmo para reduzir o impacto dos efeitos de degradação do sinal óptico nos circuitos da rede. O algoritmo de Alocação de Regeneradores com Tonificação de Circuitos (ARTO) seleciona os regeneradores a serem utilizados, e adapta o formato de modulação aplicado ao circuito a fim de fortalecer o circuito e reduzir interferências de futuros novos circuitos na rede. Simulações foram realizadas, e o algoritmo ARTO foi comparado com os algoritmos de alocação de regeneradores FLR e FNS, em duas topologias diferentes (EON e NSFNet). O ARTO obtém melhor resultado sobre o FLR (concorrente de melhor desempenho) com ganho de probabilidade de bloqueio entre 32,88% e 18,58% para a topologia NSFNet e entre 31,16% e 15,56% para a topologia EON. O estudo realizado neste trabalho permite observar que a aplicação do ARTO para cenários de regeneração nas redes ópticas elásticas potencializa o atendimento de requisições de circuitos, garantindo maior aproveitamento dos recursos da rede.

**Palavras-chaves:** Custo-benefício, redes ópticas elásticas, regeneradores, simulação.



# Abstract

Elastic optical networks appear as strong candidates to support the growing traffic demand, a problem caused by the popularization of mobile devices and the growth of applications with high volume data traffic. However, some problems need to be addressed in order to optimize the use of elastic optical networks. Problems such as routing, modulation selection, spectrum allocation, fragmentation, and physical layer imperfections are the targets of study for researchers. The main objective of this work is the proposal of an algorithm to reduce the impact of optical signal degradation effects on network circuits. The Regenerators Allocation with Circuit Tonification (ARTO) algorithm selects the regenerators to be allocated, and adapts the modulation format applied to the circuit in order to strengthen the circuit and reduce interferences of future new circuits in the network. Simulations were performed, and the ARTO algorithm was compared with FLR and FNS regenerator allocation algorithms in two different topologies (EON and NFSNet). ARTO obtained better result upon the FLR (best performance competitor) with gain of blocking probability between 32.88% and 18.58% for The NSFNet topology and between 31.16% and 15.56% for the EON topology. The study shows that the application of the ARTO to regeneration scenarios in the elastic networks enhances the establish of circuit requests, guaranteeing greater use of network resources.

**Keywords:** cost-benefit, elastic optical networks regenerators, simulation.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação de uma fibra óptica e seus slots (a) livres e (b) ocupados.	5
Figura 2 – Representação de uma fibra óptica e da utilização de slots agrupados.	6
Figura 3 – Níveis de modulação nas redes ópticas elásticas (YANG; HOU; GUO, 2014).	7
Figura 4 – Problema RMLSA nas redes ópticas elásticas.	7
Figura 5 – Restrições de (a) <i>continuidade</i> e (b) <i>contiguidade</i> .	8
Figura 6 – (a) Crescimento de ruído no sinal óptico ao longo da propagação e (b) relação de SNR.	11
Figura 7 – (a) Crescimento do ruído no sinal óptico ao longo da propagação, com regeneração no nó 3, e (b) proporção de SNR.	12
Figura 8 – Topologia NSFNet utilizada para validação em cenário de tráfego dinâmico.	13
Figura 9 – Valores de Probabilidade de Bloqueio para simulações com SNetS e a modelagem proposta em (WAN; HUA; ZHENG, 2012).	14
Figura 10 – Fluxograma para metodologia de avaliação de custo-benefício da utilização de regeneradores.	17
Figura 11 – Topologia EON.	18
Figura 12 – Pico de utilização de transmissores por nó.	19
Figura 13 – Probabilidade de bloqueio com a variação da quantidade de regeneradores para os algoritmos de alocação de regeneradores (a) FLR e (b) FNS.	20
Figura 14 – Ganho de probabilidade de bloqueio com a variação da quantidade de regeneradores para os algoritmos de alocação de regeneradores (a) FLR e (b) FNS.	21
Figura 15 – Custo-benefício para os algoritmos de alocação de regeneradores (a) FLR e (b) FNS.	23
Figura 16 – Exemplo de alteração de formato de modulação em um mesmo enlace, utilizando os formatos (a) 8QAM e (b) QPSK.	26
Figura 17 – Resultados gráficos de (a) probabilidade de bloqueio de circuito e (b) ganho do ARTO sobre o FLR para a topologia NSFNet.	29
Figura 18 – Componentes da Probabilidade de Bloqueio para os algoritmos (a) FLR e (b) ARTO na topologia NSFNet.	29
Figura 19 – Componentes de probabilidade de bloqueio: (a) fragmentação, (b) QoTN, (c) QoTO e (d) falta de recursos, para a topologia NSFNet.	30
Figura 20 – Resultados gráficos de (a) probabilidade de bloqueio de banda e (b) ganho de probabilidade de bloqueio de banda do ARTO sobre o FLR para a topologia NSFNet.	31

Figura 21 – Resultados gráficos de (a) probabilidade de bloqueio de circuito e (b) ganho de probabilidade de bloqueio do ARTO sobre o FLR para a topologia EON. . . . .	31
Figura 22 – Componentes da Probabilidade de Bloqueio para os algoritmos (a) FLR e (b) ARTO na topologia EON. . . . .	32
Figura 23 – Componentes de probabilidade de bloqueio: (a) fragmentação, (b) QoTN, (c) QoTO e (d) falta de recursos, para a topologia EON. . . . .	33
Figura 24 – Resultados gráficos de (a) probabilidade de bloqueio de banda e (b) ganho de probabilidade de bloqueio de banda do ARTO sobre o FLR para a topologia EON. . . . .	33
Figura 25 – Altura de um objeto representada por: (a) lógica tradicional, (b) lógica <i>fuzzy</i> . . . . .	40
Figura 26 – Componentes de um conjunto <i>fuzzy</i> . . . . .	40
Figura 27 – Modelagem <i>fuzzy</i> das funções de pertinência para a variável linguística <i>quantidade de enlaces da rota</i> . . . . .	41
Figura 28 – Funções de pertinência mais utilizadas: (a) triangular, (b) trapezoidal e (c) gaussiana. . . . .	42
Figura 29 – Fluxo de execução do algoritmo proposto utilizando Sistemas <i>fuzzy</i> . . . . .	44
Figura 30 – Variável linguística <i>Quantidade de Slots Ocupados</i> . . . . .	45
Figura 31 – Exemplificação da métrica de Fragmentação Relativa. . . . .	45
Figura 32 – Variável linguística <i>Fragmentação Relativa</i> . . . . .	46
Figura 33 – Variável linguística <i>Índice do Slot Inicial do Primeiro Intervalo Espectral Allocável</i> . . . . .	46
Figura 34 – Variável linguística para processo de <i>defuzzificação</i> . . . . .	46
Figura 35 – Conjunto de regras <i>fuzzy</i> , com entrada de valores de Fragmentação relativa e Quantidade de Slots Ocupados iguais a 0.6 e 150, respectivamente. . . . .	47
Figura 36 – Topologias utilizadas para avaliação: USA(a) e NSFNet(b). . . . .	49
Figura 37 – Probabilidade de Bloqueio de Circuito para as topologias: (a) USA e (b) NSFNet. . . . .	50
Figura 38 – Probabilidade de Bloqueio por Banda para as topologias: (a) USA e (b) NSFNet. . . . .	51

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Formatos de modulação. . . . .	10
Tabela 2 – Parâmetros adotados na modelagem da camada física. . . . .	19
Tabela 3 – Ganho de custo por quantidade de regeneradores. . . . .	22
Tabela 4 – Parâmetros de simulação aplicados nas topologias EON e NSFNet. . . . .	28
Tabela 5 – Conjunto de Regras de controle do Sistema Fuzzy. . . . .	48
Tabela 6 – Parâmetros de topologias utilizadas no estudo. . . . .	49
Tabela 7 – Parâmetros de simulação. . . . .	49



# Lista de abreviaturas e siglas

## Inglês

16QAM	16 symbol Quadrature Amplitude Modulation
64QAM	64 symbol Quadrature Amplitude Modulation
ASE	Amplified Spontaneous Emission
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
DA	Distance Adaptive Regenerator Localization Algorithm
EON	European Optical Network
FLR	First Longest Reach Regenerator Assignment
FNS	First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment
MSU	Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement
NDF	Node Degree First
NSFNet	National Science Foundation Network
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PSD	Power Spectral Density
QoT	Quality of Transmission
QoTN	QoT inadequate to the New optical circuit
QoTO	QoT inappropriate for some Others established circuits
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RA	Regenerator Allocation
RMLSA	Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment
RP	Regenerator Placement
SNetS	Slice Network Simulator

SNR            Signal to Noise Ratio

WDM           Wavelength Division Multiplexing

**Português**

ARTO           Alocação de Regeneradores com Tonificação de Circuito

NLI            Ruído Não-Linear

OEO           Óptico-Electro-Óptico

# Lista de símbolos

$\Delta B$	espaçamento do canal óptico
$\Delta_f$	largura de banda do circuito
$\Delta G$	largura de banda das bandas de guarda
$\Delta s$	largura de banda de um slot
$\lambda$	taxa de chegada média
$\mu$	taxa de atendimento média
$\rho$	intensidade de tráfego
$B_n$	largura de banda da requisição
$B_s$	largura de banda do canal óptico
$C$	taxa média de bits
$C_{semRegen}$	custo do nó sem regenerador
$C_K$	custo do nó com K regeneradores
$c$	circuito
$c_{TX}$	custo do transmissor
$cont_i$	contador do nó i
$D$	soma da distância de todos os enlaces da rede
$d$	soma da distância dos enlaces adjacentes ao nó
$F$	valor de FEC
$G$	custo-benefício
$G_{custo}$	ganho de custo
$I$	densidade espectral da potência do sinal
$I_{ASE}$	densidade espectral da potência do ruído ASE
$I_{NLI}$	densidade espectral da potência dos ruídos não-lineares

$i$	nó
$i_x$	nó x da rota
$K$	total de regeneradores disponíveis
$k$	número de rotas de menor caminho
$L$	nível do formato de modulação
$M$	bits por símbolo dos formatos de modulação
$m$	nível de modulação
$N$	número de nós da rota
$n$	número de nós com capacidade de regeneração
$P$	vetor de nós da rota
$P_{tx}$	potência de sinal
$PB_K$	probabilidade de bloqueio do cenário com K regeneradores
$PB_{semRegen}$	probabilidade de bloqueio do cenário sem regeneração
$PB_{totalRegen}$	probabilidade de bloqueio do cenário com capacidade ilimitada de regeneração
$R$	rota
$r_{total}$	pico da quantidade de regeneradores utilizados
$r_{unid}$	custo de um regenerador
$s$	número de slots do segmento
$SNR_{QoT}(dB)$	limiar de SNR dos formatos de modulação

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação e Objetivo	1
1.2	Organização da Dissertação	2
1.3	Trabalhos Publicados	3
<b>2</b>	<b>REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução a Redes Ópticas Elásticas	5
2.2	Problemas RMLSA	7
2.3	Qualidade de Transmissão	9
2.4	Ferramenta de Simulação	12
<b>3</b>	<b>UTILIZAÇÃO DE REGENERADORES</b>	<b>15</b>
3.1	Trabalhos Relacionados	15
3.2	Definindo a Quantidade de Regeneradores	17
3.2.1	Etapa I: Probabilidade de Bloqueio	19
3.2.2	Etapa II: Ganho de Desempenho em Termos de Probabilidade de Bloqueio	20
3.2.3	Etapa III: Ganho de Custo por Quantidade de Regeneradores	22
3.2.4	Etapa IV: Custo-Benefício	22
<b>4</b>	<b>ARTO: ALOCAÇÃO DE REGENERADORES COM TONIFICAÇÃO DE CIRCUITO</b>	<b>25</b>
4.1	Tonificação de Circuito	25
4.2	Avaliação de Desempenho	28
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>35</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>37</b>
	<b>APÊNDICE A – SISTEMA FUZZY PARA ROTEAMENTO</b>	<b>39</b>
A.1	Conceitos de sistemas <i>fuzzy</i>	39
A.2	Nova solução para o problema de roteamento em redes ópticas elásticas utilizando algoritmo ciente de fragmentação baseado em sistemas <i>fuzzy</i>	42
A.2.1	Trabalhos relacionados	42
A.2.2	Algoritmo proposto	43
A.2.3	Cenário avaliado neste trabalho	48

A.2.4	Resultados . . . . .	50
A.2.5	Conclusões . . . . .	52
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>53</b>

# 1 Introdução

As redes ópticas elásticas despontam como solução para suprir o crescimento de usuários nas redes de transporte, responsáveis pelo tráfego de grande volume de dados por distâncias continentais. Dentre os problemas encontrados na literatura para redes ópticas elásticas, o RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) destaca-se, pois engloba os problemas de roteamento, escolha do nível de modulação e alocação espectral, que influenciam na QoT (*qualidade de transmissão*) dos circuitos.

Os efeitos de degradação do sinal óptico provenientes das imperfeições do meio físico também causam impacto na QoT do sinal. Para reduzir o impacto da camada física, são utilizados regeneradores, equipamentos que renovam a qualidade do sinal e permitem a transmissão por distâncias maiores.

Neste Capítulo são apresentados os principais objetivos deste trabalho, juntamente com a motivação, a organização do restante do trabalho e a relação dos artigos publicados.

## 1.1 Motivação e Objetivo

A obtenção de maior lucro por parte dos provedores de serviços está diretamente relacionada com a capacidade de atendimento de requisições dos clientes da rede. Quanto mais circuitos são atendidos e estabelecidos, maior é a quantidade de clientes transmitindo dados e utilizando os recursos da rede. Assim, otimizar a utilização dos recursos fornecidos pela rede é uma forma de maximizar os lucros obtidos.

Um dos principais problemas na literatura das redes ópticas elásticas é o RMLSA, que consiste na escolha da rota, do formato de modulação adequado e da faixa espectral para o estabelecimento do circuito óptico entre os nós de origem e destino. O estudo das soluções propostas para o problema RMLSA tem grande importância, uma vez que impactam diretamente na qualidade de transmissão da rede.

Ao observar um cenário mais realista, considerando os efeitos de camada física, outros problemas podem ser avaliados, como o posicionamento e a alocação de regeneradores. Após a distribuição de regeneradores na rede (posicionamento) ainda é necessário decidir quando determinados nós devem realizar regeneração do sinal (alocação de regeneradores), sempre tentando reduzir a quantidade de regeneradores alocados para a manutenção da qualidade do sinal em um nível adequado.

Considerando os problemas citados, a área de pesquisa das redes ópticas elásticas possui diferentes alvos de estudo, sempre possibilitando oportunidades de otimização para utilização de recursos e manutenção da rede. Esse conjunto de problemas (e outros, como

as técnicas de sobrevivência e restauração após ocorrência de falhas) ([CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015](#)) se mostram interessantes nichos de estudo e tem atraído pesquisadores.

Como proposta, este trabalho de mestrado apresenta um novo algoritmo para alocação de regeneradores em redes ópticas elásticas. O algoritmo para Alocação de Regeneradores com Tonificação de Circuito (ARTO) visa reduzir a probabilidade de bloqueio geral da rede, possibilitando o atendimento de mais requisições e o estabelecimento de mais circuitos. Um grande diferencial do ARTO é que este nem sempre utiliza o formato de modulação mais complexo, permitindo que o circuito se torne mais robusto em algumas conexões. Além disso, o desempenho do algoritmo ARTO é comparado com outras propostas da literatura. Este estudo de avaliação é feito por meio de simulação e compara o algoritmo proposto com outros encontrados na literatura, em termos de probabilidade de bloqueio de circuito e probabilidade de bloqueio de banda, e considerando as topologia das redes NSFNet e EON. O ARTO apresenta ganho de probabilidade de bloqueio igual a 32,88% e 18,58% para a topologia NSFNet e entre 31,16% e 15,56% para a topologia EON, considerando o concorrente de melhor desempenho.

Este trabalho também propõe um modelo para avaliação de custo-benefício da utilização de regeneradores para redes ópticas elásticas, considerando o custo de equipamentos e regeneradores aplicados na rede.

## 1.2 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta conceitos de redes ópticas elásticas, importantes para o entendimento deste trabalho. Também são listados e detalhados problemas encontrados na literatura, como o problema RMLSA, as restrições de continuidade e contiguidade, além do problema de fragmentação do espectro óptico. Também neste capítulo se encontram informações sobre o modelo de camada física adotado, juntamente com apresentação da utilização de regeneradores em redes ópticas elásticas translúcidas.

O Capítulo 3 apresenta os principais algoritmos de posicionamento e alocação de regeneradores em redes ópticas elásticas translúcidas. Além disso, também é apresentado um estudo de custo-benefício para avaliação da quantidade adequada de regeneradores a serem utilizados em uma determinada topologia.

O Capítulo 4 apresenta o algoritmo de Alocação de Regeneradores com Tonificação de Circuito (ARTO) proposto nesta dissertação de mestrado, seguido pelo estudo de avaliação de desempenho do ARTO, comparado com outros algoritmos de alocação de regeneradores.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações finais deste trabalho de

mestrado.

O Apêndice A descreve a proposta de um algoritmo para roteamento baseado em sistema *fuzzy* para redes ópticas elásticas. O estudo não foi adicionado ao corpo do trabalho por ser proposto para um cenário diferente, no qual não há consideração dos efeitos de camada física. Entretanto, o trabalho foi desenvolvido durante o curso de mestrado e foi adicionado como apêndice.

## 1.3 Trabalhos Publicados

Os seguintes trabalhos foram desenvolvidos ao longo do curso de mestrado:

- BRASILEIRO, Í.; VALDEMIR JUNIOR, J.; SOARES, A. Nova solução para o problema de roteamento em redes ópticas elásticas utilizando algoritmo ciente de fragmentação baseado em sistemas fuzzy. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC), 2016.
- BRASILEIRO, Í. B. ; VALDEMIR JUNIOR, J. ; SANCHES, A. ; SOARES, A. A fuzzy solution to routing problem in elastic optical networks. In: International Conference on Transparent Optical Network (ICTON), 2016, Trento.
- BRASILEIRO, Í. B. ; VALDEMIR JUNIOR, J. ; SOARES, A. Algoritmo de Roteamento com Balanceamento de Carga Adaptado a Redes Ópticas Elásticas. In: Revista Brasileira de Computação Aplicada (RBCA), 2017. (Aceito para publicação).
- BRASILEIRO, Í. B. ; SANTOS, I. ; RABELO, R. A. L. ; SOARES, A. Ant Colony Optimization Applied to the Problem of Choosing the Best Combination among M Combinations of Shortest Paths in Transparent Optical Networks. In: Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, v. 6, p. 231-242, 2016.



## 2 Redes Ópticas Elásticas

Este capítulo descreve conceitos encontrados na literatura de redes ópticas elásticas. É enfatizado o problema RMLSA, nome dado ao conjunto dos problemas de roteamento, escolha de formato de modulação e seleção de intervalo espectral. Ao final é descrita a ferramenta de simulação utilizada em todo o trabalho, além de um estudo de validação da mesma.

### 2.1 Introdução a Redes Ópticas Elásticas

As tecnologias de transmissão de dados por meio de fibras ópticas vem se destacando como solução para atender ao crescimento do tráfego de dados. Isso ocorre devido à alta taxa de transmissão atingida no meio óptico, em que a luz é utilizada para transportar dados (WRIGHT; PARKER; LORD, 2015). Serviços de vídeo em alta definição, e-Science e computação em nuvem são exemplos de aplicações que necessitam de grande largura de banda (ZHANG; ZHU, 2014). Portanto, as redes ópticas surgem como uma alternativa para suprir a crescente demanda de dados (KRETSIS et al., 2014).

Dentre as alternativas de tecnologias que fazem uso de fibra óptica destacam-se as redes ópticas elásticas (TALEBI et al., 2014), pela utilização eficiente dos recursos disponíveis. As redes ópticas elásticas utilizam a tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que possibilita a divisão do canal óptico de uma fibra em *slots*. Os *slots* são pequenos intervalos de frequência (12,5 GHz, por exemplo) (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015), que podem operar de forma independente ou conjunta para a transmissão de dados. Cada *slot* pode ser associado a uma cor, considerando que o número de frequência da luz é o indicador de sua cor. A Figura 1 representa um enlace de fibra óptica com a divisão do espectro óptico, sendo (a) com slots desocupados e (b) com slots ocupados.

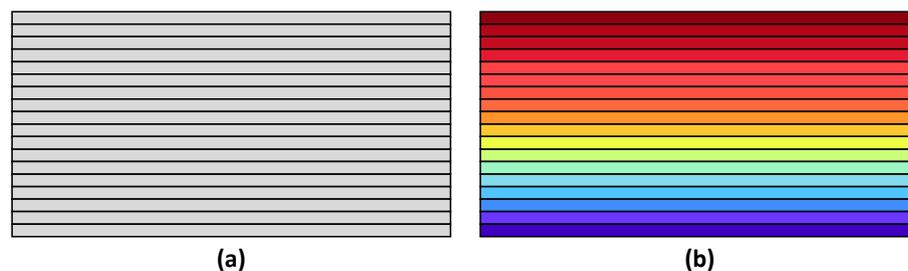


Figura 1 – Representação de uma fibra óptica e seus slots (a) livres e (b) ocupados.

Para garantir a transmissão de dados, é utilizado o modelo de comutação por

circuito, no qual é feito a reserva de recursos antes do estabelecimento do circuito (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2010). Isso permite que o canal óptico solicitado seja utilizado somente pelo circuito em questão, além de garantir que ele esteja disponível para o mesmo cliente enquanto o circuito estiver ativo. Outros modelos de comutação, como o de pacotes ou rajadas, não garantem a entrega do pacote de dados (ZHANG et al., 2012), o que os torna pouco eficazes em cenários com maior exigência de entrega de dados.

Para o estabelecimento do circuito, um canal de transmissão é alocado entre o ponto de origem dos dados (denominado *nó de origem*) até o ponto de destino (*nó de destino*). Nas redes ópticas elásticas, ao surgir uma requisição de estabelecimento de circuito, os *slots* são utilizados como canal de transmissão de dados. Assim, para o estabelecimento de um circuito entre nós de origem e destino, *slots* devem ser alocados, reservados e utilizados apenas pela requisição do *par*( $o, d$ ) (par de origem e destino) em questão. Em casos de requisições de grandes larguras de banda, para as quais a utilização de apenas um slot não é suficiente, ocorre o agrupamento de *slots*. *Slots* agrupados passam a representar um único canal óptico de maior capacidade de transmissão, quando comparado a um único *slot*. A Figura 2 apresenta um espectro óptico com circuitos de 1, 2 e 3 *slots*, partindo dos transmissores (Tx) e percorrendo a fibra até os receptores (Rx).

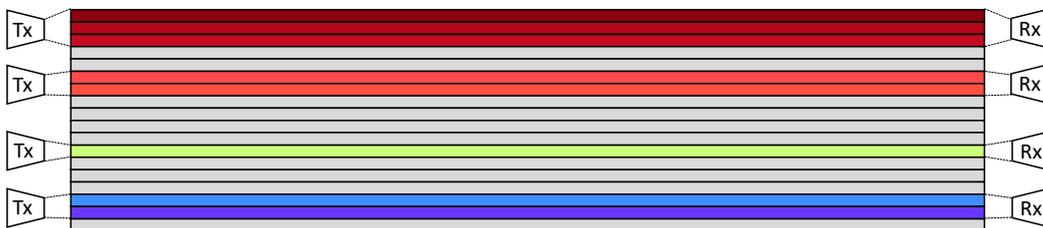


Figura 2 – Representação de uma fibra óptica e da utilização de slots agrupados.

As redes ópticas elásticas utilizam multiplexação OFDM, que permite a divisão dos recursos espectrais em bandas de baixo intervalo espectral (por exemplo, 12,5 GHz) (FAN; QIU; CHAN, 2015). Além disso, o formato de modulação do sinal óptico pode ser alterado, por meio da manipulação da amplitude e da fase da onda portadora. A combinação de diferentes características aplicadas ao sinal óptico viabiliza a transmissão de maior quantidade de informação, quando comparado ao modelo tradicional de um bit por símbolo (BPSK - *Binary Phase-Shift Keying*). A Figura 3 apresenta alguns formatos de modulação para as redes ópticas elásticas (YANG; HOU; GUO, 2014).

É importante destacar que formatos de modulação com alto desempenho (altas taxas de bits por símbolo, como 64QAM) apresentam sinal óptico de maior complexidade, pois transmitem mais bits por símbolo. Tais níveis de modulação são mais propensos a falhas provenientes do meio físico a medida em que se aumenta a distância da rota. Portanto, a escolha dos formatos de modulação sofre influência da distância da rota a ser

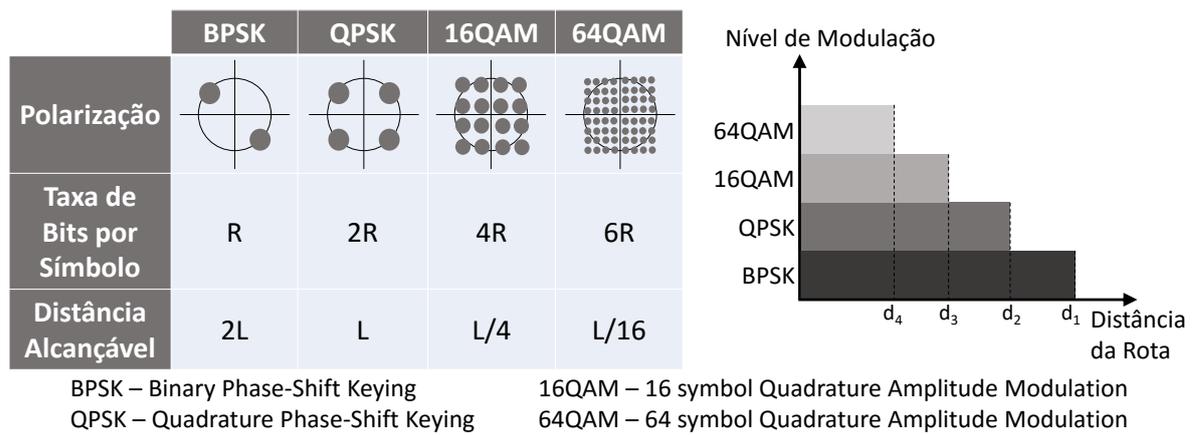


Figura 3 – Níveis de modulação nas redes ópticas elásticas (YANG; HOU; GUO, 2014).

percorrida. Para rotas de maiores distâncias, as modulações de menor complexidade são utilizadas (como BPSK) (YANG; HOU; GUO, 2014).

## 2.2 Problemas RMLSA

A escolha do formato de modulação a ser utilizado no estabelecimento de um circuito depende do tamanho da rota. Para o uso eficiente das redes ópticas elásticas, é necessário solucionar o problema RMLSA (COSTA; DRUMMOND, 2017) (FONTINELE et al., 2017), que consiste em selecionar uma rota, o nível adequado de modulação e a faixa espectral para atender as requisições de circuito, de modo a reduzir o impacto causado no nível de QoT. Os recursos da rede são escolhidos por algoritmos de roteamento e de alocação espectral, com o objetivo de maximizar o atendimento de requisições durante a alocação de recursos. A Figura 4 apresenta uma demonstração simplista do problema RMLSA.

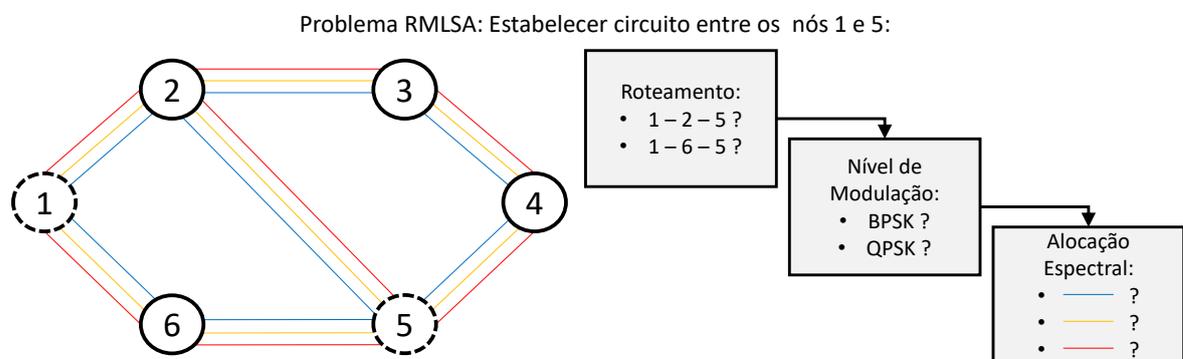


Figura 4 – Problema RMLSA nas redes ópticas elásticas.

A primeira etapa do problema RMLSA é a escolha da rota a ser utilizada. O problema da escolha de rotas geralmente é aplicado em um dos seguintes conjuntos:

conjunto das rotas de menor caminho (que agrupa todas as rotas com menor quantidade de saltos possível entre os nós de origem e destino) (BRASILEIRO; JÚNIOR; SOARES, 2016) e conjunto das  $k$  menores rotas (agrupa as  $k$  primeiras rotas, ordenadas de forma crescente por número de saltos ou distância física dos enlaces) (FONTINELE et al., 2017). Após solucionar o problema de roteamento, surge a necessidade de escolher o nível de modulação utilizado pelo circuito. A escolha do formato de modulação (BPSK ou QPSK no exemplo da Figura 4) permite decidir quantos bits serão transmitidos por símbolo. Essa escolha tem impacto na definição do número de slots requeridos pelo circuito. Com a escolha do formato de modulação, surge o problema de alocar um intervalo de slots dentro do espectro óptico que comporte a requisição a ser atendida.

Durante a propagação do sinal, é preferível manter a transmissão dos dados no meio óptico, evitando conversão para o meio eletrônico, a fim de reduzir o tempo de transmissão e utilização de mais recursos. Para isso é necessário cumprir alguns requisitos provenientes do meio óptico, denominados de *restrições de continuidade e contiguidade espectral* (WANG; MUKHERJEE, 2014). Na *restrição de continuidade*, para que não haja necessidade de conversão do sinal óptico para o domínio eletrônico, torna-se obrigatória a permanência do sinal óptico no mesmo intervalo espectral entre os nós de origem e destino. Ao alocar um conjunto de *slots*, este deve estar livre em todos os enlaces da rota selecionada. Na *restrição de contiguidade*, para atender uma requisição, é preciso alocar um conjunto de *slots* dispostos de forma adjacente no espectro óptico. Assim, utiliza-se apenas um transmissor para cada circuito, pois apenas uma faixa espectral é ocupada. A Figura 5 ilustra os problemas de *continuidade* e *contiguidade* espectral.

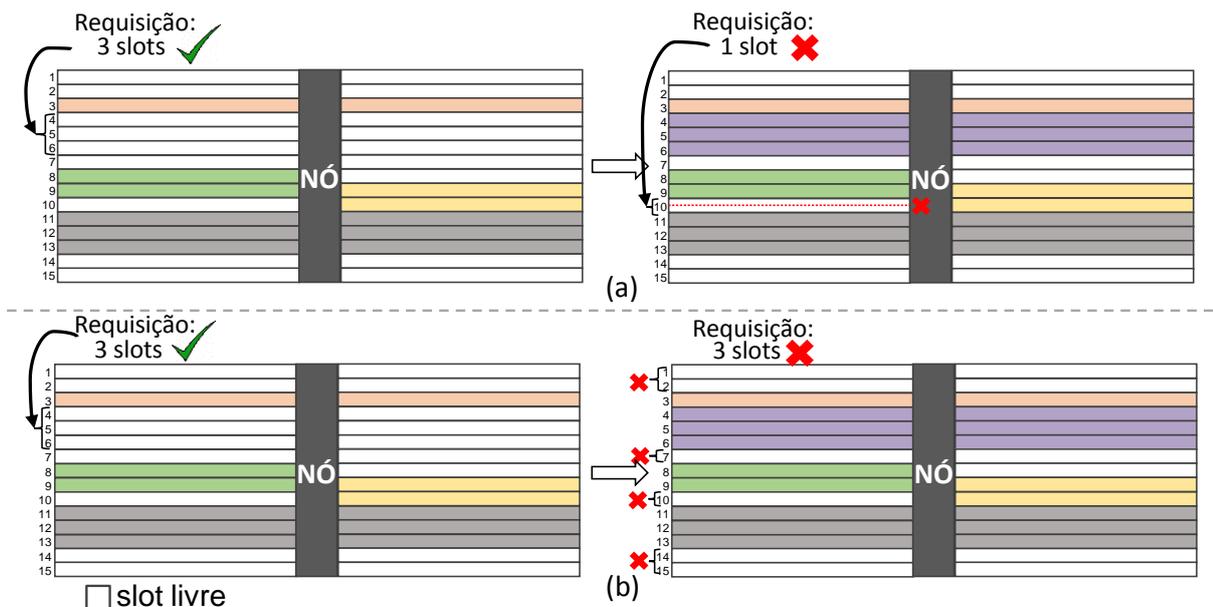


Figura 5 – Restrições de (a) *continuidade* e (b) *contiguidade*.

Devido a restrições de *continuidade* e *contiguidade*, e a medida que circuitos são estabelecidos e desligados, surgem pequenas lacunas de *slots* livres no espectro. Na Figura

5(a), inicialmente um circuito de 3 *slots* é alocado, ocupando os *slots* 4, 5 e 6. Em seguida, o algoritmo de alocação de espectro tenta alocar um circuito de um *slot* no *slot* 10. No entanto, para os enlaces observados, o *slot* 10 não está totalmente livre, causando o bloqueio da requisição de circuito em questão. Algumas lacunas não poderão ser preenchidas devido à restrição de continuidade. Na Figura 5(b), ocorre o estabelecimento de um circuito de 3 *slots* novamente. Após, surge uma nova requisição de circuito com necessidade de 3 *slots*. Entretanto, a restrição de contiguidade impede o estabelecimento de circuitos maiores que 2 *slots*, pois todo o espectro está dividido em pequenos fragmentos, o que causa o bloqueio da requisição de 3 *slots*. A presença desses intervalos, em maior proporção, interfere no funcionamento da rede, pois algumas requisições não serão atendidas, ainda que existam *slots* suficientes. Estes *slots* estarão dispersos no espectro óptico, impedidos de serem alocados devido à *restrição de contiguidade*. Esse problema surge juntamente com as redes ópticas elásticas, e é caracterizado como *Problema de Fragmentação* (WANG; MUKHERJEE, 2014).

## 2.3 Qualidade de Transmissão

A probabilidade de bloqueio é uma das principais métricas utilizadas na literatura das redes ópticas elásticas (ZHAO; VOKKARANE, 2016), (CHAVES et al., 2016). Essa métrica permite medir o desempenho de determinada heurística, seja de roteamento, alocação espectral ou qualquer outra heurística que tenha como objetivo otimizar a alocação de recursos nas redes ópticas elásticas. Boas heurísticas obtêm baixo valor de probabilidade de bloqueio, pois reduzem a quantidade de requisições que não são atendidas. Além da fragmentação, o bloqueio de circuitos pode ter outras causas, como a falta de recursos, qualidade de transmissão inadequada para o novo circuito óptico (*QoTN - QoT inadequate to the New optical circuit*) ou qualidade de transmissão inadequada para circuitos ópticos já ativos (*QoTO - QoT inappropriate for some Others established circuits*) (FONTINELE et al., 2016).

Ainda neste contexto, o bloqueio por fragmentação ocorre quando a rede apresenta a quantidade de *slots* suficientes para o atendimento da requisição, mas estes se encontram dispersos no espectro, de forma a não existir um intervalo contínuo e contíguo que comporte a requisição. Já quando não há a quantidade suficiente de *slots* para o estabelecimento do circuito, ocorre bloqueio por falta de recursos.

Já os bloqueios de *QoTN* e *QoTO* ocorrem com a verificação da interferência entre o circuito óptico que vai ser estabelecido e os circuitos ópticos já ativos nos enlaces da rota escolhida. Cada circuito óptico tem um formato de modulação definido. Os formatos de modulação apresentam tolerância a ruídos na rede, e esse limiar pode ser medido por meio do SNR (*Signal to Noise Rate*), que é a relação *signal/ruído* da rede. Formatos de modulação

mais complexos apresentam maior fragilidade aos ruídos da rede. A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros dos formatos de modulação avaliados neste trabalho (BEYRANVAND; SALEHI, 2013) (SCHMOGROW et al., 2012), em que  $L$  representa o nível do formato de modulação,  $R$  a quantidade de bits por símbolo de cada formato de modulação, e  $SNR_{QoT}(dB)$  é o limiar de SNR para cada formato de modulação.

Tabela 1 – Formatos de modulação.

Parâmetros	BPSK	QPSK	8QAM	16QAM	32QAM	64QAM
$L$	2	3	4	5	6	7
$R$	2	4	8	16	32	64
$SNR_{QoT}(dB)$	6	9	12	15	18	21

Assim, durante o estabelecimento do novo circuito, é medido o seu valor de SNR. Caso esteja abaixo do limiar aceitável para o formato de modulação aplicado, o circuito é bloqueado, mesmo que o espectro óptico possua recursos disponíveis. O bloqueio ocorre porque o nível de ruído presente na rede tornaria o sinal óptico indecifrável ao chegar no seu destino.

Caso o QoT do novo circuito (QoTN) esteja dentro dos padrões para o limiar do formato de modulação, também é feita a avaliação do nível de SNR para os circuitos que já estão estabelecidos na rede. Se algum dos circuitos ativos sofrer uma queda do valor de SNR a ponto de ultrapassar o limiar para o seu nível de modulação, o novo circuito não é estabelecido. O estabelecimento deste circuito causaria interferência na rede, a ponto de prejudicar a qualidade de transmissão de outros circuitos já ativos. Por fim, se a QoT dos outros circuitos (QoTO) permanece acima do limiar, o novo circuito óptico é estabelecido.

Para o estudo dos bloqueios ocasionados por QoTN e QoTO, deve ser adotado um modelo de camada física que retrate o impacto das imperfeições do meio físico no sinal transmitido. A adoção desse modelo permite calcular a relação entre o sinal óptico e o ruído acrescentado durante a propagação. O cálculo de SNR de um circuito  $c$  é definido pela Equação 2.1 (JOHANNISSON; AGRELL, 2014), (ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015), (YAN et al., 2015):

$$SNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}} \quad (2.1)$$

onde  $I$  é a densidade espectral da potência do sinal (*PSD - Power Spectral Density*), definido por  $I = P_{tx}/\Delta_f$ , em que  $P_{tx}$  é a potência de sinal e  $\Delta_f$  é a largura de banda do circuito. A PSD do ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) ( $I_{ASE}$ ) e dos ruídos não-lineares ( $I_{NLI}$ ) são demonstrados com detalhes em (BEYRANVAND; SALEHI, 2013).

O acúmulo das degradações no sinal óptico ao longo de uma rota pode tornar a taxa de erro de bit (BER - *Bit Error Rate*) intolerável (considerando uma BER máxima

tolerável de  $10^{-3}$ , que com o uso de técnicas de correção de erros podem reduzir para valores aceitáveis (ex.  $10^{-9}$ ) (ESSIAMBRE et al., 2010) no receptor, inviabilizando a comunicação (RAHBAR, 2012). A Figura 6 apresenta (a) o crescimento do ruído na qualidade do sinal óptico, até chegar ao seu destino com qualidade abaixo do limiar tolerado pela rede, e (b) a SNR (Relação de Sinal e Ruído) do sinal.

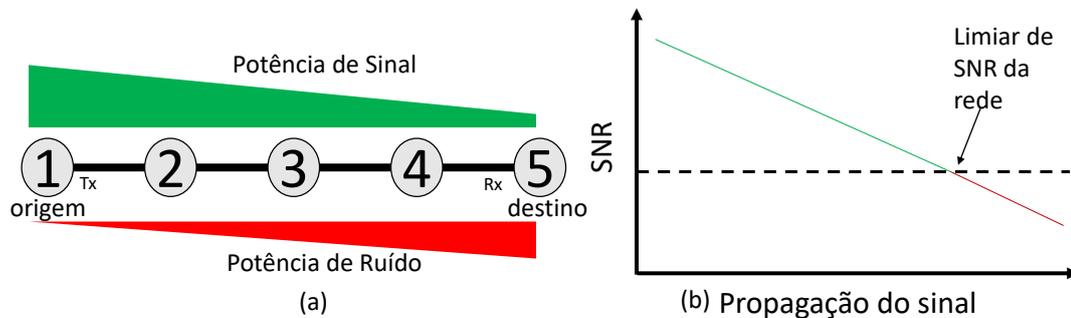


Figura 6 – (a) Crescimento de ruído no sinal óptico ao longo da propagação e (b) relação de SNR.

É observado na Figura 6 (a) que ocorre redução na potência de transmissão do sinal, ao mesmo tempo em que há crescimento do ruído ao longo dos enlaces da rota. Ao avaliar a proporção de sinal/ruído ao longo da rota, observa-se a redução do valor de SNR na Figura 6 (b), alcançando valores menores do que o limiar tolerado pela rede. Ao obter um nível inadequado de SNR, o sinal óptico não é interpretado corretamente no receptor.

Nesse contexto, pode-se categorizar uma rede óptica em três grupos: rede óptica opaca, transparente e translúcida. Em uma rede óptica opaca, cada nó da rede realiza a conversão do sinal do domínio óptico para o domínio eletrônico e, após um processamento, o sinal é convertido novamente para o domínio óptico. Para que isso ocorra, é necessário o uso de conversores OEO (*Óptico-Electro-Óptico*), gerando maior custo financeiro da rede, além de atrasos na propagação das informações. Já a rede óptica transparente realiza todo o roteamento, desde a origem até o destino, no domínio óptico. Entretanto, devido às imperfeições de camada física, a baixa QoT do circuito pode impedir a correta interpretação do sinal pelo receptor óptico. Por fim, a rede óptica translúcida surge como um híbrido, usando *regeneradores* em alguns nós da rede, permitindo a regeneração do sinal óptico. A regeneração ocorre por conversores OEO posicionados em alguns nós da rede, que retransmitem o sinal sem as interferências do meio físico acumuladas no sinal óptico. Desta forma, a regeneração torna a rede mais resistente aos efeitos de camada física (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Para uma rede óptica translúcida é importante definir quais os nós da rede têm capacidade de regeneração, o que constitui um problema de *posicionamento de regeneradores* (CHAVES et al., 2012). Além disso, também é necessário definir em cada nó, quais circuitos passam ou não pelo processo de regeneração. Este procedimento é conhecido como alocação de regeneradores (CHAVES et al., 2012). Se definidos de forma adequada,

os algoritmos de posicionamento e alocação de regeneradores permitem a correção do sinal óptico, lançando na fibra um sinal sem interferências, semelhante ao sinal lançado pelo nó de origem. A Figura 7 (a) apresenta o decrescimento da qualidade do sinal, com ocorrência de regeneração no nó 3, e a Figura 7 (b) representa o valor de SNR ao longo da propagação do sinal.

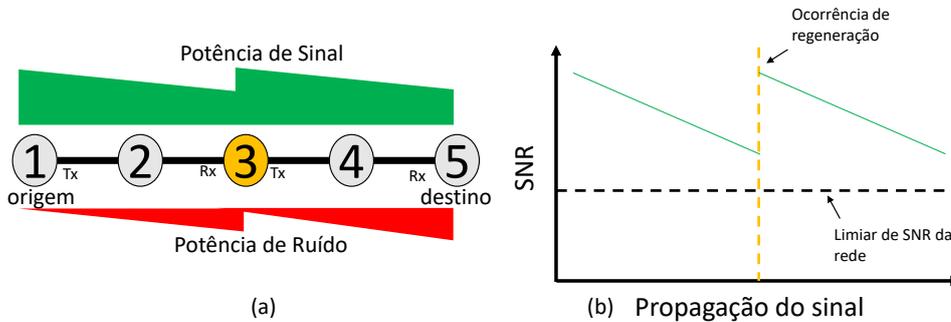


Figura 7 – (a) Crescimento do ruído no sinal óptico ao longo da propagação, com regeneração no nó 3, e (b) proporção de SNR.

Na Figura 7 (a), nota-se a redução da qualidade de transmissão do sinal com o crescimento da potência de ruído, proveniente das interferências do meio físico. Ao passar pelo nó 3, que contém um conversor OEO, ocorre a regeneração do sinal, que é lançado novamente no segmento óptico seguinte. O sinal então chega até o destino (nó 5) com qualidade acima do limite tolerado pela rede, podendo ser traduzido corretamente no receptor.

## 2.4 Ferramenta de Simulação

Para realização das simulações e obtenção dos resultados avaliados neste trabalho, foi utilizado o simulador SNetS (*Slice Network Simulator*) (BRASILEIRO; JÚNIOR; SOARES, 2016) (FONTINELE et al., 2016). O SNetS permite realizar estudo de ambientes que simulam as redes ópticas elásticas. A simulação de um cenário de rede se dá em sua fase operacional e considera o comportamento dinâmico comum em cenários reais, permitindo a avaliação de desempenho de diferentes técnicas de roteamento e alocação de espectro. Além disso, no simulador é possível implementar novas técnicas de roteamento e alocação de espectro, facilitando o processo de elaboração de novas heurísticas.

O uso de simuladores traz benefícios para a comunidade científica, pois são de fácil acesso e geralmente estão associados a um baixo custo. Além disso, quando a modelagem do simulador reflete bem as características do ambiente real, uma heurística com bom desempenho na simulação tem fortes indícios de apresentar desempenho semelhante quando integrada em cenários reais. As simulações permitem a reprodução de diferentes configurações de rede, fornecendo resultados que são importantes para o avanço científico.

Para validar o simulador em um cenário de tráfego dinâmico, foram feitas comparações com os resultados apresentados em (WAN; HUA; ZHENG, 2012). A topologia utilizada é a NSFNet, apresentada na Figura 8. Foram geradas 100.000 requisições, com os valores de largura de banda das requisições variando de 10 Gbps até 200 Gbps, de um em um, distribuídas uniformemente. O grau de modulação  $m$  utilizado foi de 2 bits por sinal ( $m = 2$ ) e 4 bits por sinal ( $m = 4$ ). Cada enlace apresenta 400 *slots*, com um intervalo de frequência de 10,0 GHz para cada *slot*. São utilizados 2 slots como banda de guarda para cada requisição.

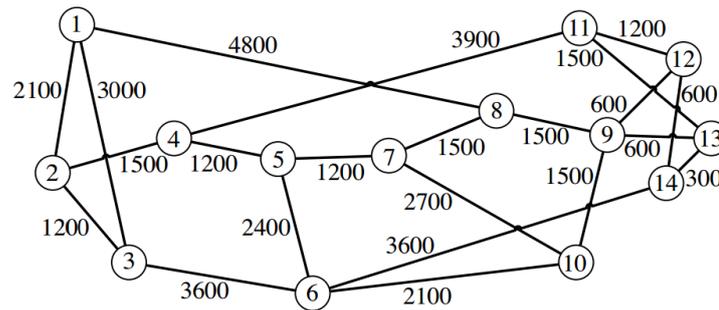


Figura 8 – Topologia NSFNet utilizada para validação em cenário de tráfego dinâmico.

A carga de tráfego é distribuída uniformemente entre todos os *pares*( $o,d$ ). A geração de requisições é um processo de Poisson de taxa de chegada média  $\lambda$ , e o tempo médio de retenção dos circuitos é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu$ . A intensidade de tráfego na rede, em Erlangs, é dada por  $\rho = \lambda/\mu$ . Para cada simulação são realizadas 10 replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Em todos os resultados apresentados neste estudo, adotou-se os intervalos de confiança considerando um nível de confiança de 95%.

Também foi feita uma conversão da unidade de carga, no qual a representação em Erlangs foi substituída por uma medição de Gbps. Para realizar a conversão, o valor de *bps* é encontrado por meio de  $\rho \times C$ , no qual  $\rho$  é a média de tráfego em Erlangs e  $C$  é a taxa média de bits (igual a 105 Gbps no experimento).

O algoritmo avaliado foi o *K Shortest Path* (KSP), com quantidade  $k$  de menores caminhos iguais a 1, 2 e 4. A Figura 9 apresenta os valores de probabilidade de bloqueio para as simulações com SNetS e da modelagem proposta por (WAN; HUA; ZHENG, 2012).

Foram obtidos valores de probabilidade de bloqueio próximos nos dois casos. O valor de probabilidade de bloqueio encontrado por *KSP 1* foi maior do que os outros algoritmos, tanto no simulador quanto na modelagem dos autores em (WAN; HUA; ZHENG, 2012). Também é perceptível a proximidade entre os valores de *KSP 3* e *KSP 5*, que chegam a ter valores próximos nos pontos de carga mais elevada. A disposição gráfica intermediária dos valores encontrados por *KSP 2* também é semelhante nos dois casos.

Nas configurações do SNetS, os valores de largura de banda das requisições variam

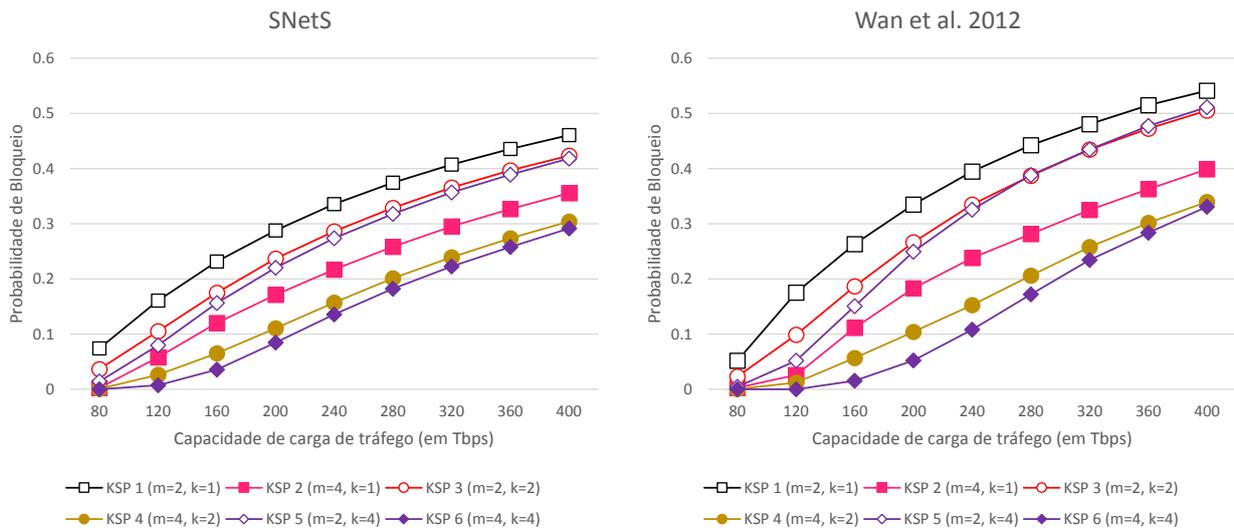


Figura 9 – Valores de Probabilidade de Bloqueio para simulações com SNetS e a modelagem proposta em (WAN; HUA; ZHENG, 2012).

entre 10 e 200 Gbps, de um em um. No modelo proposto em (WAN; HUA; ZHENG, 2012), a variação também é de 10 a 200 Gbps. Entretanto, no escopo do trabalho não é especificada a granularidade de variação entre os valores do intervalo especificado. Apesar disso, percebe-se que a utilização da mesma carga de tráfego permite chegar a resultados com comportamento semelhante para um mesmo algoritmo, fortalecendo a validade de utilização da ferramenta SNetS com a modelagem de (WAN; HUA; ZHENG, 2012). Informações sobre a validação da ferramenta também podem ser encontradas em (FONTINELE et al., 2017).

Este capítulo contemplou o problema RMLSA e considerações sobre qualidade de transmissão, além de apresentar conceitos e termos utilizados na literatura de redes ópticas elásticas. Ao final, foi descrito o estudo de validação do simulador SNetS utilizado. O próximo capítulo aborda o tema de alocação e posicionamento de regeneradores, e apresenta uma proposta para estudo de custo-benefício da utilização de regeneradores em redes ópticas elásticas.

## 3 Utilização de Regeneradores

Neste capítulo é feito um levantamento das principais técnicas de posicionamento e alocação de regeneradores em redes ópticas elásticas. Também é proposta a modelagem de avaliação de custo-benefício da utilização de regeneradores em redes ópticas elásticas, organizado em quatro etapas.

### 3.1 Trabalhos Relacionados

As redes ópticas elásticas translúcidas possuem nós regeneradores, que mitigam a degradação acumulada pelo sinal óptico durante a sua transmissão através dos dispositivos da rede. Além disso, realizam a conversão de espectro óptico e do formato de modulação. Ao permitir a conversão do espectro, os regeneradores quebram a restrição de continuidade espectral que os circuitos devem cumprir em redes ópticas transparentes. Já na conversão de formato de modulação, os regeneradores permitem que um mesmo circuito óptico possa alternar entre formatos de modulação em diferentes segmentos transparentes de uma mesma rota.

Dois problemas típicos em redes ópticas translúcidas são o posicionamento de regeneradores (RP - *Regenerator Placement*) e a alocação de regeneradores (RA - *Regenerator Assignment*) (FONTINELE et al., 2016). O RP é o problema de otimização que deve ser resolvido durante o estágio de planejamento da rede. Esse problema consiste em posicionar um número limitado de regeneradores, de forma a minimizar os impactos da camada física, considerando os custos introduzidos com a implantação dos regeneradores na rede (FONTINELE et al., 2016). Neste contexto, os algoritmos de posicionamento de regeneradores avaliados neste trabalho são: MSU (*Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement*) (CHAVES et al., 2012), DA (*Distance Adaptive Regenerator Localization Algorithm*) (CHAVES et al., 2016) e NDF (*Node Degree First*) (CHAVES et al., 2016).

O algoritmo MSU realiza a decisão de posicionamento de regeneradores baseada em uma simulação anterior à fase de operação da rede. Para isso é utilizado um simulador, no qual são geradas requisições de circuito considerando um tráfego dinâmico e um número ilimitado de regeneradores por nó. Sempre que é necessário realizar a regeneração em um determinado nó  $i$ , o contador  $cont_i$  do nó é atualizado para o número de regeneradores usados simultaneamente no nó  $i$ , caso esse número seja o maior até então. Ao final deste procedimento, MSU distribui entre os nós da rede o total  $K$  de regeneradores disponíveis, com cada nó recebendo um número de regeneradores proporcional ao contador  $cont_i$  do nó.

O algoritmo DA posiciona um total de  $K$  regeneradores na rede. Para cada nó, é contabilizado a soma da distância  $d$  de todos os seus enlaces adjacentes. Também é calculada a distância total  $D$  de todos os enlaces da rede. Ao final, a quantidade de regeneradores a ser colocada nos nós da rede é igual à proporção entre o valor de  $D$  e  $d$  para cada nó.

O algoritmo NDF utiliza duas variáveis de entrada: a quantidade total de regeneradores  $K$  e a quantidade  $n$  de nós que terão capacidade de regeneração na rede. Após, os nós são ordenados de acordo com o grau, e os  $n$  nós de maior grau recebem  $K/n$  regeneradores (CHAVES et al., 2016).

Já o problema RA deve ser resolvido durante a fase de funcionamento da rede, quando os circuitos ópticos serão estabelecidos. A decisão de regenerar ou não um sinal óptico em um nó é tomada pelo algoritmo RA de acordo com a qualidade do sinal óptico e a disponibilidade de regeneradores no nó em questão. Um algoritmo RA tem como objetivo alocar regeneradores minimizando os bloqueios de circuitos por baixa qualidade do sinal óptico (FONTINELE et al., 2016).

Em (CHAVES et al., 2015) são propostas duas heurísticas de alocação de regeneradores para o cenário de redes ópticas elásticas translúcidas. As heurísticas propostas são chamadas de *First Longest Reach Regenerator Assignment* (FLR) e *First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment* (FNS). A heurística FLR-RA realiza a alocação de regeneradores no nó mais distante possível do nó de origem do circuito óptico, poupando a utilização de regeneradores. Por exemplo, dado uma rota  $R$  com  $N$  nós, na qual  $P = \{i_0, i_1 \dots i_{N-1}\}$  é o vetor de nós da rota, e considerando a lista de formatos de modulação possíveis. O algoritmo tenta estabelecer o segmento transparente mais longo possível, entre o nó de origem e um nó  $i_x$  com capacidade de regeneração. O sinal é então regenerado no nó  $n_x$ , e este passa a ser o novo nó de origem para um novo segmento transparente. Assim o processo é reiniciado até o nó de destino da rota.

Já a heurística FNS tenta reduzir o consumo de espectro pelos circuitos sempre buscando usar o formato de modulação mais eficiente espectralmente (64QAM e 32QAM, por exemplo) no estabelecimento dos segmentos transparentes. O algoritmo começa considerando o formato de modulação mais eficiente espectralmente. Em seguida, ele procura pelo segmento transparente mais longo que atenda os requisitos de QoT e disponibilidade de espectro. Se não houver uma solução para o formato de modulação selecionado, o algoritmo tenta utilizar os formatos de modulação seguintes, em ordem decrescente de eficiência espectral (64QAM, 32QAM, 16QAM, 8QAM, QPSK e, por fim, BPSK). Se um segmento transparente for encontrado, o sinal será regenerado no nó  $n_x$  de destino do segmento, e este nó se tornará o novo nó de origem para um novo segmento transparente. Assim o processo é reiniciado até que o nó de destino da rota seja alcançado.

## 3.2 Definindo a Quantidade de Regeneradores

Em um cenário ideal, uma rede óptica elástica apresenta capacidade ilimitada de regeneração, e o bloqueio causado por baixa qualidade do sinal é reduzido. Também é possível realizar, com mais frequência, mudança do intervalo espectral alocado e do nível de modulação ao longo do circuito, quando ocorre regeneração do sinal. Entretanto, empregar na rede uma grande quantidade de regeneradores, a fim de manter sempre regeneradores disponíveis, traz um grande custo de implantação para a rede (CHAVES et al., 2016). Assim, é necessário buscar uma quantidade de regeneradores que traga o maior custo-benefício para a utilização da rede.

A Figura 10 apresenta um fluxograma para a metodologia de avaliação do custo-benefício da utilização de regeneradores. O modelo foi inspirado em (MARANHÃO et al., 2008), que propõe um estudo de custo-benefício da utilização de conversores de comprimento de onda em redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) de arquitetura esparsa, parcial e esparsa-parcial.

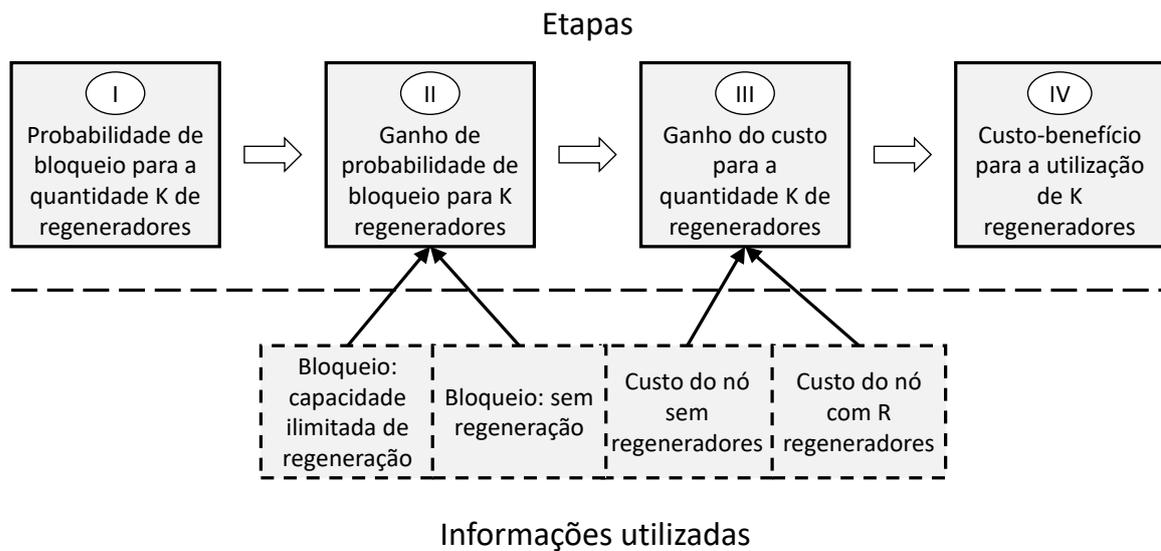


Figura 10 – Fluxograma para metodologia de avaliação de custo-benefício da utilização de regeneradores.

Observando o fluxograma da Figura 10, a etapa I consiste na avaliação da probabilidade de bloqueio para a quantidade  $K$  de regeneradores distribuída na rede. O valor de probabilidade de bloqueio é obtido por meio de simulações. Na etapa II é verificado o ganho de probabilidade de bloqueio obtido da aplicação de  $K$  regeneradores na rede, em comparação com os cenários sem regeneração e de capacidade ilimitada de regeneração. A etapa III consiste na avaliação do custo dos equipamentos empregados na rede, considerando a quantidade de transmissores e regeneradores utilizados entre os nós. A etapa IV é o cálculo do custo-benefício. Cada uma das etapas é explicada com mais detalhes a seguir, no processo de avaliação de desempenho.

A avaliação de desempenho da combinação dos algoritmos de posicionamento e alocação de regeneradores explorados neste trabalho (DA-FNS, DA-FLR, MSU-FNS, MSU-FLR, NDF-FNS e NDF-FLR) é realizada por meio de simulações. A Figura 11 apresenta a topologia EON (*European Optical Network*), utilizada para realização da avaliação de custo-benefício. Foram geradas 100.000 requisições, com os valores de largura de banda das requisições iguais a 10, 40, 80, 100, 160, 200 e 400 Gbps. Os formatos de modulação utilizados foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64 QAM. Cada enlace contém 200 slots, cada um com intervalo de frequência de 12,5 GHz. A carga de tráfego é distribuída uniformemente entre todos os pares  $(o,d)$ . A geração de requisições é um processo de Poisson de taxa de chegada média  $\lambda = 0,0132$  para cada par de nó, e o tempo médio de retenção dos circuitos é distribuído exponencialmente com média 1. Para cada simulação é considerado apenas um ponto de carga, no qual são realizadas 10 replicações. São utilizadas dois slots como banda de guarda em cada requisição.

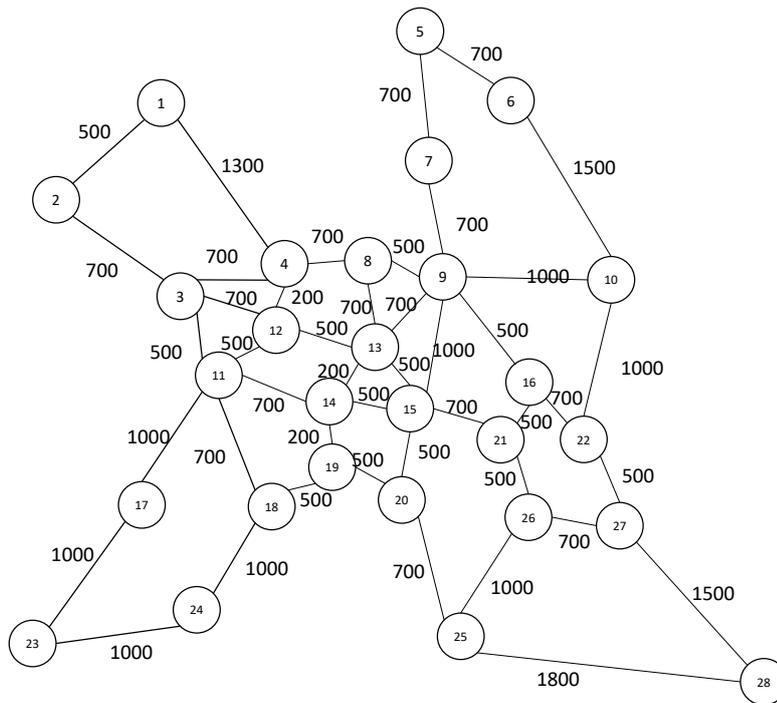


Figura 11 – Topologia EON.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros aplicados na modelagem de camada física utilizada neste trabalho.

Foram feitas simulações a fim de verificar o custo de cada nó da rede e o pico de utilização de regeneradores para cada nó. Para o cálculo do custo do nó, foi levada em consideração a quantidade de transmissores e receptores utilizados simultaneamente. A Figura 12 apresenta o pico de regeneradores utilizados por cada nó. Foi atribuído custo  $c_{TX}=1$  para cada transmissor e receptor utilizado nos nós. Constatou-se que o pico de transmissores utilizados simultaneamente foi 40 . Portanto, ao nó sem regeneradores foi

Tabela 2 – Parâmetros adotados na modelagem da camada física.

Potência na saída do transmissor	0 dBm
Atenuação da fibra	0,2 dB/Km
Parâmetro de dispersão da fibra	16 ps <sup>2</sup> / Km
Coefficiente não-linear da fibra	1,3 (Wkm) <sup>-1</sup>
Tamanho do span	100 Km
Figura de ruído do amplificador	6 dB
Potência de saturação do amplificador	16 dBm

atribuído custo  $c_{(semRegen)}=40$ . O segundo valor verificado foi o pico  $r_{total}$  da quantidade de regeneradores utilizados em cada nó da topologia, considerando um cenário com capacidade ilimitada de regeneração. O pico é utilizado para a distribuição e o posicionamento de regeneradores da política MSU, como detalhado anteriormente.

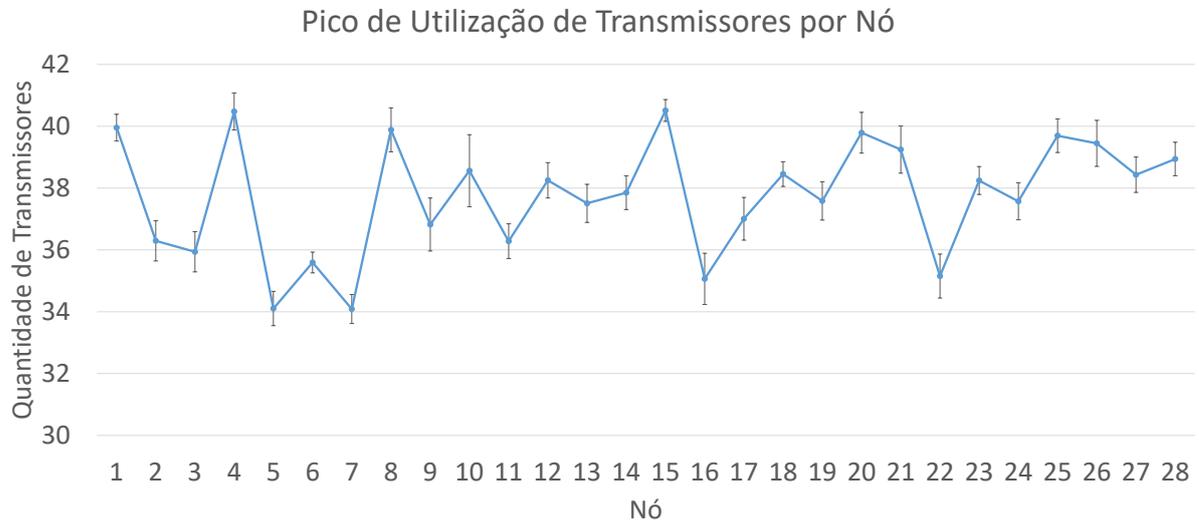


Figura 12 – Pico de utilização de transmissores por nó.

Para a atribuição do custo dos regeneradores, foi considerado o modelo adotado em (EIRA et al., 2012). No trabalho citado, o custo  $r_{unid}$  de um regenerador é equivalente ao custo de um receptor e um transmissor acoplados. Considerando que  $c_{TX}=1$ , o custo de um regenerador é  $r_{unid}=2$ .

### 3.2.1 Etapa I: Probabilidade de Bloqueio

Para o cálculo do custo-benefício, é necessário realizar inicialmente a verificação dos valores de probabilidade de bloqueio para os algoritmos avaliados. A quantidade de regeneradores utilizados no experimento varia entre 25 a 350, com o incremento de 25 a cada nova simulação. Foi escolhido o máximo de 350, pois há pouca variação de probabilidade de bloqueio para maiores quantidades de regeneradores. As Figuras 13 (a) e (b) apresentam os valores de probabilidade de bloqueio considerando os algoritmos FLR e FNS.

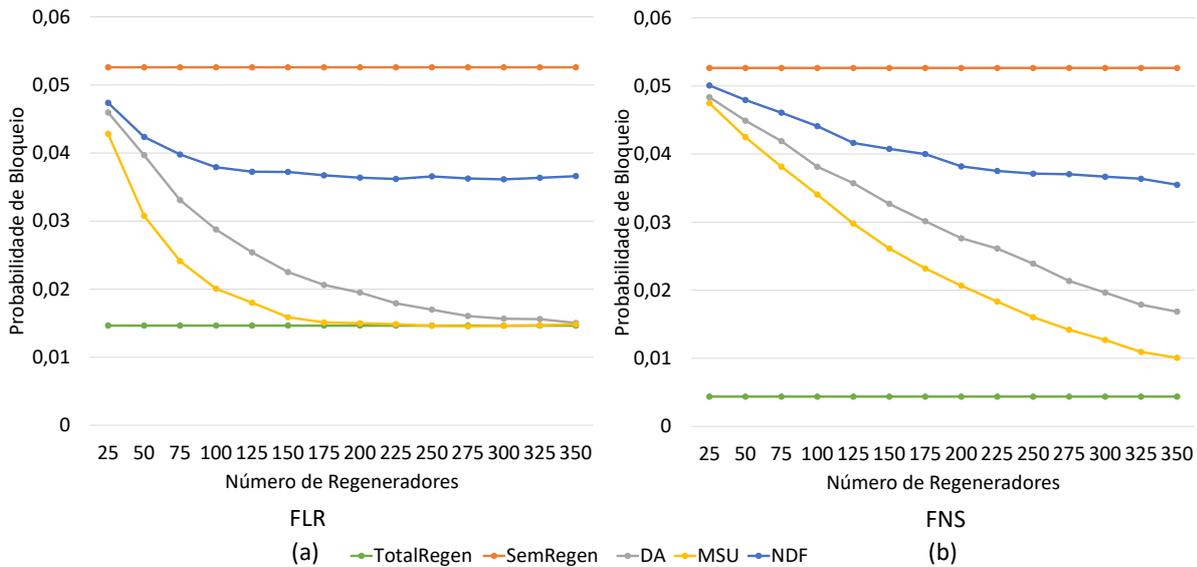


Figura 13 – Probabilidade de bloqueio com a variação da quantidade de regeneradores para os algoritmos de alocação de regeneradores (a) FLR e (b) FNS.

Nota-se que o aumento gradual da quantidade de regeneradores reduz a probabilidade de bloqueio. Isso ocorre porque com um maior número de regeneradores menos requisições sofrem bloqueio por QoT inadequada. Também foram considerados no estudo dois cenários limitantes: o cenário sem regeneradores (rede transparente, resultando no maior valor de probabilidade de bloqueio alcançado no sistema) e o cenário com capacidade ilimitada de regeneração (rede opaca, apresentando o menor valor de probabilidade de bloqueio possível). Assim, é possível ter ideia da proximidade, em termos de probabilidade de bloqueio, dos algoritmos avaliados com o cenário ideal de uma rede óptica opaca.

Para os dois cenários considerados, observando a Figura 13, o algoritmo de posicionamento MSU apresenta melhor desempenho. Isso ocorre porque este algoritmo realiza uma melhor distribuição dos regeneradores disponíveis, levando em conta o pico de utilização de cada um dos nós da topologia. Em seguida, o melhor desempenho é do algoritmo DA. Esse algoritmo distribui a quantidade de regeneradores levando em conta a distância física dos enlaces ligados ao nó. Isso influencia na escolha dos formatos de modulação, pois os nós de enlaces mais longos permitirão a escolha de formatos de modulação mais complexos (mais bits por sinal), uma vez que realizarão regeneração de sinal.

### 3.2.2 Etapa II: Ganho de Desempenho em Termos de Probabilidade de Bloqueio

O segundo passo da metodologia apresentada consiste em calcular o ganho obtido por cada combinação de algoritmo de posicionamento de regeneradores e algoritmo de alocação de regeneradores. Seguindo o modelo proposto em (MARANHÃO et al., 2008), o ganho de desempenho  $G_{PB}$  em termos de probabilidade de bloqueio pode ser calculado da

seguinte forma:

$$G_{PB} = \frac{PB_{semRegen} - PB_K}{PB_{semRegen} - PB_{totalRegen}}, \quad (3.1)$$

no qual  $PB_{semRegen}$  representa a probabilidade de bloqueio de um cenário sem regeneração (rede transparente), da probabilidade de bloqueio  $PB_{totalRegen}$  de um cenário com capacidade ilimitada de regeneração (rede opaca) e da probabilidade de bloqueio  $PB_K$  do cenário considerando a quantidade  $K$  de regeneradores utilizados. A Figura 14 apresenta os resultados de ganho de probabilidade de bloqueio para os algoritmos avaliados.

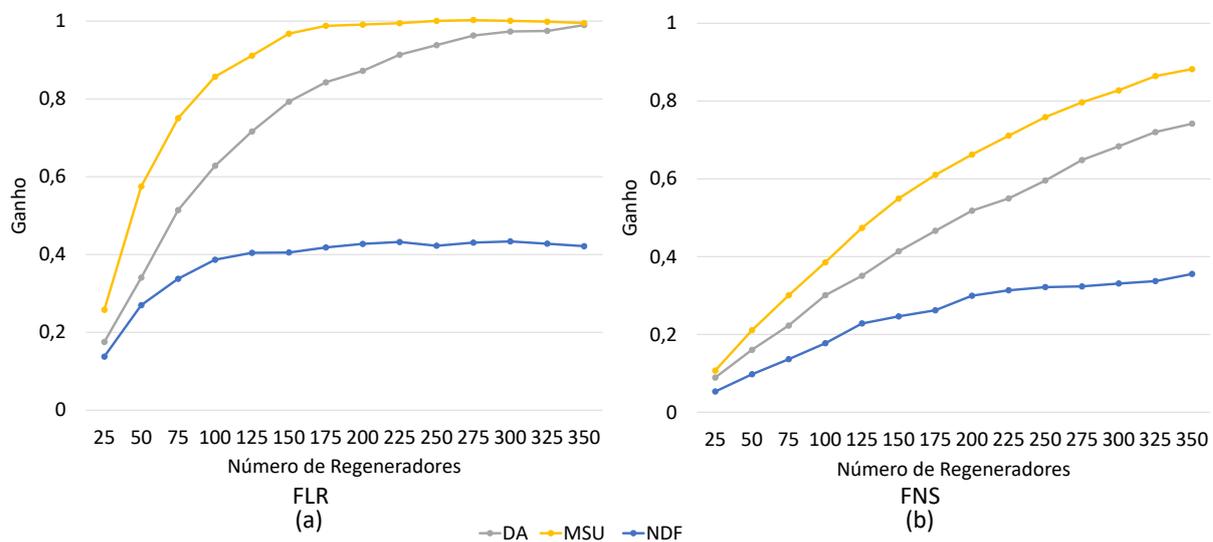


Figura 14 – Ganho de probabilidade de bloqueio com a variação da quantidade de regeneradores para os algoritmos de alocação de regeneradores (a) FLR e (b) FNS.

Como observado anteriormente na Figura 13, a combinação de FLR com MSU resulta em menor probabilidade de bloqueio. Consequentemente, essa mesma combinação tem crescimento mais acentuado do ganho de desempenho em termos de probabilidade de bloqueio. Isso ocorre porque o valor de probabilidade de bloqueio se aproxima do valor encontrado para a simulação com capacidade ilimitada de regeneração. Assim, o valor de ganho, a medida que se aumenta a quantidade de regeneradores, tende a se aproximar de 1, quando alcança desempenho semelhante ao cenário de rede óptica opaca.

Ainda observando a Figura 14 (a), nota-se a estabilização do ganho do NDF em um valor abaixo de 0,5. Isso ocorre porque este algoritmo seleciona uma quantidade  $n$  de nós para serem nós regeneradores, no qual  $n$  é menor do que a quantidade de nós da topologia. Após a seleção dos  $n$  nós, ocorrerá a distribuição de regeneradores apenas nos  $n$  nós escolhidos. Quando esses nós atingem o seu potencial máximo de regeneração, a utilização de novos regeneradores causa impacto negativo no custo, pois não reduz o valor

de probabilidade de bloqueio da rede, uma vez que os nós não alocam os regeneradores excedentes. Assim, não é recomendada a utilização desses regeneradores excedentes, já que aumentam o custo e trazem reduzido benefício para a rede. A Figura 14 também apresenta redução do ganho para o NDF, devido ao mesmo problema.

### 3.2.3 Etapa III: Ganho de Custo por Quantidade de Regeneradores

A terceira etapa da metodologia consiste em verificar o ganho no custo dos equipamentos, considerando a quantidade de regeneradores utilizados nos diferentes cenários avaliados. Para avaliar o ganho de custo  $G_{custo}$ , a seguinte fórmula é proposta:

$$G_{custo} = \frac{C_K}{C_{semRegen}}, \quad (3.2)$$

na qual  $C_{semRegen}$  é o custo do nó sem regeneradores, e  $C_K$  é o custo do nó com  $K$  regeneradores. A Tabela 3 apresenta o valor de custo para a rede com o incremento da quantidade utilizada de regeneradores, juntamente com o ganho de custo correspondente.

Tabela 3 – Ganho de custo por quantidade de regeneradores.

Quantidade de Regeneradores	Custo	Ganho de Custo
0	40	1
25	90	2,25
50	140	3,5
75	190	4,75
100	240	6
125	290	7,25
150	340	8,5
175	390	9,75
200	440	11
225	490	12,25
250	540	13,5
275	590	14,75
300	640	16
325	690	17,25
350	740	18,5

De acordo com a Tabela 3, ao nó sem regeneração foi atribuído custo 40, correspondendo ao pico de utilização de transmissores observado anteriormente na Figura 12. O custo atribuído a um regenerador é igual a 2, e o custo de um nó é igual ao custo do nó sem regeneradores (40) mais duas vezes a quantidade de regeneradores posicionados no nó.

### 3.2.4 Etapa IV: Custo-Benefício

Após calcular o ganho de probabilidade de bloqueio e o ganho de custo por quantidade de regeneradores, a quarta etapa da metodologia consiste em utilizar a seguinte

equação para a avaliação do custo-benefício entre a probabilidade de bloqueio e o custo financeiro da rede:

$$G = \frac{G_{PB}}{G_{custo}}, \quad (3.3)$$

em que o ganho de probabilidade de bloqueio  $G_{PB}$  e o ganho de custo por quantidade de regeneradores  $G_{custo}$  podem ser encontrados seguindo as Equações 3.1 e 3.2, respectivamente. Assim, é encontrado um valor de custo-benefício para cada combinação de algoritmos de posicionamento e alocação de regeneradores. As Figuras 15 (a) e (b) apresentam os resultados gráficos para o estudo de custo-benefício dos algoritmos avaliados.

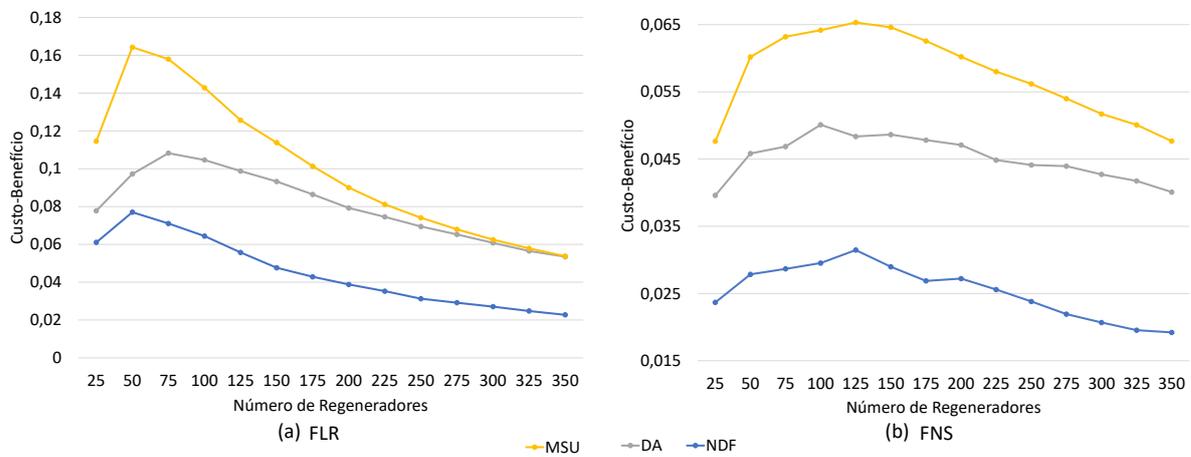


Figura 15 – Custo-benefício para os algoritmos de alocação de regeneradores (a) FLR e (b) FNS.

Ainda sobre as figuras 15 (a) e (b), nota-se que cada algoritmo executado apresenta um pico de custo-benefício. É neste ponto em que se tem melhor ganho de probabilidade de bloqueio por custo da rede. O algoritmo de posicionamento MSU obteve melhor custo-benefício utilizando os algoritmos de alocação de regeneradores FLR e FNS. O valor de custo-benefício se aproxima de 0 a medida em que se aumenta a quantidade de regeneradores utilizados na rede. Isso ocorre porque o ganho de probabilidade de bloqueio se estabiliza com o aumento do número de regeneradores, enquanto o custo da quantidade de regeneradores aumenta. Assim, a utilização de uma grande quantidade de regeneradores, a partir de 200, por exemplo, não traz muitos benefícios para a operação da rede estudada.

A metodologia proposta permite avaliar os diferentes algoritmos de posicionamento e alocação de regeneradores, e observar o quão viável é investir no crescimento do número de regeneradores em determinada topologia, sob determinada carga. A relação de custo dos equipamentos é crucial para o cálculo de custo-benefício. É importante destacar que o custo dos equipamentos pode variar bastante entre si (custo de transmissores, receptores e regeneradores), o que pode impactar no resultado de custo-benefício. Além disso, esse

valor é bastante flexível, podendo englobar também o custo energético da utilização dos equipamentos. A metodologia descrita pode ser adaptada para considerar diferentes informações relativas ao custo.

O próximo capítulo apresenta a proposta de um algoritmo RA denominado ARTO, que é comparado com os algoritmos FLR e FNS, também para alocação de regeneradores.

## 4 ARTO: Alocação de Regeneradores com Tonificação de Circuito

Este capítulo apresenta a modelagem do algoritmo ARTO (Alocação de Regeneradores com Tonificação de Circuito), juntamente com os resultados obtidos em comparação aos algoritmos FLR e FNS de alocação de regeneradores existentes na literatura.

### 4.1 Tonificação de Circuito

A presença de regeneradores na rede viabiliza a utilização de diferentes intervalos de slots e níveis de modulação para um mesmo circuito. Assim, há maior flexibilidade durante a fase de escolha de nível de modulação do sinal óptico. A fim de obter maior proveito da flexibilidade de escolha do formato de modulação, o algoritmo para Alocação de Regeneradores com Tonificação de Circuito (ARTO) é proposto neste trabalho. A aplicação do algoritmo aumenta a resistência dos circuitos a serem estabelecidos, reduzindo o bloqueio por QoTO, causando baixo impacto as outras componentes de bloqueio e, conseqüentemente, reduzindo o bloqueio geral de circuitos na rede.

Inicialmente, o algoritmo busca realizar regeneração em um nó mais distante do nó de origem e que tenha regeneradores livres. Após a escolha dos nós que serão utilizados para regeneração na rota, o algoritmo força a utilização do nível de modulação mais complexo em cada um dos segmentos transparentes da rota. Para cada segmento, é definida a quantidade de slots a serem utilizados. O número de slots  $s$  utilizados para cada segmento é definido pela Equação 4.1 (GAO et al., 2014):

$$s = \frac{\Delta B}{\Delta s}, \quad (4.1)$$

onde  $\Delta s$  é a largura de banda de um slot (geralmente 12,5GHz) e  $\Delta B$  representa o espaçamento do canal óptico a ser estabelecido, considerando a soma da largura de banda do canal ( $B_s$ ) e a largura de banda consumida pelas bandas de guarda ( $\Delta G$ ). O valor de  $B_s$  pode ser encontrado pela Equação 4.2 (GAO et al., 2014):

$$B_s = \frac{1.1 * B_n * (1 + F)}{2 * \log_2(L)}, \quad (4.2)$$

onde  $B_n$  é a largura de banda da requisição,  $F$  representa o valor de FEC (*Forward Error Correction*) e  $L$  é o nível de modulação escolhido para o segmento.

Após a verificação da quantidade de slots, o algoritmo ARTO tenta "tonificar" o circuito, alterando o nível de modulação para outro, tentando proporcionar maior resistência ao ruído. A tonificação é um dos diferenciais do ARTO, pois grande parte dos trabalhos sempre forçam a aplicação do nível de modulação mais complexo e viável. Entretanto, o algoritmo só realiza a troca do formato de modulação se o nível mais robusto utilizar a mesma quantidade de slots do que o formato escolhido na primeira fase. Caso ocorra aumento do número de slots, então o algoritmo mantém o nível de modulação escolhido para o segmento na primeira fase. A Figura 16 exemplifica a alteração de formato de modulação em um mesmo enlace.

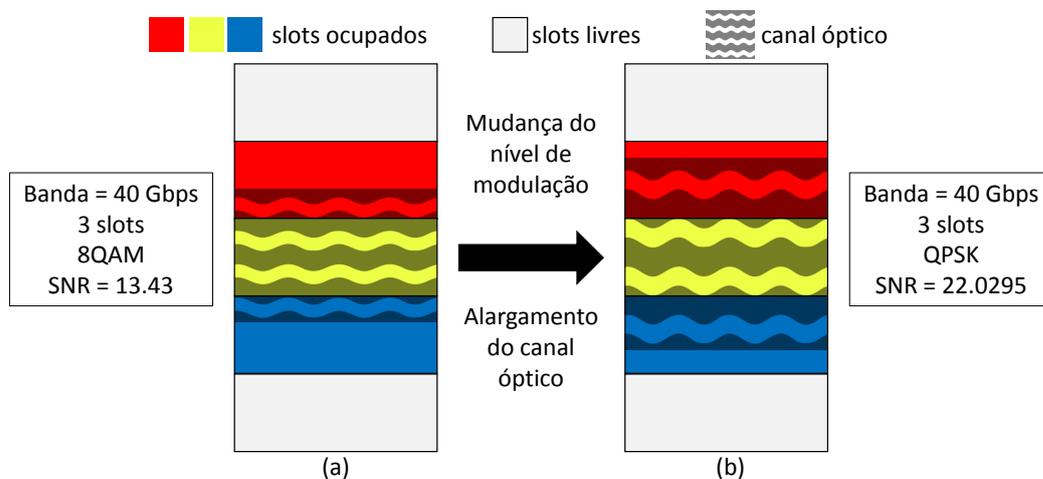


Figura 16 – Exemplo de alteração de formato de modulação em um mesmo enlace, utilizando os formatos (a) 8QAM e (b) QPSK.

Nota-se que ocorre um alargamento do canal óptico, pois o nível de modulação mais robusto (Figura 16 (b)) necessita de maior canal para transmissão da mesma quantidade de símbolos transmitidos pelo canal da Figura 16 (a). Pode-se perceber também que o nível de SNR para o segmento é aumentado, se distanciando do limiar de SNR (ver na Tabela 1), que também sofre redução devido à troca do nível de modulação. É importante observar que a largura de banda da requisição não é alterada, e os mesmos 3 slots são utilizados nos dois casos. Se nesse mesmo exemplo, o circuito em questão passasse a utilizar 4, 5 ou mais slots, a mudança do nível de modulação seria evitada. O Algoritmo 1 apresenta a implementação do ARTO.

No primeiro laço (linhas 5 a 12), é realizada a busca dos nós que realizam regeneração. O primeiro nó regenerador escolhido é aquele anterior ao nó em que se detecta o SNR abaixo do limiar, e que tenha regeneradores livres. A partir de então, o nó escolhido passa a ser a nova origem, e o procedimento se repete até chegar ao nó de destino. No segundo laço (linhas 16 a 29) ocorre a verificação dos formatos de modulação adotados nos segmentos. Se é possível reduzir o formato para um mais robusto (linhas 20 a 25), que utilize a mesma quantidade de slots do formato adotado, a troca é realizada (linha 22).

**Algorithm 1** pseudo-código ARTO

---

```

1: função ARTO(modulações m, Rota R, Largura de banda bw)
2:   t = tamanho(R)
3:   a = 0 ▷ Nó de origem
4:   listaNosRegeneradores = vazio ▷ Lista de nós regeneradores escolhidos
5:   para i faça i = a até t - 1 ▷ Percorre lista de nós
6:     se  $SNR_{par(a,i)} < \text{limiar}$  então ▷ se SNR é inadequado
7:       noEsc = i ▷ escolhe nó atual
8:       enquanto naoContemRegeneradorLivre(noEsc) faça
9:         noEsc = i - 1 ▷ Volta para nó anterior se não tem regenerador livre
10:      fim enquanto
11:      listaNosRegeneradores+ = noEsc ▷ noEsc adicionado a lista de nós regeneradores
12:    fim se
13:    a = noEsc
14:  fim para
15:  a = 0 ▷ Nó de origem
16:  para x faça x = a até t - 1 ▷ Percorre lista de nós
17:    se x existe em listaNosRegeneradores ou x = (t - 1) então
18:      mod = modulação mais complexa para o segmento(a,x)
19:      n = numSlots(bw, mod) ▷ num de slots utilizados por bw com modulação
20:      para j faça j = 0 até m ▷ Percorre lista de modulações
21:        se se numSlots(bw, j) = n AND j < mod então
22:          mod = j ▷ Atribui modulação mais robusta
23:          quebra
24:        fim se
25:      fim para
26:      adiciona mod como modulação para o segmento(a,i)
27:      a = i
28:    fim se
29:  fim para
30: fim função

```

---

A análise de complexidade do ARTO é separada em duas etapas. A primeira consiste em buscar os nós regeneradores, em que todos os nós da rota são percorridos. Após, todos os formatos de modulação são avaliados para cada segmento óptico. Considerando que uma rota pode ter até  $N$  nós (em que  $N$  é o total de nós da topologia), e são utilizados  $M$  formatos de modulação, a complexidade da primeira fase é  $O(N * M)$ . Na segunda etapa, cada segmento óptico é avaliado independentemente. Considerando uma rota com  $N$  nós, a quantidade máxima de segmentos formados é de  $(N - 1)$ . Durante a avaliação de cada segmento, os formatos de modulação mais robustos do que o adotado na primeira fase são verificados. Portanto,  $(M - 1)$  formatos de modulação são avaliados. Assim, a execução do ARTO tem complexidade igual a  $O((N * M) + (N - 1) * (M - 1))$ .

## 4.2 Avaliação de Desempenho

As topologias NSFNet (rede americana com 14 nós, 22 enlaces e tamanho médio dos enlaces igual a 1936 km, apresentada na Figura 8) e EON (rede europeia com 28 nós e 44 enlaces e tamanho médio dos enlaces igual a 725 km, apresentada na Figura 11) (ZHAO; VOKKARANE, 2016) foram utilizadas na avaliação de desempenho apresentada.

A ferramenta SNetS (BRASILEIRO; JÚNIOR; SOARES, 2016) (FONTINELE et al., 2016) foi utilizada para simulação dos cenários apresentados neste trabalho. Todos os enlaces nas topologias avaliadas são bidirecionais. A carga de tráfego é distribuída de modo uniforme entre todos os  $pares(o, d)$ . As requisições são geradas seguindo um processo de Poisson de média  $\lambda$ , com tempo de retenção distribuído exponencialmente de média  $1/\mu$ . A geração de larguras de banda ocorre de maneira uniforme para todos os valores de largura de banda utilizados. Foi adotado um intervalo de confiança considerando o nível de segurança igual a 95%. A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados para as simulações.

Tabela 4 – Parâmetros de simulação aplicados nas topologias EON e NSFNet.

Parâmetros	
Número de Requisições	100.000
Quantidade de Replicações	10
Pontos de Carga	5
Slots por Enlace	400
Intervalo de Frequência ( <i>slot</i> )	12,5 GHz
Largura de Banda das Requisições	10, 20, 30... ,200 Gbps

O algoritmo ARTO é avaliado e comparado com outros dois algoritmos de alocação de regeneradores discutidos na literatura de redes ópticas: FLR e FNS (CHAVES et al., 2016). Para realizar o posicionamento de regeneradores, é aplicado o algoritmo MSU (CHAVES et al., 2016). A topologia NSFNet conta com 100 regeneradores, e a topologia EON com 150 regeneradores. Estes valores foram encontrados no estudo de custo-benefício apresentado anteriormente (Seção 3.2). A técnica de roteamento utilizada é o clássico algoritmo de Dijkstra (DJK) (DIJKSTRA, 1959), e para alocação de espectro, é utilizada a política *FirstFit* (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). A Tabela 4 apresenta as parametrizações aplicadas às duas topologias. A Figura 17 apresenta o valor de (a) probabilidade de bloqueio de circuito e (b) ganho para a topologia NSFNet.

O algoritmo ARTO realiza tonificação de alguns circuitos no momento do estabelecimento. A aplicação de formatos de modulação mais robustos torna o circuito mais resistente aos efeitos e degradações proveniente do meio físico. Inicialmente, ao forçar a utilização do formato de modulação mais eficiente possível, é obtida a quantidade mínima viável de slots para o circuito em questão. Após, ao buscar formatos de modulação mais complexos que utilizam a mesma quantidade de slots, o algoritmo fortalece o circuito sem penalizar na utilização espectral do mesmo. Assim, o algoritmo ARTO permite o

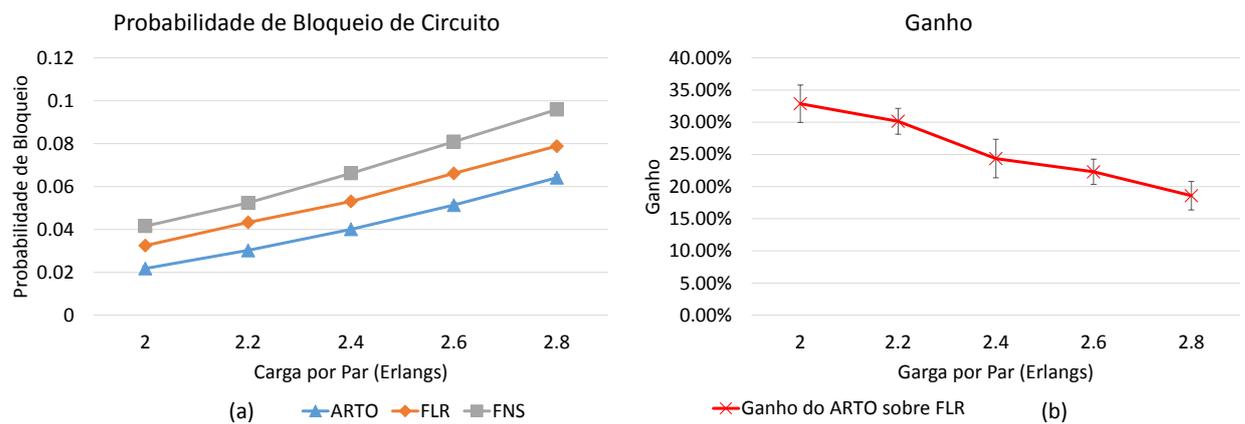


Figura 17 – Resultados gráficos de (a) probabilidade de bloqueio de circuito e (b) ganho do ARTO sobre o FLR para a topologia NSFNet.

estabelecimento de circuitos mais resistentes, reduzindo o impacto causado pelos circuitos que ainda serão estabelecidos, obtendo menor probabilidade de bloqueio quando comparado aos algoritmos FLR e FNS, na Figura 17 (a). A Figura 17 representa o ganho, em porcentagem, de probabilidade de bloqueio do ARTO sobre o algoritmo FLR. Nota-se que o algoritmo proposto obtém ganho médio de 32,88% para o ponto de carga mais baixo, e 18,58% para o cenário de carga mais alta. A Figura 18 apresenta a decomposição do valor de probabilidade de bloqueio para os algoritmos ARTO e FLR na topologia NSFNet.

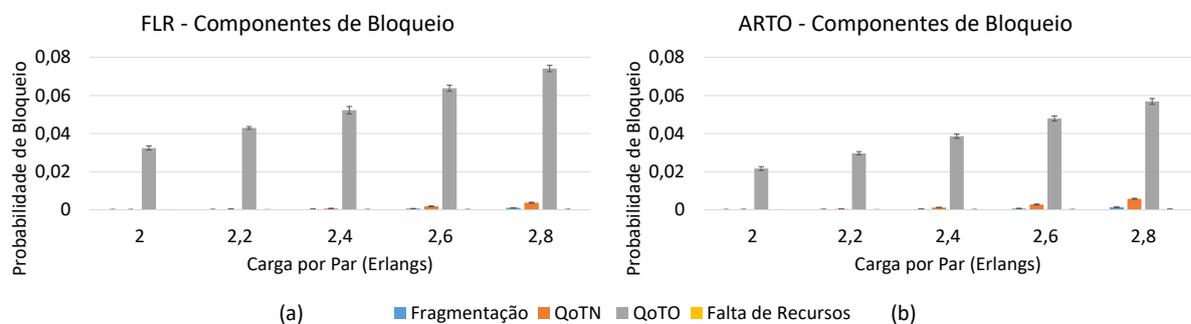


Figura 18 – Componentes da Probabilidade de Bloqueio para os algoritmos (a) FLR e (b) ARTO na topologia NSFNet.

Na Figura 17, nota-se que o crescimento da carga na rede acarreta o aumento da quantidade de circuitos bloqueados. As Figuras 18 (a) e (b) apresentam graficamente os mesmos valores de probabilidade de bloqueio do gráfico da Figura 17 para os algoritmos ARTO e FLR, decomposto em bloqueio por Fragmentação, por QoTN, por QoTO e por falta de recursos disponíveis. Dentre as componentes da probabilidade de bloqueio, é notável o maior destaque do bloqueio causado pela redução de QoT para níveis intoleráveis nos circuitos já ativos na rede. A ocorrência de bloqueio por QoTO inadequado é reduzido com aplicação do ARTO, pois parte dos circuitos já estabelecidos se torna mais resistente ao impacto do estabelecimento de novos circuitos. A Figura 19 apresenta uma comparação individual entre as componentes de bloqueio.

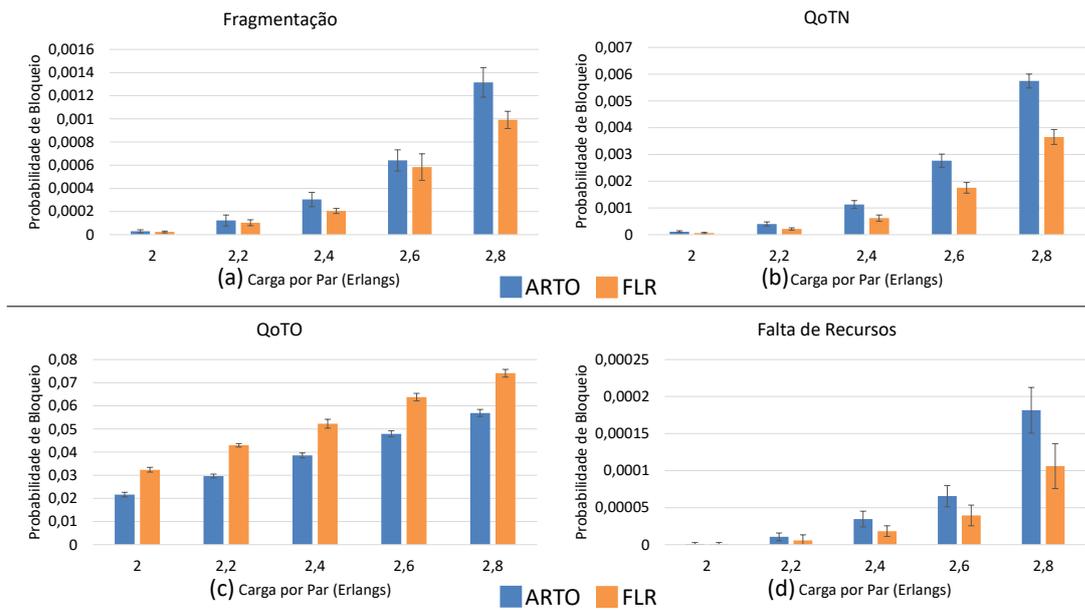


Figura 19 – Componentes de probabilidade de bloqueio: (a) fragmentação, (b) QoTN, (c) QoTO e (d) falta de recursos, para a topologia NSFNet.

A aplicação do ARTO reduz o impacto causado por níveis inadequados de QoTO, principal atuante na probabilidade de bloqueio. Para as outras métricas, ocorre um pequeno aumento no valor médio de bloqueio. Para as métricas de (a) fragmentação e (d) falta de recursos, o aumento médio do bloqueio é justificado pela maior utilização do espectro, pois o ARTO reduz a probabilidade de bloqueio, resultando em mais circuitos estabelecidos. Para a métrica de QoTN, o aumento de bloqueio para o ARTO está relacionado com a presença de mais circuitos ativos simultaneamente, o que resulta no aumento do ruído que impacta o circuito a ser estabelecido. Entretanto, o aumento do bloqueio das métricas de fragmentação, QoTN e falta de recursos possui impacto reduzido quando comparado ao QoTO, principal alvo do ARTO. Além disso, é notável a semelhança dos valores encontrados, observando a abrangência dos intervalos de confiança.

Uma análise da probabilidade de bloqueio resultante para cada largura de banda foi realizada, a fim de observar em que faixa de tráfego se tem maior vantagem de utilização do ARTO. A Figura 20 apresenta o resultado de probabilidade de bloqueio de banda do ARTO e do FLR e o ganho da probabilidade de bloqueio de banda para o ARTO sobre o FLR, para o último ponto de carga avaliado na Figura 17.

Ainda na Figura 20, observa-se uma maior redução do bloqueio para requisições de menor largura de banda. Isso ocorre devido à alteração da quantidade de slots exigidos para os circuitos quando se troca a modulação aplicada. Requisições com menores larguras de banda mantêm a mesma quantidade de slots por mais formatos de modulação, uma vez que sempre precisam de menor intervalo de frequência. Já para as requisições de maior largura de banda, existe maior sensibilidade da quantidade de slots à alteração do

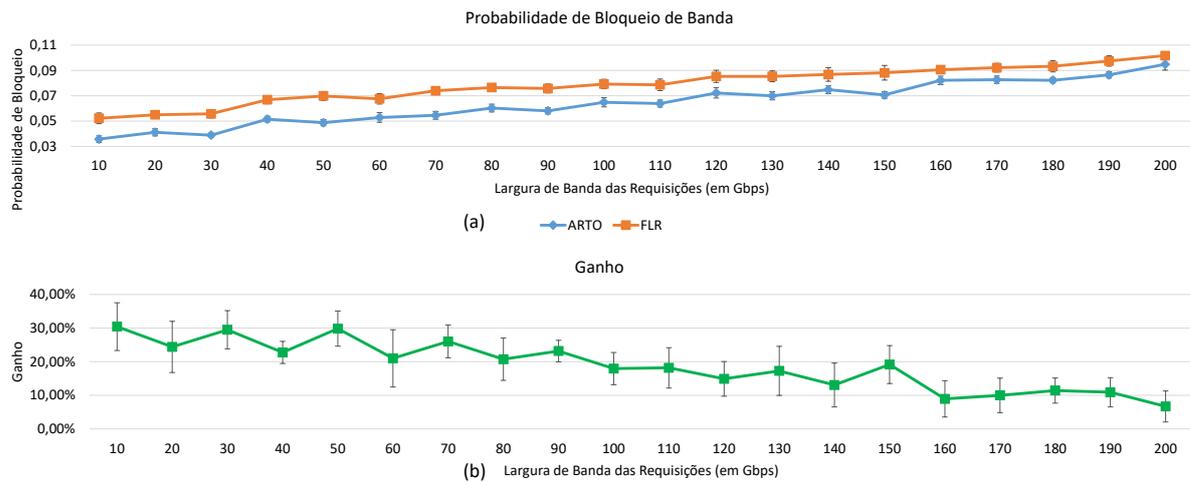


Figura 20 – Resultados gráficos de (a) probabilidade de bloqueio de banda e (b) ganho de probabilidade de bloqueio de banda do ARTO sobre o FLR para a topologia NSFNet.

formato de modulação, pois serão necessários mais slots para conter o alargamento do canal óptico. Portanto, a aplicação do ARTO é indicada para cenários com configuração de tráfego mais intensa nas larguras de banda mais baixas, tornando-as mais resistente para o estabelecimento dos circuitos de largura de banda mais alta.

É importante destacar que a topologia NSFNet apresenta enlaces mais longos (média de 1.936 km), o que intensifica os efeitos de camada física, pois o sinal óptico precisa percorrer distâncias mais longas até chegar a um regenerador. O mesmo estudo foi realizado com a topologia EON, que apresenta enlaces mais curtos (valor médio igual a 725 km). A Figura 21 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio de circuito e de ganho de probabilidade de bloqueio para a topologia EON.

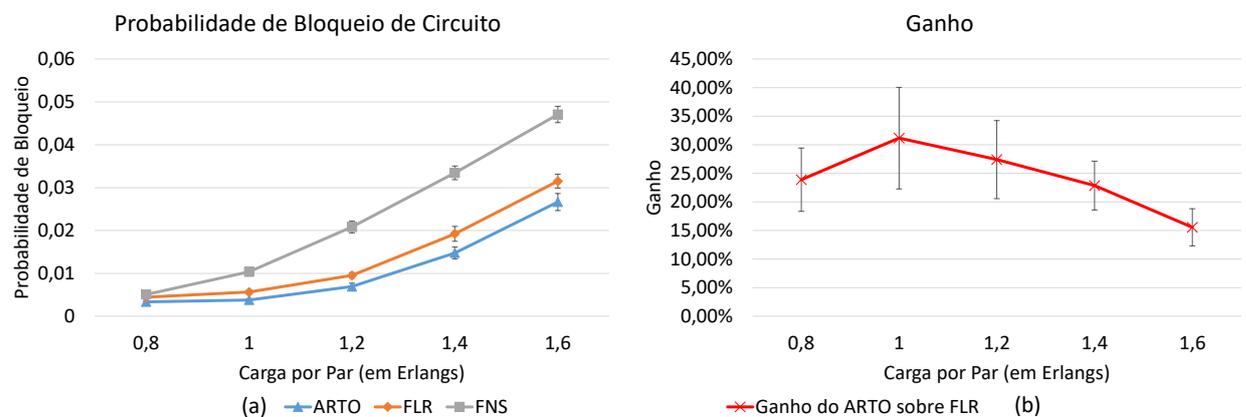


Figura 21 – Resultados gráficos de (a) probabilidade de bloqueio de circuito e (b) ganho de probabilidade de bloqueio do ARTO sobre o FLR para a topologia EON.

No caso da EON, observa-se que percorrer menores distâncias entre os nós da rede torna o sinal óptico menos suscetível a falhas ocasionadas por imperfeições de camada física.

Isso acaba reduzindo o bloqueio causado por valores inadequados de QoT. Além disso, os circuitos são capazes de utilizar formatos de modulação mais complexos, necessitando assim de menos slots para o estabelecimento. Assim, a eficácia do ARTO sofre uma pequena redução. No entanto, ainda apresenta ganho relativo entre 30% e 15% em comparação ao concorrente de valor mais próximo. A Figura 22 apresenta as componentes de bloqueio para (a) FLR e (b)ARTO para a topologia EON. Os valores de média encontrado pelos 4 primeiros pontos de carga na Figura 21 não apresentam diferença significativa, pois ocorre sobreposição dos intervalos de confiança apresentados.

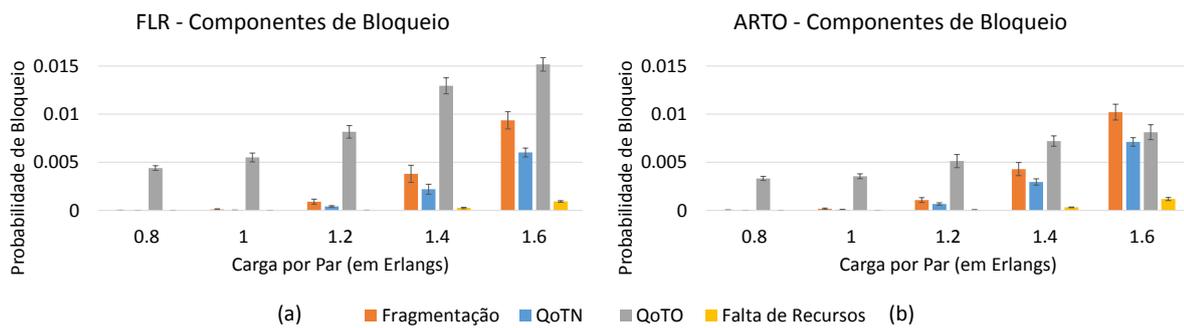


Figura 22 – Componentes da Probabilidade de Bloqueio para os algoritmos (a) FLR e (b) ARTO na topologia EON.

Nota-se na Figura 22 maior impacto do bloqueio por fragmentação e por QoTN inadequado, quando comparado ao cenário da NSFNet (Figura 18). Por usar a política *first fit*, o intervalo espectral de slots a ser alocado é o primeiro intervalo viável para a requisição. Entretanto, a maior proximidade dos circuitos causa maior interferência, como observado em (BEYRANVAND; SALEHI, 2013). Assim, os slots vão sendo alocados com certo espaçamento, a fim de promover impacto reduzido entre os circuitos de alta exigência de SNR, o que causa aumento do problema de fragmentação.

O estabelecimento de novos circuitos também é prejudicado por esse problema, pois há maior dificuldade de encontrar um intervalo no espectro que sofra menor impacto proveniente dos outros circuitos espalhados no espectro óptico. A Figura 23 apresenta uma comparação individual entre as componentes de bloqueio do (a) FLR e do (b) ARTO para a topologia EON.

A maior vantagem na utilização do ARTO está na redução do QoTO, pois os circuitos tonificados apresentam redução do limiar de SNR e aumento do seu nível de SNR. Portanto, esses circuitos sofrem menor impacto na fase de estabelecimento de novos circuitos na rede. Na Figura 23 nota-se que há pouca diferença de desempenho entre as outras componentes de bloqueio.

A Figura 24 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio de largura de banda para a topologia EON, considerando o último ponto de carga avaliado na Figura 21.

Verifica-se na Figura 24 que a aplicação do ARTO traz mais benefícios para as

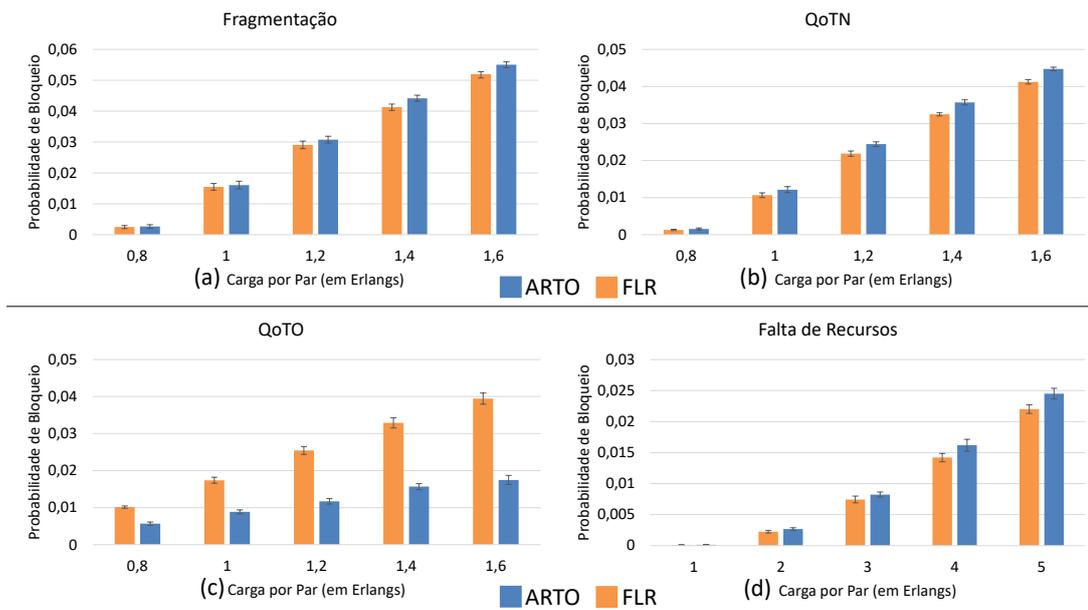


Figura 23 – Componentes de probabilidade de bloqueio: (a) fragmentação, (b) QoTN, (c) QoTO e (d) falta de recursos, para a topologia EON.

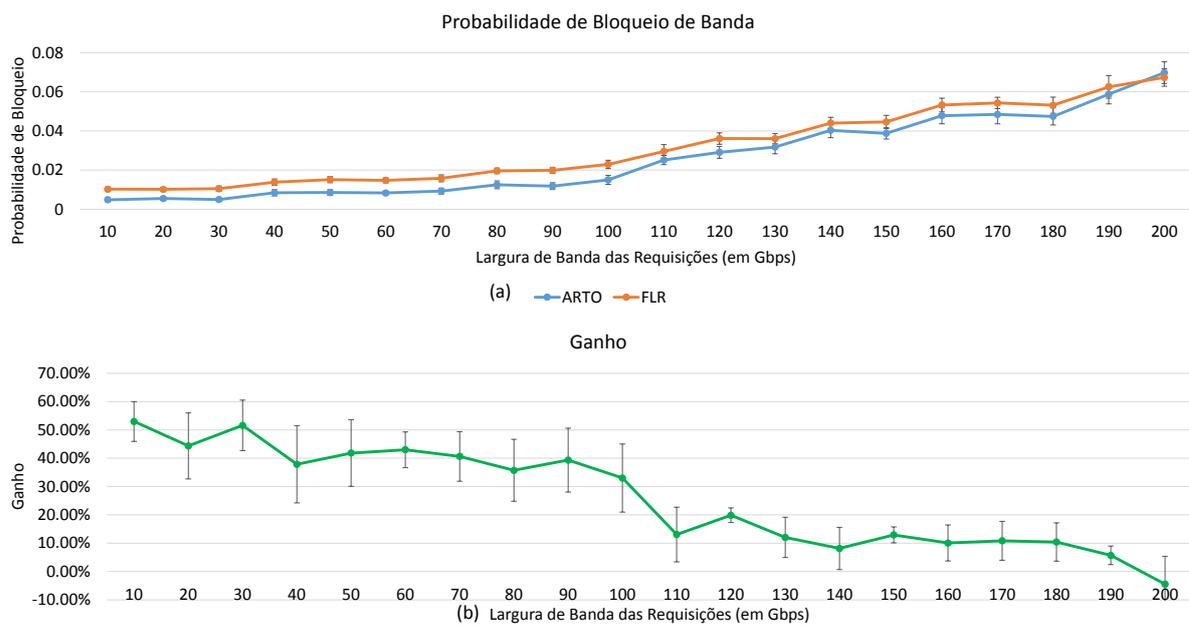


Figura 24 – Resultados gráficos de (a) probabilidade de bloqueio de banda e (b) ganho de probabilidade de bloqueio de banda do ARTO sobre o FLR para a topologia EON.

menores larguras de banda, devido à menor variação da quantidade de *slots* que elas apresentam para os formato de modulação. Mesmo apresentando baixo ganho para as requisições de maior largura de banda, existe uma compensação na redução do bloqueio das requisições de menor largura de banda, de forma a reduzir o bloqueio geral.

Dessa forma, verificou-se para os dois cenários que a proposta ARTO é eficiente para aplicação da técnica de alocação de regeneradores, reduzindo o bloqueio devido ao

QoTO inadequado dos circuitos, uma vez que estes passam a utilizar níveis de modulação com mais robustez, sem perder em eficiência espectral. Adicionalmente, quando o ARTO é comparado aos dois principais algoritmos da literatura (FLR e FNS), o algoritmo proposto apresentou melhor desempenho, reduzindo a probabilidade de bloqueio de circuito geral da rede.

Este capítulo apresentou o algoritmo ARTO para alocação de regeneradores. Também é apresentada a avaliação de desempenho do algoritmo proposto, na qual é feita a comparação com os algoritmos FLR e FNS, também para alocação de regeneradores. O próximo capítulo apresenta as conclusões deste trabalho de mestrado, e algumas considerações para trabalhos futuros.

## 5 Conclusões

Para suportar a crescente demanda por banda e garantir atendimento a diferentes tipos de circuitos, é necessária uma estrutura de rede que forneça suporte ao crescente tráfego. Assim, surgem as Redes Ópticas Elásticas, que utilizam a luz como vetor de dados, por meio de diferentes intervalos de frequência, denominados *slots*, que operam de forma independente. Esses intervalos podem ser agrupados para atender requisições que necessitem de maior largura de banda, garantindo flexibilidade para estabelecimento de circuitos com maior necessidade de banda passante.

Otimizar a utilização dos recursos e, conseqüentemente, melhorar o desempenho da rede, é uma tarefa que envolve a resolução de uma série de problemas. Um deles é nomeado RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation*), que consiste no problema de roteamento, escolha do formato de modulação e alocação espectral. Também é importante levar em consideração os efeitos de camada física, uma vez que estes tornam a modelagem do sistema mais parecida com o modelo real. A degradação do sinal deve ser considerada, para evitar a utilização de rotas e formatos de modulação que seriam inviáveis em um caso real.

Ao considerar os efeitos físicos e a degradação do sinal óptico, é importante destacar que existem equipamentos capazes de restaurar a qualidade do sinal óptico. Os regeneradores permitem renovar o sinal óptico, retransmitindo na fibra um sinal livre de ruído, semelhante ao sinal transmitido pelo nó de origem.

A utilização de regeneradores reduz o impacto dos efeitos de camada física na rede, permitindo o atendimento de mais requisições de circuito. Observa-se a redução da probabilidade de bloqueio com o aumento do número de regeneradores empregados na rede. A metodologia de custo benefício proposta neste trabalho permite verificar em qual ponto se tem o melhor ganho com o crescimento do número de regeneradores. Considerando a topologia EON, é observado que o algoritmo de posicionamento MSU, juntamente com o algoritmo de alocação FLR, apresenta melhor desempenho, e possui um custo-benefício maior com a utilização de 100 a 200 regeneradores, valores para os quais se tem maior redução de bloqueio por quantidade de regenerador aplicado na rede.

Neste trabalho foi proposto um algoritmo para alocação de regeneradores nas redes ópticas elásticas. O algoritmo ARTO busca alocar a quantidade de slots utilizados pelo nível de modulação viável e mais complexo. Após a definição da quantidade de slots, o ARTO busca alterar o nível de modulação para o mais robusto e que continue a utilizar a mesma quantidade de slots definida. O algoritmo proposto foi comparado com os outros algoritmos da literatura (FLR e FNS), e obteve melhor desempenho para os cenários

estudados. Em relação ao FLR (concorrente de melhor desempenho) o ARTO apresentou ganho entre 32,88% e 18,58% na topologia NSFNet e entre 30% e 15% na topologia EON. O ARTO é capaz de reduzir o bloqueio causado pela redução para níveis intoleráveis da QoT dos circuitos já ativos na rede (QoTO) no momento de estabelecimento de um novo circuito. A técnica proposta reforça a qualidade do sinal de alguns circuitos estabelecidos, resultando em melhor aproveitamento dos recursos da rede.

Como trabalhos futuros, o ARTO será avaliado em cenários com quantidades de regeneradores diferentes das encontradas pelo estudo de custo benefício, a fim de detectar alguma relação entre o ARTO e a variação da quantidade de regeneradores. Além disso, o algoritmo será aplicado em cenários de maior e menor variação de larguras de banda, como tentativa de notar o impacto da utilização de diferentes faixas de larguras de banda. Outro estudo importante é considerar a aplicação do ARTO em um cenário de tráfego não-uniforme, em que há maior semelhança com o tráfego operado nas redes em funcionamento.

# Apêndices



# APÊNDICE A – Sistema *Fuzzy Para Roteamento*

Este apêndice apresenta o trabalho "Nova Solução para o Problema de Roteamento em Redes Ópticas Elásticas Utilizando Algoritmo Ciente de Fragmentação Baseado em Sistemas Fuzzy" (BRASILEIRO; JÚNIOR; SOARES, 2016), resultado da avaliação de algoritmos que foram propostos para cenários de redes ópticas sem consideração das interferências provenientes do meio físico. O algoritmo proposto utiliza informações da rota, como número de slots ocupados, o índice do primeiro slot livre e a fragmentação relativa. Essas informações passam por um sistema *fuzzy*, que decide na fase operacional da rede qual rota será utilizada para o estabelecimento do circuito. Antes da apresentação do trabalho, é feita uma revisão de alguns conceitos relacionados a sistemas *fuzzy*.

## A.1 Conceitos de sistemas *fuzzy*

A lógica *fuzzy* é utilizada para representar tipos de raciocínio que não são exatos, e sim aproximados ou qualitativamente incompletos, o que a torna uma alternativa para o sistema tradicional, no qual se tem os valores exatos de *verdadeiro* ou *falso* (1 ou 0, *sim* ou *não*). Essa capacidade de gerar respostas sobre um conjunto de informações imprecisas e vagas é o que traz força à lógica *fuzzy* (CAVALCANTI et al., 2012). O termo *fuzzy* é uma palavra da língua inglesa, e significa *incerto, vago, nebuloso* (mais utilizado pela comunidade científica) (MARRO et al., 2010).

A lógica tradicional necessita de regras bem definidas para estabelecer em que conjuntos devem ser atribuídos os objetos. Termos como "alto" ou "baixo", "leve" ou "pesado" são separados por linhas bem definidas, o que impede o uso das duas ou de um meio termo (meio pesado, mais ou menos alto) para caracterizar um objeto.

A lógica *fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*, que consegue modelar a maneira como as pessoas pensam na definição das variáveis, considerando a subjetividade e a experiência dessas pessoas para pegar informações descritas na linguagem natural e transformá-las em valores numéricos (ZADEH, 1965).

Na lógica tradicional, valores discretizados (geralmente 0 ou 1) são utilizados para definir o que possa ser alto ou baixo. Já na lógica *fuzzy*, valores intermediários são utilizados, permitindo a existência de meios termos ou valores próximos de 0 ou de 1 (CHENCI; RIGNEL; LUCAS, 2011). A figura 25 apresenta como é tratada a informação nas duas lógicas.

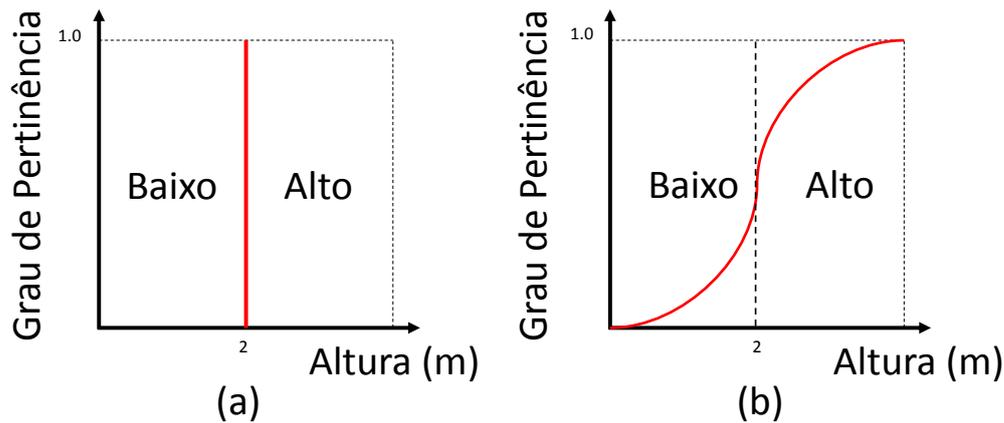


Figura 25 – Altura de um objeto representada por: (a) lógica tradicional, (b) lógica *fuzzy*.

Considerando dois objetos, com as alturas  $Obj_1 = 1.85\text{m}$  e  $Obj_2 = 2.10\text{m}$ , na lógica clássica, o  $Obj_1$  é considerado baixo e o  $Obj_2$  alto. Na lógica *fuzzy*, cada um dos objetos tem seu grau de pertinência do conjunto *fuzzy* definido no intervalo  $[0,1]$ . O grau de pertinência permite avaliar quanto de cada conjunto *fuzzy* um elemento pode ser. O elemento também pode pertencer a vários conjuntos, com um valor de grau de pertinência referente a cada conjunto (CAVALCANTI et al., 2012). É importante destacar que esse grau de associação não é probabilístico, e sim um cálculo de compatibilidade do elemento com o conceito representado pelo conjunto *fuzzy* (CAVALCANTI et al., 2012). A Figura 26 apresenta os elementos componentes de um conjunto *fuzzy*.

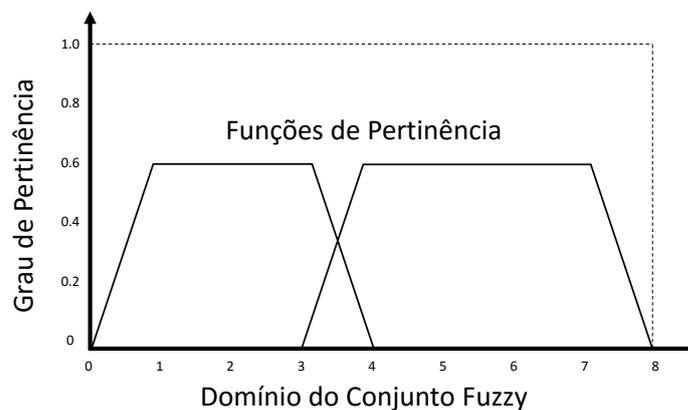


Figura 26 – Componentes de um conjunto *fuzzy*.

Uma variável linguística apresenta valores que não são numéricos, e sim palavras na linguagem natural. Os valores linguísticos fornecem uma maneira sistemática de aproximação das variáveis encontradas em problemas complexos. Essas variáveis são definidas através de termos, como os exemplos anteriores de "alto" e "baixo". Um outro exemplo poderia ser a modelagem *fuzzy* da quantidade de enlaces de uma rota, na qual seria definida uma variável linguística com os valores "curta", "mediana" e "longa". A Figura 27 apresenta a modelagem *fuzzy* para a variável linguística *quantidade de enlaces da rota*.

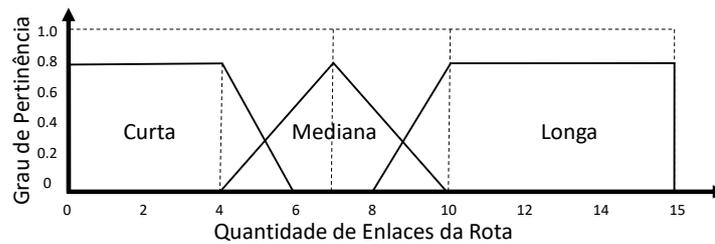


Figura 27 – Modelagem *fuzzy* das funções de pertinência para a variável linguística *quantidade de enlaces da rota*.

O principal objetivo das variáveis linguísticas é a utilização de termos linguísticos do dia a dia empregados por pessoas, permitindo a análise de sistemas complexos por meio de mecanismos matemáticos (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 1995). Uma variável linguística é composta dos seguintes termos: nome da variável; conjunto de nomes dos valores linguísticos de uma variável; universo de discurso; uma regra que gera os valores da variável como uma composição em termos do conjunto dos valores linguísticos, conectivos lógicos, modificadores e delimitadores; e uma regra para associar a cada valor gerado pela regra sintática em um conjunto *fuzzy* no universo do discurso.

As variáveis linguísticas podem ser combinadas, através de diferentes operadores, gerando novas proposições. O resultado dessa combinação também é descrito em termos de relações *fuzzy*. A determinação do valor da combinação pode ser determinado de maneiras diferentes, e ocorre de melhor forma quando é feito através da análise de um especialista (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 1995).

Os termos primários da lógica *fuzzy* são as funções de pertinência, que são associadas diretamente aos conjuntos *fuzzy*. As funções de pertinência são formas de representar o conhecimento do especialista, em relação à intensidade com que o objeto pertence ao conjunto *fuzzy*. Cada variável linguística possui um conjunto de funções de pertinência que exprimem o conjunto das variáveis linguísticas do sistema, em que cada função de pertinência possui uma variável lógica associada (CAVALCANTI et al., 2012). A Figura 28 apresenta as funções de pertinência triangular, trapezoidal e gaussiana. Essas são as funções de pertinência mais utilizadas, devido à facilidade de implementação e determinação dos parâmetros.

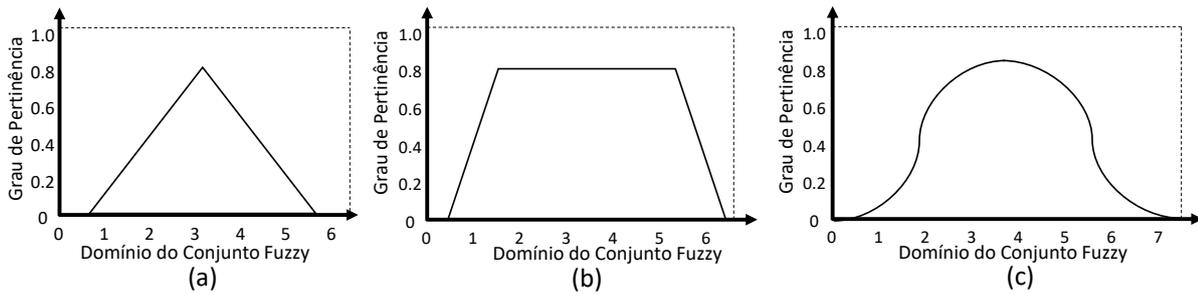


Figura 28 – Funções de pertinência mais utilizadas: (a) triangular, (b) trapezoidal e (c) gaussiana.

## A.2 Nova solução para o problema de roteamento em redes ópticas elásticas utilizando algoritmo ciente de fragmentação baseado em sistemas *fuzzy*

### A.2.1 Trabalhos relacionados

Sistemas de comunicação que utilizam fibra óptica como meio de transmissão oferecem grande escalabilidade para suportar o crescente tráfego de dados na Internet, devido à grande disponibilidade de largura de banda (GERSTEL et al., 2012). Essa característica torna-se evidente a medida em que se aprofunda a pesquisa em Redes Ópticas, iniciada comercialmente em 1980, quando se registravam transmissões próximas a 45Mb/s (ALFERNESS, 2012) (TOMKOS et al., 2012), até atualmente, quando é constatado transmissões de 20Tb/s em uma fibra óptica (CAI et al., 2012).

Para melhor gerenciamento dos recursos da rede é necessário definir um conjunto de rotas e intervalos de espectro a serem alocados para as diferentes requisições de estabelecimento de circuito óptico. Essa necessidade constitui o problema RSA (*Routing and Spectrum Allocation*), que vem se tornando uma importante área de pesquisa na literatura relacionada (YIN et al., 2013).

Além do problema RSA, é observado o problema de *Fragmentação* nas redes elásticas (SHAKYA; CAO, 2013). A medida em que circuitos de diferentes larguras de banda são estabelecidos e desligados, pequenas lacunas de *slots* não-alocados surgem entre intervalos de *slots* ocupados. Esse problema pode evoluir de forma a impedir o atendimento de requisições, mesmo que a rota contenha a quantidade suficiente de *slots*. A fim de evitar a ocorrência desse problema, é feito o estudo de uma classe de algoritmos, classificados como *cientes de fragmentação*. Os autores em (CUGINI et al., 2013) apresentam uma técnica de desfragmentação espectral, na qual ocorre suspensão dos circuitos, durante alguns segundos, para reorganização dos mesmos no espectro óptico. Já em (WANG; MUKHERJEE, 2014) é apresentada uma política de particionamento do espectro, a fim de reduzir a desigualdade de atendimento para requisições de diferentes larguras de banda, impactando diretamente

na taxa de fragmentação da rede. Nesse sentido, a solução RSA aqui proposta também busca reduzir o impacto da fragmentação no processo de estabelecimento de circuitos, pois leva em consideração o grau de fragmentação das rotas candidatas para a escolha da rota adequada.

O estudo do problema de roteamento é essencial para garantir uma boa utilização dos recursos de redes. Há algum tempo que esse problema é avaliado (DIJKSTRA, 1959), e sempre que surgem novas tecnologias para redes, é preciso reformulá-lo considerando o novo conjunto de restrições e variáveis. Como uma solução para o problema de roteamento em Redes Ópticas, em (SANTOS et al., 2012) é proposto o algoritmo MMRDS (*Melhor entre as Menores Rotas com Decisão por Similaridade*), que considera a similaridade entre as rotas de menor caminho para cada par de nós, alocando aquelas que permitam um melhor balanceamento entre todos os enlaces da rede. Os algoritmos de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) e MMRDS são simulados e comparados com a abordagem, utilizando Sistema *fuzzy*, aqui proposta.

Algumas propostas para solucionar problemas em Redes Ópticas são baseadas em lógica *fuzzy*. Em (KAVIAN; REJEB; STROBEL, 2010) foi proposto um modelo *fuzzy* em programação linear para planejamento de capacidade em redes ópticas. Em (BHANJA; MISHRA, 2015), foi modelado um sistema *fuzzy* para atacar o problema RSA Dinâmico em Redes Ópticas WDM, e a seleção do caminho de menor custo foi baseada em alguns critérios provenientes da camada física, como latência e distância real dos enlaces. Já em (RIBEIRO, 2014) foi proposta uma técnica de roteamento baseada em lógica *fuzzy* que verifica a quantidade de *slots* ocupados e o tamanho dos enlaces para a seleção de rotas. Esta técnica será avaliada neste trabalho, juntamente com DJK e MMRDS. Em (REIS et al., 2015) foi proposto um sistema *fuzzy*, modelado para mitigar a variação de temperatura nos enlaces de transmissão em redes OCDMA (Optical Code-Division Multiple-Access).

## A.2.2 Algoritmo proposto

Para a escolha da rota durante a fase operacional da rede, o algoritmo proposto utiliza um sistema *fuzzy* ao avaliar as rotas candidatas. A Figura 29 apresenta o fluxo de execução do algoritmo. A chegada de requisições ocorre de forma dinâmica entre todos os pares de nós de origem e destino da rede, e as rotas candidatas são as rotas do conjunto de menor caminho para cada par. Em caso de pares com apenas uma rota de menor caminho, não é necessário utilizar o algoritmo para realizar escolher a rota, pois esta já está definida.

Durante a fase *offline* do algoritmo (que ocorre antes da fase operacional da rede), são calculados os menores caminhos para todos os pares de nós da rede. Na fase *online*, ao surgir uma requisição, é verificado qual os nós de origem e de destino envolvidos. Após a verificação, busca-se o conjunto de menores caminhos para o par, e cada um dos menores caminhos passa pelo Sistema *fuzzy* do algoritmo proposto, a fim de se encontrar um valor

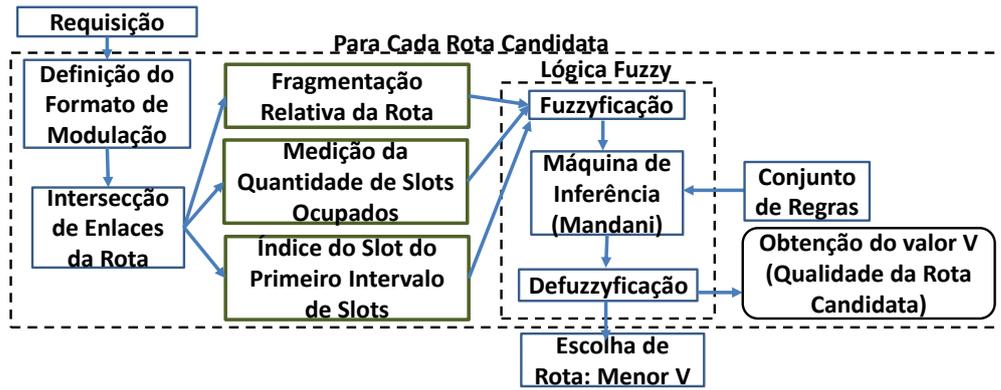


Figura 29 – Fluxo de execução do algoritmo proposto utilizando Sistemas *fuzzy*.

$V$  de qualidade da rota. A variável  $V$ , ao fim da execução do algoritmo, vai reunir as informações coletadas para cada rota. A rota de menor valor de Fragmentação Relativa, menor quantidade de *slots* ocupados e mais baixo índice do *slot* do primeiro intervalo que suporte a requisição terá menor valor  $V$ .

Para o cálculo do valor  $V$  de uma rota candidata, é feito inicialmente o processo de *fuzzyficação*, quando é verificado um conjunto de características citados anteriormente para a rota em questão. Cada característica é representada por uma *variável linguística*, que permite definir, através das funções de pertinência de cada variável linguística, qual o grau de pertinência para em cada função de pertinência da rota em estudo. Após, os valores de pertinência encontrados são transmitidos para o *modelo de inferência de Mamdani* (MAMDANI, 1976), que juntamente com o conjunto de regras prepara os dados linguísticos para a próxima etapa. Por fim, ocorre o processo de *defuzzyficação*, em que se obtém um valor numérico  $V$  para caracterizar o estado da rota em estudo.

A primeira variável linguística definida para o Sistema *fuzzy* é a *Quantidade de Slots Ocupados* na rota. Slots ocupados são aqueles que não estão livres de forma contínua na rota, ou seja, os *slots* que são utilizados em pelo menos um enlace da rota. Rotas com muitos *slots* ocupados devem ser evitadas, a fim de não criar os chamados *gargalos* na rede. A Figura 30 apresenta uma modelagem das funções de pertinência para a variável linguística *Quantidade de Slots Ocupados*. As funções de pertinência definidas foram  $q1$ ,  $q2$ ,  $q3$ ,  $q4$  e  $q5$ , que representam respetivamente rotas com distribuição Gaussiana de média igual a 0, 100, 200, 300 e 400 *slots* ocupados e desvio padrão igual a 80. Foram utilizados enlaces com 400 *slots*, o que justifica a utilização do valor 400 como o máximo na modelagem da variável linguística.

A segunda variável linguística utilizada é o grau de *Fragmentação Relativa* (HOROTA; FIGUEIREDO; FONSECA, 2014) da rota. A *Fragmentação Relativa* permite verificar o quanto uma rota se encontra fragmentada para atender requisições que necessitam de determinada quantidade de *slots*. A Equação A.1 apresenta o cálculo da

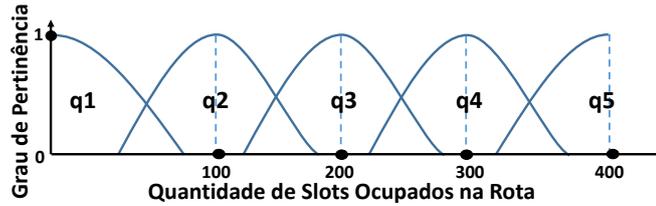


Figura 30 – Variável linguística *Quantidade de Slots Ocupados*.

*Fragmentação Relativa*:

$$F(c) = \frac{c * RS(c)}{S_L}, \tag{A.1}$$

na qual  $c$  é a quantidade de *slots* da requisição a ser atendida,  $RS(c)$  é a quantidade de requisições simultâneas de tamanho  $c$  que podem ser atendidas considerando o estado corrente do espectro óptico e  $S_L$  é a quantidade total de *slots* livres de forma contínua nos enlaces da rota observada. A Figura 31 exemplifica o cálculo de *Fragmentação Relativa* considerando uma rota de dois enlaces.

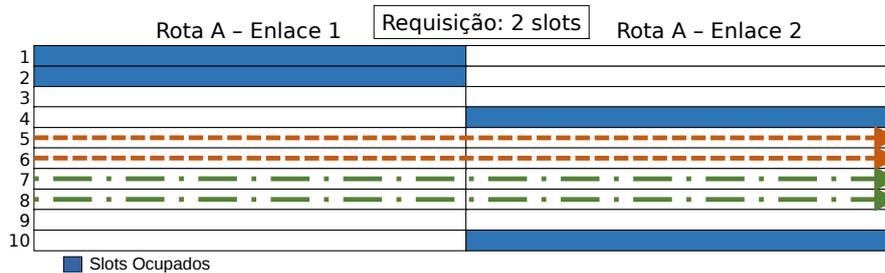


Figura 31 – Exemplificação da métrica de Fragmentação Relativa.

No exemplo ilustrado na Figura 31, considerando uma requisição que necessite de 2 *slots* para ser atendida, percebe-se que apenas dois conjuntos de 2 *slots* contínuos e contíguos podem ser alocados de forma simultânea considerando o estado corrente do espectro. Observa-se também que, além dos dois conjuntos de *slots* que podem ser alocados, restam mais 2 *slots* que estão livres, mas não podem ser alocados devido à fragmentação da rota em questão. Portanto, o grau de *Fragmentação Relativa* da rota ilustrada para requisições de 2 *slots* é  $(2 * 2) / 6 = 0.6667$ .

Avaliar a *Fragmentação Relativa* é útil para apontar as rotas de menor grau de fragmentação. Utilizar essa métrica como critério de avaliação permite verificar as rotas mais propícias para atender requisições que exijam diferentes quantidades de largura de banda. A Figura 32 ilustra a modelagem para a variável linguística *Fragmentação Relativa*, com cinco funções de pertinência de formato gaussiano: baixo, médio baixo, médio, médio alto e alto, de valor médio respectivamente igual a 0, 0.25, 0.5, 0.75 e 1, e desvio igual a 0.2. A divisão é uniforme

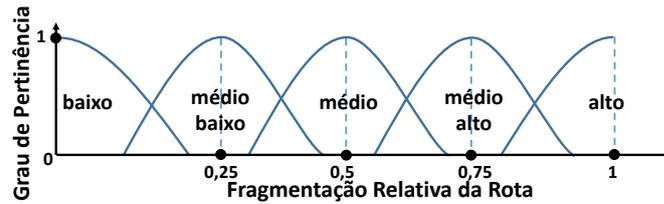


Figura 32 – Variável linguística *Fragmentação Relativa*.

A terceira variável linguística utilizada é o *Índice do Slot Inicial do Primeiro Intervalo Espectral Alocável*. Esse critério favorece a escolha da rota mais próxima do início espectral, acarretando em melhor organização no espectro utilizado. A escolha de rotas com o primeiro intervalo de *slots* alocáveis mais próximo do início do espectro viabiliza melhor aplicação da política *First Fit* no processo de alocação espectral. A Figura 33 apresenta as funções de pertinência para o critério de *Índice do Slot Inicial do Primeiro Intervalo Espectral Alocável*, na qual  $q1$  apresenta o conjunto de *slots* mais próximos do início espectral e  $q5$  os *slots* mais distantes. O valor de Fragmentação Relativa é normalizado, tendo 1.0 como valor máximo na modelagem das funções de pertinência.

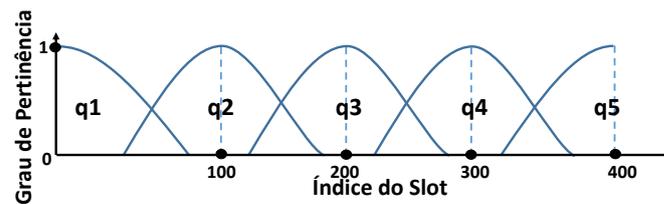


Figura 33 – Variável linguística *Índice do Slot Inicial do Primeiro Intervalo Espectral Alocável*.

Após a parametrização das variáveis linguísticas, é necessário definir uma função que qualifique a rota após a avaliação das variáveis linguísticas que a caracterizam. A Figura 34 apresenta a modelagem da variável linguística para o processo de *defuzzyficação*. Após a *defuzzyficação* é obtido o valor  $V$  que será utilizado para a seleção da rota. Na modelagem deste trabalho, após a aplicação do algoritmo proposto, a rota de menor valor  $V$  dentre as rotas candidatas para um determinado par será a rota escolhida para o estabelecimento do circuito.

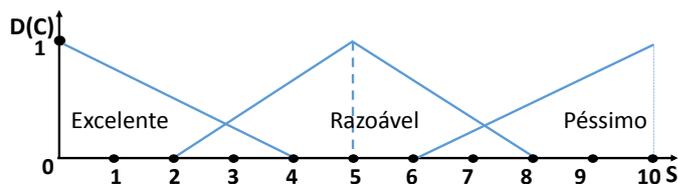


Figura 34 – Variável linguística para processo de *defuzzyficação*.

Com a finalidade de agregar todas as variáveis linguísticas em um único conjunto *fuzzy*, é utilizado o processo de inferência de Mamdani. A Figura 35 ilustra o funcionamento

do método de Mamdani, observando os critérios de *Fragmentação Relativa* e *Quantidade de Slots Ocupados*, com valores de 0.6 e 150 respectivamente, em um total de 400 *slots*. Inicialmente, é definido o valor de pertinência (eixo y das Figs. 30, 32 e 33) para cada função de pertinência da rota. Nos casos em que uma rota é classificada por mais de uma variável linguística, a variável de menor valor é assumido. Após a decisão do valor para cada função de pertinência, o valor  $V$  final escolhido para a rota é o maior dentre os valores resultantes das funções de pertinência na fase anterior.

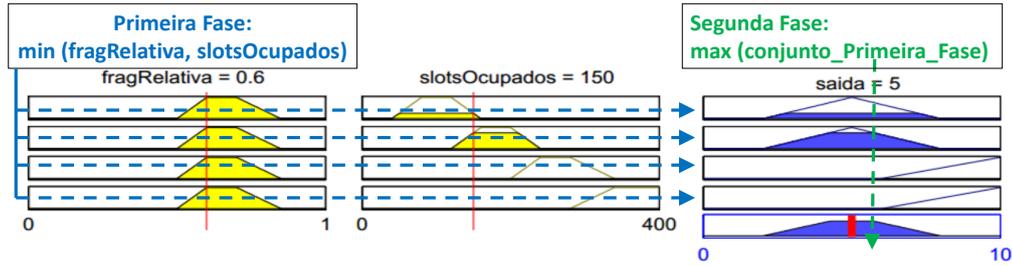


Figura 35 – Conjunto de regras *fuzzy*, com entrada de valores de Fragmentação relativa e Quantidade de Slots Ocupados iguais a 0.6 e 150, respectivamente.

Para o correto funcionamento do Sistema *fuzzy* presente nesta proposta, se faz necessário associar todas as possíveis combinações de valores das variáveis linguísticas de entrada a um valor da variável linguística do conjunto de saída, criando assim a *base de regras*. A Tabela 5 apresenta a base de regras utilizada pelo algoritmo proposto.

A última etapa do algoritmo proposto é caracterizada como *defuzzyficação*. O método utilizado neste trabalho é o Centroide (ou Centro de Massa) (PAPPIS; SIETTOS, 2005). A Equação A.2 apresenta o cálculo do Centroide para se encontrar o valor  $V$ :

$$V = \frac{\sum_{s=0}^{10} S * D(S)}{\sum_{s=0}^{10} D(S)}, \quad (\text{A.2})$$

na qual  $S$  representa a distribuição dos valores de classificação da rota após a *defuzzyficação* (eixo x da Figura 34), e  $D(S)$  apresenta o valor obtido para essa classificação, após o processo de inferência. Supondo que, após a aplicação do processo de inferência, o resultado é 0.51 para *excelente*, 0.23 para *razoavel* e 0.0 para *pessimo*, então o cálculo realizado é:

$$V = \frac{(1 + 2 + 3) * 0.51 + (3 + 4 + 5 + 6 + 7) * 0.23 + (7 + 8 + 9 + 10) * 0.0}{0.51 + 0.51 + 0.51 + 0.23 + 0.23 + 0.23 + 0.23 + 0.23 + 0.0} = 3.287 (\text{A.3})$$

Para os três critérios avaliados, utilizou-se funções de pertinência da forma gaussiana. Experimentos foram realizados com diferentes formatos de função de pertinência, mas para

Tabela 5 – Conjunto de Regras de controle do Sistema Fuzzy.

Qt. Slots Ocupados Frag. Rel. + Index Slot	q1	q2	q3	q4	q5
baixo & q1	excelente	excelente	excelente	excelente	razoável
baixo & q2	excelente	excelente	excelente	razoável	razoável
baixo & q3	excelente	excelente	razoável	razoável	razoável
baixo & q4	excelente	razoável	razoável	razoável	razoável
baixo & q5	razoável	razoável	razoável	razoável	péssimo
médio baixo & q1	excelente	excelente	excelente	razoável	razoável
médio baixo & q2	excelente	excelente	razoável	razoável	razoável
médio baixo & q3	excelente	razoável	razoável	razoável	razoável
médio baixo & q4	razoável	razoável	razoável	razoável	péssimo
médio baixo & q5	razoável	razoável	razoável	péssimo	péssimo
médio & q1	excelente	excelente	razoável	razoável	razoável
médio & q2	excelente	razoável	razoável	razoável	razoável
médio & q3	razoável	razoável	razoável	razoável	péssimo
médio & q4	razoável	razoável	razoável	péssimo	péssimo
médio & q5	razoável	razoável	péssimo	péssimo	péssimo
médio alto & q1	excelente	razoável	razoável	razoável	razoável
médio alto & q2	razoável	razoável	razoável	razoável	péssimo
médio alto & q3	razoável	razoável	razoável	péssimo	péssimo
médio alto & q4	razoável	razoável	péssimo	péssimo	péssimo
médio alto & q5	razoável	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo
alto & q1	razoável	razoável	razoável	razoável	péssimo
alto & q2	razoável	razoável	razoável	péssimo	péssimo
alto & q3	razoável	razoável	péssimo	péssimo	péssimo
alto & q4	razoável	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo
alto & q5	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo

o algoritmo proposto a forma Gaussiana apresentou melhor resultado. Já para o processo de *defuzzyficação*, utiliza-se uma função de pertinência *triangular*, de menor complexidade, a fim de reduzir o tempo computacional do processo de *defuzzyficação*.

A aplicação do Sistema *fuzzy* viabiliza a avaliação, com maior sensibilidade, das características da rota, pois a aplicação das regras de base permite lidar com a não linearidade, consequência natural da avaliação considerando mais de um fator simultaneamente. Portanto, a justificativa da aplicação do Sistema *fuzzy* está relacionada com a possibilidade de moldar as regras de base, permitindo aplicação mais direta de conhecimentos obtidos em estudos prévios.

### A.2.3 Cenário avaliado neste trabalho

A Figura 36 apresenta as topologias USA e NSFNet, utilizadas para realização das simulações. As características e parâmetros utilizados em cada topologia são apresentados na Tabela 6. A Tabela 7 apresenta as parametrizações comuns as duas topologias.

Para realização das simulações foi utilizada a ferramenta SNetS (*Slice Network*

*Simulator*) (FONTINELE et al., 2016). O SNetS permite a avaliação de desempenho em Redes Ópticas Elásticas sob um amplo conjunto de métricas. A simulação de uma topologia se dá em sua fase operacional e considera o comportamento dinâmico de cenários reais. Além disso, a ferramenta fornece meios para a implementação de novas técnicas de roteamento e alocação de espectro, facilitando o processo de elaboração de novas heurísticas.

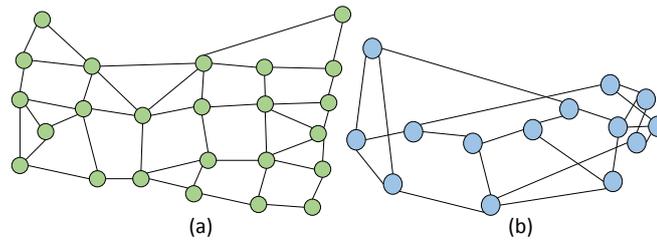


Figura 36 – Topologias utilizadas para avaliação: USA(a) e NSFNet(b).

Tabela 6 – Parâmetros de topologias utilizadas no estudo.

Parâmetros	USA	NSFNet
Número de Nós	24	14
Número de Enlaces	43	22
Carga Inicial por Nó	2.1	3.0
Incremento da Carga	0.36	0.24

Tabela 7 – Parâmetros de simulação.

Parâmetros	
Número de Requisições	100,000
Quantidade de Replicações	10
Pontos de Carga	7
Slots por Enlace	400
Intervalo de Frequência ( <i>slot</i> )	12.5 GHz
Largura de Banda das Requisições	10, 20, 40, 80, 160, 320 Gbps

Todos os enlaces nas topologias avaliadas são bidirecionais. A carga de tráfego é distribuída de modo uniforme entre todos os *pares*( $o, d$ ). As requisições são geradas seguindo um processo de Poisson com média  $\lambda$  e o tempo de retenção é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu$ . A intensidade do tráfego na rede é dado por  $\rho = \lambda/\mu$ . Para alocação de espectro, é utilizada a política *FirstFit*.

A técnica de roteamento por lógica *fuzzy* permite escolher a rota com menor valor  $V$ . Dentre as rotas candidatas para um dado par, a rota escolhida será aquela de melhor avaliação após a *defuzzificação*, resultado de menores valores para as métricas Fragmentação Relativa, Índice do Primeiro Slot Alocável e Quantidade de Slots Ocupados. Um baixo valor para esses três critérios resulta em um baixo valor para  $V$ .

## A.2.4 Resultados

A Figura 37 apresenta os resultados gráficos de Probabilidade de Bloqueio de Circuito para as topologias (a) USA e (b) NSFNet. O algoritmo proposto apresenta melhora de desempenho devido à sua capacidade de escolher rotas menos congestionadas e com o espectro menos fragmentado. Assim, ao longo da fase operacional da rede, o espectro encontra-se mais organizado durante um maior período de tempo, permitindo o estabelecimento de mais circuitos. Os outros algoritmos não operam de forma ciente de Fragmentação, e apresentam desempenho inferior, alcançando taxas de bloqueio maiores (uma média de 2.76 vezes maior para o Dijkstra, 2.31 para a proposta *fuzzy* (RIBEIRO, 2014) e 1.56 para o MMRDS na topologia USA, 31.82 para o Dijkstra, 6.12 para a outra proposta *fuzzy* (RIBEIRO, 2014) e 4.04 para o MMRDS na topologia NSFNet, calculada a partir da média encontrada para cada ponto de carga do gráfico).

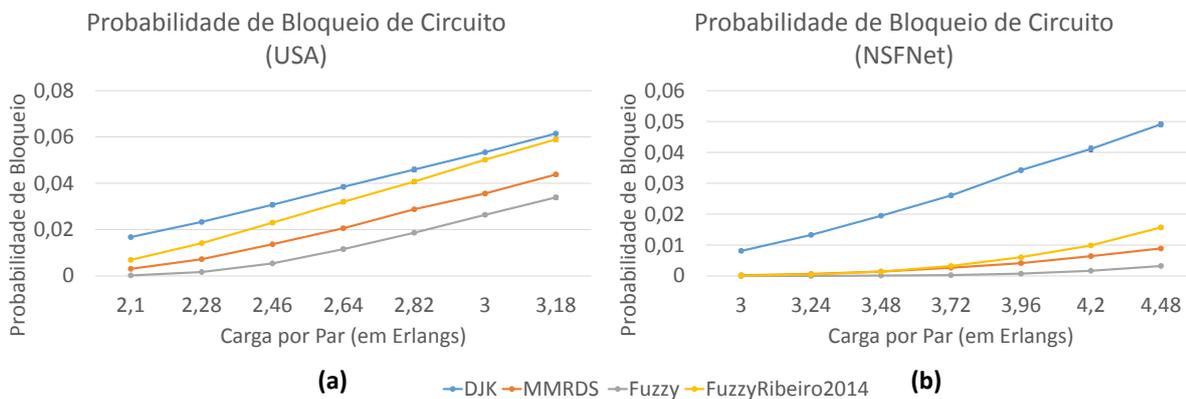


Figura 37 – Probabilidade de Bloqueio de Circuito para as topologias: (a) USA e (b) NSFNet.

Durante as simulações também foram avaliadas as taxas de bloqueio para os diferentes tipos de requisição, referente à necessidade de largura de banda de cada uma delas. Para o experimento, foram implementadas requisições que necessitavam de taxas de transmissão iguais a 10, 20, 40, 80, 160 e 320 Gbps, com distribuição uniforme. Por necessitar de grande quantidade de *slots*, requisições com maiores taxas tem maior probabilidade de sofrer bloqueio. Como consequência, foi observada uma diferença notável entre a Probabilidade de Bloqueio das taxas de maior e menor necessidade de largura de banda. A Figura 38 apresenta a Probabilidade de Bloqueio de Banda para as topologias (a) USA e (b) NSFNet. Os gráficos foram criados a partir do valor de probabilidade de bloqueio por banda observado no último ponto de carga do gráfico da Figura 37. As taxas de 10 Gbps e 20 Gbps apresentavam valores de bloqueio extremamente baixo em relação aos outros, e foram removidos para proporcionar melhor visualização.

Os valores de Probabilidade de Bloqueio por Banda são componentes da Probabilidade de Bloqueio de Circuito, e pode-se observar o reflexo do comportamento encontrado nos gráficos da Figura 37 quando comparados aos gráficos da Figura 38. Para a topologia

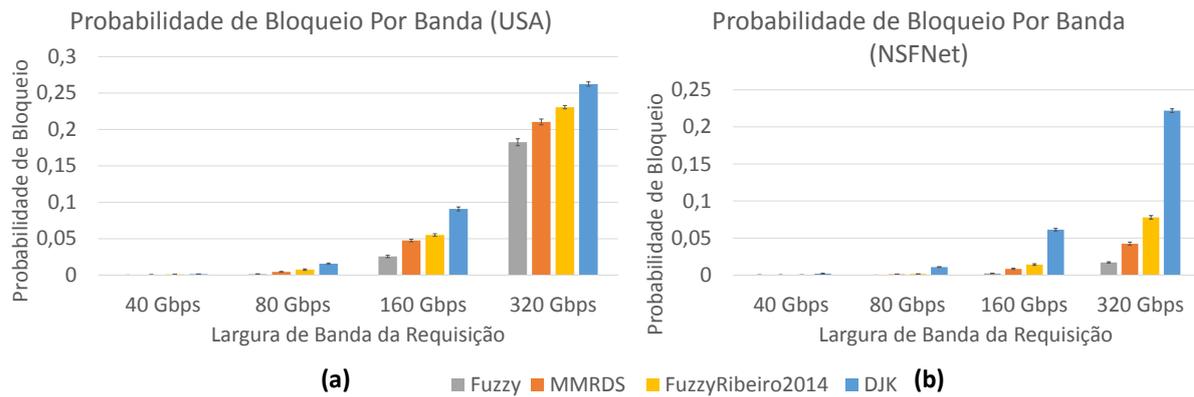


Figura 38 – Probabilidade de Bloqueio por Banda para as topologias: (a) USA e (b) NSFNet.

NSFNet, observa-se para Probabilidade de Bloqueio de Circuito uma maior proximidade do MMRDS com o *fuzzy* proposto neste trabalho. Essa mesma proximidade também é observada na probabilidade de Bloqueio por Banda.

Para as topologias USA e NSFNet, a implementação *fuzzy* proposta apresentou valores de Probabilidade de Bloqueio por Banda inferior aos valores encontrados por DJK, MMRDS e por *fuzzy* (RIBEIRO, 2014), considerando as diferentes taxas de larguras de banda avaliadas. Para a topologia USA, a técnica proposta apresenta bloqueio 30,43% inferior ao DJK, 20,87% inferior à proposta *fuzzy* (RIBEIRO, 2014) e 13,24% inferior ao MMRDS. Para a topologia NSFNet uma maior variação é observada: a técnica *fuzzy* apresenta bloqueio 95,45% inferior ao DJK, 78,03% inferior à proposta *fuzzy* (RIBEIRO, 2014) e 63,81% inferior ao MMRDS. Estes valores foram encontrados para as taxas de bloqueio das requisições de largura de banda iguais a 320 Gbps.

A utilização de critérios de avaliação, que verificam o estado de fragmentação e congestionamento das rotas dentro do sistema *fuzzy*, viabilizou a elaboração de um algoritmo de roteamento ciente de Fragmentação com bom desempenho quando comparado a outros algoritmos de roteamento. Observando os gráficos apresentados, a técnica *fuzzy* proposta mostra-se eficiente para solucionar o problema de roteamento, pois apresenta menores taxas de bloqueio dos circuitos a serem estabelecidos. A técnica proposta também apresenta menor bloqueio para as várias requisições de diferentes necessidades de largura de banda. Como trabalhos futuros, serão feitas modificações na técnica de roteamento proposta para o desenvolvimento de um algoritmo integrado, que resolve a escolha de rota e a alocação espectral de forma simultânea, a fim de alcançar taxas de bloqueio ainda menores com a aplicação integral do sistema *fuzzy* no problema RSA.

### A.2.5 Conclusões

Para suportar a crescente demanda por banda e garantir atendimento a diferentes tipos de circuitos, é necessário uma estrutura de rede que forneça suporte ao crescente tráfego. Assim, surgem as Redes Ópticas Elásticas, que utilizam a luz como vetor de dados, através de diferentes intervalos de frequência, denominados *slots*, que operam de forma independente. Esses intervalos podem ser agrupados para atender requisições que necessitem de maior largura de banda, garantindo flexibilidade para estabelecimento de circuitos com maior necessidade de banda passante.

As Redes Ópticas Elásticas apresentam as *restrições de continuidade e contiguidade espectral*. Juntamente com o contínuo estabelecimento e desligamento de circuitos, essas restrições acabam criando um problema característico das Redes Elásticas, denominado *fragmentação*. Este problema é caracterizado pelo surgimento de pequenos intervalos de *slots* livres no espectro óptico, de modo que requisições com maiores larguras de banda são incapazes de alocá-los.

A fim de reduzir os impactos da fragmentação, o problema RSA pode ser elaborado considerando os possíveis bloqueios por fragmentação, sendo classificado como algoritmo RSA ciente de fragmentação. O algoritmo proposto neste trabalho é ciente de Fragmentação e utiliza um sistema *fuzzy* para realizar roteamento entre os nós da rede. O algoritmo considera um conjunto de métricas, como *Fragmentação Relativa*, *Quantidade de Slots Ocupados* e *Índice do Slot Inicial do Primeiro Intervalo Espectral Alocável*, para escolher a rota a ser alocada entre as rotas de menor caminhos para cada par de nós. Esses critérios permitem a busca de rotas menos fragmentadas e com menor carga, realizando um balanceamento de carga dinamicamente à medida em que surgem novas requisições.

Foram realizadas simulações, nas quais foram avaliados o desempenho do sistema *fuzzy* proposto comparado aos algoritmos DJK, MMRDS e uma outra proposta *fuzzy*, em duas topologias reais: USA e NSFNet. Foi constatado que, para o mesmo cenário de estudo, o sistema *fuzzy* apresenta menor Probabilidade de Bloqueio de Circuito (uma média de 2.76 vezes inferior ao Dijkstra, 2.31 à proposta *fuzzy* (RIBEIRO, 2014) e 1.56 ao MMRDS na topologia USA, e 31.82 ao Dijkstra, 6.12 à proposta *fuzzy* (RIBEIRO, 2014) e 4.04 ao MMRDS na topologia NSFNet), garantindo o estabelecimento de maior número de circuitos. Portanto, observa-se que a utilização do sistema *fuzzy* é eficaz para solucionar o problema de roteamento no cenário de Redes Ópticas Elásticas, tornando-se uma alternativa viável para aplicação em cenários reais.

## Referências

- ALFERNES, R. The evolution of configurable wavelength multiplexed optical networks: a historical perspective. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 5, p. 1023–1034, May 2012. ISSN 0018-9219. Citado na página 42.
- BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A. A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 31, n. 18, p. 3043–3054, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 32.
- BHANJA, U.; MISHRA, D. Dynamic routing and wavelength assignment using fuzzy logic controller in wdm optical networks. In: *Signal Processing and Communication (ICSC), 2015 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 380–385. Citado na página 43.
- BRASILEIRO, I.; JÚNIOR, J. dos R.; SOARES, A. Nova solução para o problema de roteamento em redes ópticas elásticas utilizando algoritmo ciente de fragmentação baseado em sistemas fuzzy. *SBRC - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, p. 762–775, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 8, 12, 28 e 39.
- CAI, J.-X. et al. 20 tbit/s transmission over 6860 km with sub-nyquist channel spacing. *Lightwave Technology, Journal of*, v. 30, n. 4, p. 651–657, Feb 2012. ISSN 0733-8724. Citado na página 42.
- CAVALCANTI, J. H. F. et al. *Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias*. [S.l.]: João Pessoa PB, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.
- CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 3, p. 1776–1800, thirdquarter 2015. ISSN 1553-877X. Citado 4 vezes nas páginas 2, 5, 11 e 28.
- CHAVES, D. A. R. et al. Novel strategies for sparse regenerator placement in translucent optical networks. *Photonic Network Communications*, v. 24, n. 3, p. 237–251, 2012. ISSN 1572-8188. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11107-012-0384-9>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 15.
- CHAVES, D. A. R. et al. A case study of regenerator placement and regenerator assignment in dynamic translucent elastic optical networks. In: *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4. Citado 5 vezes nas páginas 9, 15, 16, 17 e 28.
- CHAVES, D. A. R. et al. Heuristic algorithms for regenerator assignment in dynamic translucent elastic optical networks. In: *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4. ISSN 2162-7339. Citado na página 16.
- CHENCI, G. P.; RIGNEL, D. G.; LUCAS, C. A. Uma introdução á lógica fuzzy. *Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e de Gestão Tecnológica*, v. 1, n. 1, 2011. Citado na página 39.

- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Routing and spectrum allocation in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation. In: IEEE. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, 2010 IEEE. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado na página 6.
- COSTA, L. R.; DRUMMOND, A. C. New distance-adaptive modulation scheme for elastic optical networks. *IEEE Communications Letters*, v. 21, n. 2, p. 282–285, Feb 2017. ISSN 1089-7798. Citado na página 7.
- CUGINI, F. et al. Push-pull defragmentation without traffic disruption in flexible grid optical networks. *Lightwave Technology, Journal of*, v. 31, n. 1, p. 125–133, Jan 2013. ISSN 0733-8724. Citado na página 42.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 43.
- EIRA, A. et al. Design of survivable flexible-grid dwdm networks with joint minimization of transponder cost and spectrum usage. In: *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. ISSN 1550-381X. Citado na página 19.
- ESSIAMBRE, R.-J. et al. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 28, n. 4, p. 662–701, 2010. Citado na página 11.
- FAN, Z.; QIU, Y.; CHAN, C.-K. Dynamic multipath routing with traffic grooming in ofdm-based elastic optical path networks. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 33, n. 1, p. 275–281, 2015. Citado na página 6.
- FONTINELE, A. et al. Achievement of fair and efficient regenerator allocations in translucent optical networks using the novel regenerator assignment algorithm. *Optical Switching and Networking*, v. 19, Part 1, p. 22 – 39, 2016. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427715000879>>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 15 e 16.
- FONTINELE, A. et al. An efficient ia-rmlsa algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, v. 118, p. 1 – 14, 2017. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128617300634>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 8 e 14.
- FONTINELE, A. et al. Um novo algoritmo rsa ciente de imperfeições de camada física para redes ópticas elásticas. *SBRC - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, p. 322–335, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 12, 28 e 49.
- GAO, G. et al. Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical ofdm networks. *IEEE Communications Letters*, v. 18, n. 4, p. 672–675, April 2014. ISSN 1089-7798. Citado na página 25.
- GERSTEL, O. et al. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? *Communications Magazine, IEEE*, v. 50, n. 2, p. s12–s20, February 2012. ISSN 0163-6804. Citado na página 42.
- GOMIDE, F.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. In: *Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 1–38. Citado na página 41.

HOROTA, A. K.; FIGUEIREDO, G. B.; FONSECA, N. L. S. da. Algoritmo de roteamento e atribuição de espectro com minimização de fragmentação em redes óticas elásticas. *Anais do 32 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC 2014*, v. 32, p. 895–908, May 2014. Citado na página 44.

JOHANNISSON, P.; AGRELL, E. Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology, IEEE*, v. 32, n. 23, p. 3942–3950, 2014. Citado na página 10.

KAVIAN, Y.; REJEB, R.; STROBEL, O. Fuzzy linear programming for capacity planning in optical networks. In: *Transparent Optical Networks (ICTON), 2010 12th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–4. Citado na página 43.

KRETSIS, A. et al. Planning and operating flexible optical networks: Algorithmic issues and tools. *Communications Magazine, IEEE*, v. 52, n. 1, p. 61–69, January 2014. ISSN 0163-6804. Citado na página 5.

MAMDANI, E. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 8, n. 6, p. 669 – 678, 1976. ISSN 0020-7373. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020737376800284>>. Citado na página 44.

MARANHAO, J. et al. Wavelength conversion architectures in obs networks. In: *NOMS 2008 - 2008 IEEE Network Operations and Management Symposium*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 939–942. ISSN 1542-1201. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.

MARRO, A. A. et al. Lógica fuzzy: conceitos e aplicações. *Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)*, 2010. Citado na página 39.

PAPPIS, C. P.; SIETTOS, C. I. Fuzzy reasoning. In: *Search Methodologies*. [S.l.]: Springer, 2005. p. 437–474. Citado na página 47.

RAHBAR, A. G. Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength assignment techniques in all-optical wavelength-routed networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 14, n. 4, p. 1065–1089, Fourth 2012. ISSN 1553-877X. Citado na página 11.

REIS, J. dos et al. Fuzzy logic control for the mitigation of environmental temperature variations in ocdma networks. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, v. 7, n. 5, p. 480–488, May 2015. ISSN 1943-0620. Citado na página 43.

RIBEIRO, S. R. L. Roteamento multicritério em redes óticas elásticas dinâmicas. *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba*, Julho 2014. Citado 4 vezes nas páginas 43, 50, 51 e 52.

SANTOS, I. G. S. et al. Um novo algoritmo de roteamento para a escolha da melhor entre as menores rotas. In: *SBRC - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 43.

SCHMOGROW, R. et al. Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 24, n. 1, p. 61–63, Jan 2012. ISSN 1041-1135. Citado na página 10.

- SHAKYA, S.; CAO, X. Spectral defragmentation in elastic optical path networks using independent sets. In: *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–3. Citado na página 42.
- TALEBI, S. et al. Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey. *Optical Switching and Networking*, v. 13, p. 34 – 48, 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427714000253>>. Citado na página 5.
- TOMKOS, I. et al. The evolution of optical networking [scanning the issue]. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 5, p. 1017–1022, May 2012. ISSN 0018-9219. Citado na página 42.
- WAN, X.; HUA, N.; ZHENG, X. Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, v. 4, n. 8, p. 603–613, Aug 2012. ISSN 1943-0620. Citado 3 vezes nas páginas 11, 13 e 14.
- WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, v. 11, Part A, p. 83 – 91, 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427713000799>>. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 42.
- WRIGHT, P.; PARKER, M.; LORD, A. Minimum- and maximum-entropy routing and spectrum assignment for flexgrid elastic optical networking [invited]. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, v. 7, n. 1, p. A66–A72, Jan 2015. ISSN 1943-0620. Citado na página 5.
- YAN, L. et al. Link-level resource allocation for flexible-grid nonlinear fiber-optic communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 27, n. 12, p. 1250–1253, 2015. Citado na página 10.
- YANG, Y.; HOU, W.; GUO, L. Spectrum and energy-efficient routing algorithm in survivable and elastic optical network. In: *2014 12th International Conference on Optical Internet 2014 (COIN)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–2. ISSN 2159-6395. Citado 3 vezes nas páginas 11, 6 e 7.
- YIN, Y. et al. Spectral and spatial 2d fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks [invited]. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, v. 5, n. 10, p. A100–A106, Oct 2013. ISSN 1943-0620. Citado na página 42.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and control*, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965. Citado na página 39.
- ZHANG, L.; ZHU, Z. Dynamic anycast in inter-datacenter networks over elastic optical infrastructure. In: *2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 491–495. Citado na página 5.
- ZHANG, P. et al. Bandwidth-variable optical burst switching for ring network. In: *The 2012 11th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 28–29. Citado na página 6.

ZHAO, J.; VOKKARANE, V. M. Dynamic erasure-coded data retrieval in elastic optical data center networks. In: *2016 IEEE 37th Sarnoff Symposium*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 77–82. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 28.

ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 22, p. 4554–4564, Nov 2015. ISSN 0733-8724. Citado na página 10.