



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

Algoritmos IA-RMLSA utilizando Sistemas Fuzzy e a Redução de Interferência nos Circuitos nas Redes Ópticas Elásticas

Ênio Luciano Vieira Barbosa

Teresina-PI, Maio de 2019

Ênio Luciano Vieira Barbosa

**Algoritmos IA-RMLSA utilizando Sistemas Fuzzy e a
Redução de Interferência nos Circuitos nas 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: José Valdemir dos Reis Júnior

Coorientador: André Castelo Branco Soares

Teresina-PI

Maio de 2019

Ênio Luciano Vieira Barbosa

Algoritmos IA-RMLSA utilizando Sistemas Fuzzy e a Redução de Interferência nos Circuitos nas Redes Ópticas Elásticas/ Ênio Luciano Vieira Barbosa. – Teresina-PI, Maio de 2019-
70 f. : il.

Orientador: José Valdemir dos Reis Júnior

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí – UFPI
Centro de Ciências da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Maio de 2019.

1. Redes de Computadores. 2. Redes Ópticas Elásticas Translúcidas. I. José Valdemir dos Reis Júnior, André Castelo Branco Soares. II. Universidade Federal do Piauí. III. Centro de Ciências da Natureza. IV. Algoritmos IA-RMLSA utilizando Sistemas Fuzzy e a Redução de Interferência de Circuitos nas Redes Ópticas Elásticas.

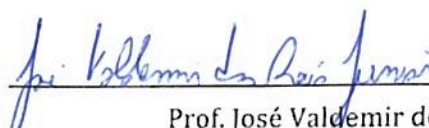
CDU 02:141:005.7


"Algoritmos IA-RMLSA utilizando Sistemas Fuzzy e a Redução de Interferência nos Circuitos nas Redes Ópticas Elásticas"

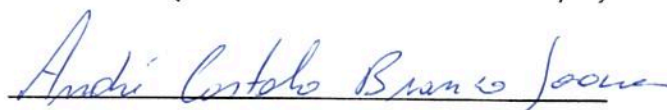
ÊNIO LUCIANO VIEIRA BARBOSA

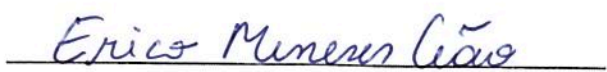
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.


Aprovada por:


Prof. José Valdemir dos Reis Júnior
(Presidente da Banca Examinadora)


Prof. Anderson Leonardo Sanches
(Examinador Externo à Instituição)


Prof. André Castelo Branco Soares
(Examinador Interno)


Prof. Erico Meneses Leão
(Examinador Interno)


Prof. Ricardo de Andrade Lira Rabêlo
(Examinador Interno)

Teresina, 14 de maio de 2019

Dedico este trabalho aos meus pais Barbosa, Lúcia e meu irmão Daniel que, com muito carinho, apoio e incentivo, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado não seria finalizada sem o precioso apoio de várias pessoas.

Primeiramente, agradeço a Jeová Deus pelo privilégio da dádiva da vida, e por estar cercado por pessoas muito especiais. Agradeço por ter me dado força para superar as dificuldades, pelo amor e zelo que têm mostrado ao longo da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Barbosa e Lúcia, por acreditarem em mim, ter me apoiado em todas as etapas da minha vida e terem abdicado de suas vidas em prol das minhas realizações e felicidade. Sem vocês, eu não teria chegado até aqui. Agradeço de coração! O amor que sinto por vocês é incondicional e infinito. Amo vocês!

Agradeço a meu irmão Daniel, pela irmandade, companheirismo, amizade, incentivo e preocupação que têm demonstrado ao decorrer da minha vida. Obrigado por acreditar em mim até mesmo quando eu não acreditava em mim mesmo. É muito bom saber que posso contar com você. A reciprocidade é verdadeira "desde sempre, pra sempre". Te amo, irmão!

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Valdemir, pela competência, orientação, profissionalismo, dedicação que têm demonstrado, pelo apoio e todo conhecimento compartilhado. Muitas vezes nos reunimos e, embora em algumas vezes eu chegasse desanimado, bastavam alguns minutos de conversa e poucas palavras de incentivo que voltava com aquele ânimo do primeiro dia que nos reunimos. Obrigado por sempre acreditar em mim e pelos incentivos e elogios. Tenho certeza que não chegaria neste ponto sem o seu apoio. É um privilégio ser seu primeiro orientando de muitos que ainda virão. Você foi e está sendo muito mais que um orientador: para mim será sempre mestre e amigo.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. André Soares, por toda a ajuda durante a realização dos trabalhos ao longo do mestrado. Sua contribuição foi essencial para concretização de todas as pesquisas desenvolvidas. Muito obrigado!

Agradeço ao Prof. Dr. Ricardo Lira por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que me ajudou, não somente por ter me ensinado, mas por ter me feito aprender. Também agradeço por ter me dado a oportunidade de conhecer professores que hoje posso chamar de amigos.

Agradeço ao meu amigo Selles Gustavo, pelo privilégio de sua amizade, companheirismo pelos trabalhos e disciplinas realizados em conjunto e, principalmente, pela preocupação e apoio constantes. Seus conhecimentos e dedicação foram fundamentais para

que as implementações no simulador se tornassem realidade. A todos os demais amigos do laboratório, obrigado pelo convívio, amizade e apoio demonstrado.

À minha mãe e ao meu pai deixo um agradecimento especial, por todas as lições de amor, companheirismo, amizade, caridade, dedicação, abnegação, compreensão e perdão que vocês me dão a cada novo dia. Sinto-me orgulhoso, privilegiado e honrado por ter pais tão especiais. E ao meu querido irmão que admiro e me espelho muito, sempre pronto para me apoiar em tudo nesta vida. Amo vocês!

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direto ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

“ Ando lento, atrás do alento.”

Resumo

As arquiteturas baseadas em redes ópticas elásticas têm se apresentado como soluções bastante promissoras para o provimento de altas taxas de transmissão de dados aos usuários. No entanto, alguns problemas associados ao roteamento, escolha de modulação, alocação de espectro, fragmentação e interferências nos circuitos, devem ser solucionados para aproveitar amplamente os recursos da rede. Outro desafio a ser tratado nas redes ópticas elásticas diz respeito as operadoras de telecomunicações e indústrias que têm considerado pesquisas relacionada ao alto consumo de energia devido aos altos requisitos de largura de banda de aplicativos ou serviços da internet. Assim, surge a necessidade de considerar a eficiência energética nas redes ópticas elásticas. Neste contexto, este trabalho apresenta a proposta de dois novos algoritmos para a solução do problema de roteamento, nível de modulação e alocação de espectro (*RMLSA - Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) cientes dos efeitos de camada física denominados de CIR-MAS (*Circuit Interference with Minimum Allocation Slots*) e Fuzzy-RQoTO (*Fuzzy - Reduction Quality of Transmission Other circuits*). O algoritmo CIR-MAS busca selecionar o formato de modulação mais robusto à interferências dos circuitos ativos. Além disso, o algoritmo seleciona a rota com o número mínimo de slots alocados entre as soluções de rotas alternativas, a fim de reduzir o bloqueio causado pela degradação dos circuitos. O algoritmo Fuzzy-RQoTO, por sua vez, utiliza um sistema fuzzy para auxiliar na seleção da melhor rota (rota de qualidade) para um dado par (origem - destino), inferindo um grau de pertinência nas métricas nomeadas fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados. Adicionalmente, foram realizados estudos para a avaliação de desempenho e eficiência energética considerando as topologias NSFNet e EON. Para ambos os cenários de redes, foram comparados os desempenhos dos algoritmos propostos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO com os algoritmos: *K-Shortest Path Computation* (KS-PC), *Modified Dijkstra Path Computation* (MD-PC) e *K-Shortest Path with Reduction QoTO* (KSP-RQoTO) disponíveis na literatura. Os resultados indicam que os algoritmos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO apresentaram ganhos mínimos de 40,5% e 27,5% quando comparados ao KS-PC, em termos de probabilidade de bloqueio do circuito, respectivamente. Em termos de probabilidade de bloqueio de largura de banda, o CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO apresentou um ganho mínimo de 37,5% e 21,9% quando comparado ao KS-PC, respectivamente. Já em termos de eficiência energética o algoritmo CIR-MAS apresentou uma eficiência energética superior (ganho mínimo) de 1,8% quando comparado aos algoritmos KS-PC e MD-PC, enquanto que apontou uma eficiência energética inferior (perca mínima) de 0,9% quando comparado aos algoritmos KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO.

Palavras-chaves: CIR-MAS, eficiência energética, Fuzzy-RQoTO, interferência de circuitos, redes ópticas elásticas, RMLSA.

Abstract

The architectures based on optical elastic networks have presented themselves as very promising solutions for the provision of high rates of data transmission to users. However, some problems associated with routing, choice of modulation, spectrum allocation, fragmentation and interference in circuits, must be solved to take full advantage network resources. Another challenge to be addressed in elastic optical networks telecommunications operators and industries that have considered research related to high energy consumption due high application bandwidth requirements or services. Like this, there is a need consider energy efficiency elastic optical networks. In this context, this work presents proposal two new algorithms for solution routing, modulation level and spectrum assignment problem (RMLSA - Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment) aware of physical layer effects known as CIR-MAS (Circuit Interference with Minimum Allocation Slots) and Fuzzy-RQoTO (Fuzzy - Reduction Quality of Transmission Other circuits). The CIR-MAS algorithm seeks select modulation format more robust to interferences of active circuits. In addition, the algorithm selects route with minimum number of slots allocated between alternative route solutions in order to reduce the blockage caused by circuit breakdown. The Fuzzy-RQoTO algorithm, in turn, uses a fuzzy system to assist in selecting best route (route quality) for a given pair (source-destination), inferring degree of pertinence in metrics named relative fragmentation and number of occupied slots. In addition, studies were performed to evaluate performance and energy efficiency considering NSFNet and EON topologies. For both network scenarios, the performances proposed algorithms CIR-MAS and Fuzzy-RQoTO were compared with the algorithms: K-Shortest Path Computation (KS-PC), Modified Dijkstra Path Computation (MD -PC) and K-Shortest Path with Reduction QoTO (KSP-RQoTO) available in the literature. The results indicate CIR-MAS and Fuzzy-RQoTO algorithms presented a minimum gain of 40.5% and 27.5% when compared KS-PC, in terms circuit blocking probability, respectively. In terms of bandwidth blocking probability, the CIR-MAS and Fuzzy-RQoTO presented a minimum gain of 37.5 % and 21.9 % when compared KS-PC, respectively. Already in terms of energy efficiency, the CIR-MAS algorithm presented a higher energy efficiency (minimum gain) of 1.8 % when compared to the KS-PC and MD-PC algorithms, while it indicated a lower energy efficiency (minimum loss) of 0.9 % when compared to the KSP-RQoTO and Fuzzy-RQoTO algorithms.

Keywords: elastic optical network, RMLSA, circuits interference, CIR-MAS, Fuzzy-RQoTO, energy efficiency.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Problema RMLSA nas EON.	1
Figura 2 – Exemplo do problema RMLSA nas EON.	8
Figura 3 – Formatos de modulação.	9
Figura 4 – Propagação do sinal até o destino com qualidade de transmissão abaixo do limiar tolerado pela rede.	10
Figura 5 – Restrição do meio óptico nas EON: (a) Restrição de continuidade e (b) restrição de contiguidade.	11
Figura 6 – Problema da Fragmentação.	12
Figura 7 – Circuito causando bloqueio do tipo (a)QoTN e (b)QoTO.	13
Figura 8 – Topologias usadas no estudo de avaliação de desempenho. O número em cada enlace corresponde a distância em km.	14
Figura 9 – Exemplo da altura de um objeto representada por: (a) lógica booleana e (b) lógica <i>fuzzy</i>	16
Figura 10 – Componentes de um conjunto <i>fuzzy</i>	16
Figura 11 – Sistema de Inferência Fuzzy <i>fuzzy</i>	17
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo Fuzzy-RQoTO.	19
Figura 13 – A importância de selecionar com ponderação um valor para a margem de segurança (σ).	21
Figura 14 – Definição da função de pertinência associadas à fragmentação relativa.	22
Figura 15 – Definição da função de pertinência associadas à quantidade de slots ocupados.	22
Figura 16 – Termos primários para a definição da função linguística associada a qualidade da rota.	23
Figura 17 – Superfície de controle obtida da base de regras.	24
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo CIR-MAS.	26
Figura 19 – Estratégia de seleção do $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$	27
Figura 20 – Estratégia de seleção da rota do algoritmo CIR-MAS.	28
Figura 21 – Probabilidade de bloqueio de circuito para as topologias (a) NSFNet e (b) EON.	32
Figura 22 – Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia NSFNet.	33
Figura 23 – Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia EON.	34
Figura 24 – Probabilidade de bloqueio por largura banda para as topologias (a) NSFNet e (b) EON.	35

Figura 25 – Equipamentos para medir o consumo de energia (VIZCAÍNO; YE;
MONROY, 2012) (VIZCAÍNO et al., 2014) (VIZCAÍNO et al., 2012) . 37

Figura 26 – Eficiência Energética dos algoritmos na topologia (a)NSFNet e (b) EON. 40

Lista de tabelas

Tabela 1 – Base de regras do sistema Fuzzy.	23
Tabela 2 – Estratégia de comparação dos algoritmos CIR-MAS e KSP-RQoTO.	29
Tabela 3 – Parâmetros para as simulações.	31
Tabela 4 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.	32
Tabela 5 – Consumo de energia considerando um slot (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012)	38

Lista de abreviaturas e siglas

Inglês

ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
CIR-MAS	<i>Circuit Interference Reduction with minimum Allocation Slots</i>
EON	<i>European Optical Network</i>
NLI	<i>Non-Linear Impairments</i>
NSFNet	<i>National Science Foundation Network</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
QoT	<i>Quality of Transmission</i>
QoTN	<i>QoT inadequate to the New optical circuit</i>
QoTO	<i>QoT inappropriate for some Others established circuits</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RMLSA	<i>Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment</i>
SNetS	<i>Slice Network Simulator</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
16QAM	<i>16 symbol Quadrature Amplitude Modulation</i>
64QAM	<i>64 symbol Quadrature Amplitude Modulation</i>

Lista de símbolos

λ	taxa de chegada média
μ	taxa de atendimento média
σ	margem de segurança para o formato de modulação
F_R	fragmentação relativa
$ReqSimultaneous$	número de requisições simultâneas
$TotalFreeSlots$	total de slots livres
r	quantidade de slots da requisição
NC	novo circuito
ΔSNR	Diferença do SNR do novo circuito e limiar de SNR do formato de modulação
$SNR_{circuito}$	SNR do novo circuito
$SNR_{LimiarMod}$	limiar de SNR do formato de modulação
$MIN\Delta SNR_{ativo}$	menor valor de ΔSNR dos circuitos ativos
$AllocationSlotsNumber$	número de slots alocados
$totalSlots$	total de slots no enlace
$slotsLivres$	número de slots livres na rota
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
L	nível do formato de modulação
M	bits por símbolo dos formatos de modulação
m	nível de modulação
P_{tx}	potência de sinal

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Organização da Dissertação	5
1.2	Trabalhos Publicados	5
2	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	7
2.1	Introdução a Redes Ópticas Elásticas	7
2.2	Topologias nas Redes Ópticas Elásticas	14
3	SISTEMAS FUZZY	15
3.1	Conceitos de sistemas <i>Fuzzy</i>	15
4	PROPOSTA DO ALGORITMO FUZZY-RQOTO	19
4.1	Algoritmo Fuzzy-RQoTO	19
5	PROPOSTA DO ALGORITMO CIR-MAS	25
5.1	Algoritmo CIR-MAS	25
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ALGORITMOS CIR-MAS E FUZZY-RQOTO	31
6.1	Avaliação de Desempenho	31
7	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	37
7.1	Modelo de Consumo de Energia e Eficiência Energética	37
7.1.1	Transponder	37
7.1.2	Comutador Óptico	38
7.1.3	Amplificador	38
7.1.4	Eficiência Energética	39
7.2	Análise dos Resultados de Eficiência Energética	39
8	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	43

1 Introdução

Considerando o rápido crescimento do tráfego global da Internet e os serviços emergentes, como aplicações multimídia, TV de alta definição, aplicações de rede em tempo real, as redes ópticas estão evoluindo para proporcionar maior capacidade de transmissão de dados e maior flexibilidade nas larguras de banda, afim de atender um maior número de clientes. Dentre elas, as redes ópticas elásticas têm se mostrado bastante proeminentes por atender a grandes volumes de dados e suportar a altas taxas de transmissão com alocação dinâmica de larguras de banda (ZHU et al., 2017).

As redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Network – EON*) têm se destacado por serem capazes de prover altas taxas de transmissão de dados com alocação dinâmica de larguras de banda. Na literatura relacionada ao estudo de redes ópticas elásticas destaca-se o problema RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*), o qual é caracterizado pela adoção de métodos de roteamento, escolha do nível de modulação e alocação espectral que influenciam na qualidade de transmissão (*QoT - Quality of Transmission*) dos circuitos ópticos. A QoT está associada com a relação sinal ruído (*SNR - Signal-to-Noise Ratio*) ao longo da distância de propagação.

A QoT do sinal sofre degradações, em consequência das imperfeições do meio físico, resultando em degradação do sinal óptico (efeitos lineares e não lineares). Para reduzir os efeitos deletérios dos circuitos nos sinais transmitidos são utilizados algoritmos para solucionar o problema RMLSA levando em consideração os efeitos de camada física (*IA - Impairment Aware*).

As redes ópticas elásticas apresentam o problema RMLSA que consiste em selecionar uma rota, escolher um formato de modulação e uma faixa espectral livre. A Figura 1 apresenta um exemplo do problema RMLSA.

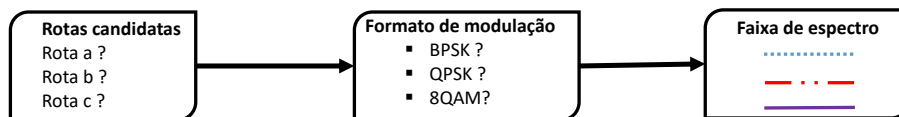


Figura 1 – Problema RMLSA nas EON.

De acordo com a Figura 1, o problema RMLSA consiste na escolha de uma das rotas de menores caminhos entre as rotas candidatas (rota *a*, rota *b* e rota *c*) na seleção do formato de modulação que possa aproveitar amplamente os recursos da rede: BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) ou 8QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) (BARBOSA et al., 2018). Após a fase de seleção do formato de modulação, é

verificado qual a faixa de espectro está livre para estabelecer o circuito.

A solução RMLSA proposta infere a quantidade de circuitos que podem ser estabelecidos e bloqueados (impactam na QoT da rede) em uma topologia de rede. Ao avaliar cenários mais realista, considerando os efeitos de camada física, outros problemas podem surgir, como a interferências de circuitos, seleção de formatos de modulação que possam estabelecer circuitos mais resistentes a interferências. Além disso, é necessário novas estratégias para seleção de rota para aproveitar amplamente os recursos tornando a rede com menor bloqueios de requisições possíveis.

Outro desafio a ser tratado na literatura diz respeito a considerar e mitigar o consumo de energia e eficiência energética nas redes ópticas elásticas (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012). O consumo de energia dos equipamentos de redes, tais como amplificadores, roteadores e *link* de comunicação aumentou com a crescente demanda dos serviços de voz, vídeo e dados pelos usuários da internet (DONG; EL-GORASHI; ELMIRGHANI, 2013a). Assim, a comunidade científica fazem um estudo sobre consumo de energia e eficiência energética nas redes ópticas elásticas.

Assim, as operadoras de telecomunicações e indústrias têm considerado pesquisas relacionado ao alto consumo de energia. Esse alto consumo é justificado não apenas pelo aumento de número de usuários e dispositivos da *Internet*, mas também pelos altos requisitos de larguras de banda de aplicativo, tais como *stream* de audio ou vídeo, TV de alta definição (4K), dentre outros. Portanto, com o crescimento contínuo de investimentos em infraestrutura do segmento de tecnologia da informação e comunicação (*ICT - Information and Communications Technology*), os equipamentos de rede chegam até 4% do orçamento energético total do mundo resultando em um aquecimento térmico da terra (BUYSSE et al., 2013).

Considerando os problemas mencionados, a área de pesquisa das redes ópticas elásticas apresenta diferentes alvos de estudo possibilitando oportunidade de otimização para utilizar amplamente os recursos e manutenção da rede. Essa coleção de problemas (e outros, como posicionamento e alocação de regeneradores, técnicas de sobrevivência e restauração após ocorrência de falhas) (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015) (CHAVES et al., 2015) demonstra ser interessantes nichos de estudos que têm atraído pesquisadores.

Neste sentido, diversas pesquisas vêm sendo conduzidas para propor soluções para o problema RMLSA cientes do efeito de camada física e para avaliação do consumo de energia e eficiência energética (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012) (VIZCAÍNO et al., 2014) (WANG; MUKHERJEE, 2014) (FONTINELE et al., 2016) (COSTA; DRUMMOND, 2016) (BARBOSA et al., 2017) (BARBOSA et al., 2018).

Os autores em (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012) apresentam uma comparação do desempenho em termos de eficiência energética das redes OFDM (*Orthogonal Frequency*

Division Multiplexing) com as redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) em um cenário em que as requisições são distribuídas de modo uniforme. Já os autores em (WANG; MUKHERJEE, 2014) apresentam três algoritmos de alocação de espectro utilizando o roteamento k-menores caminhos. Os algoritmos propostos são denominados *Complete Sharing* (CS), *Pseudo Partition* (PP) e *Dedicated Partition* (DP). O algoritmo CS seleciona a rota e os slots de forma que a faixa de espectro esteja mais próxima do início do espectro óptico. O PP, por sua vez, divide as requisições de circuitos ópticos de acordo com as especificações de largura de banda. Além disso, estabelece circuitos utilizando a política *First Fit* e *Last Fit*. O DP particiona os slots de frequência em regiões que são aplicadas para cada requisição. As requisições dependem da quantidade de slots necessárias para cada tipo de requisição.

Em (FONTINELE et al., 2016), é proposto um algoritmo IA-RMLSA para redes ópticas elásticas nomeado *K-Shortest Path with Reduction of QoTO* (KSP-RQoTO). O objetivo deste algoritmo é reduzir a probabilidade de bloqueio causada pela degradação da qualidade de transmissão proveniente do estabelecimento de novos circuitos. O algoritmo KSP-RQoTO busca selecionar os formatos de modulação para estabelecer circuitos mais resistentes a interferências de novos circuitos. A estratégia de seleção de rotas do algoritmo KSP-RQoTO é priorizar aquelas que evitem uma degradação maior em termos de SNR dos circuitos já ativos na rede.

Posteriormente, os autores em (COSTA; DRUMMOND, 2016) apresentaram uma nova abordagem para o problema RMLSA por meio da utilização de um esquema de modulação adaptativa. Com a utilização dessa abordagem, os autores propuseram o algoritmo *Maximize the use of Best Modulation format* (MBM) com o objetivo de realizar a maior agregação de sinais ópticos possível. Para isso, foram utilizados os níveis de modulação mais eficientes espectralmente por meio de múltiplos saltos na topologia virtual.

Já os autores em (BARBOSA et al., 2017) apresentaram um algoritmo adaptado que utiliza um formato de modulação intermediário. O algoritmo seleciona um formato de modulação que não apresente uma baixa eficiência energética e nem uma alta eficiência energética, forçando utilizar um formato de modulação intermediário com uma eficiência energética intermediária. O formato de modulação mais complexo apresenta uma baixa eficiência energética, enquanto que, formatos de modulação menos complexo apresenta alta eficiência energética.

Enquanto que os autores em (BARBOSA et al., 2018) apresentaram um novo algoritmo denominado de Fuzzy-RQoTO (*Fuzzy - Reduction Quality of Transmission Other circuits*). O algoritmo Fuzzy-RQoTO utiliza um sistema fuzzy para auxiliar na seleção da melhor rota (rota de qualidade) para um dado par (origem, destino), inferindo um grau de pertinência nas métricas: fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados. Além

disso, seleciona o formato de modulação mais resistente a interferências de outros circuitos utilizando o sigma (σ). O algoritmo Fuzzy-RQoTO foi comparado com os algoritmos *K-Shortest Path with Reduction of QoTO* KSP-RQoTO, *K-Shortest Path Computation* KS-PC e uma outra proposta Fuzzy.

Neste contexto, esse trabalho propõe dois novos algoritmos para solução do problema RMLSA considerando os principais efeitos deletérios atuantes na camada física. A primeira proposta denominada de Fuzzy-RQoTO (*Fuzzy - Reduction Quality of Transmission Other circuits*) utiliza uma estratégia de seleção do formato de modulação para estabelecer circuitos mais resistentes a interferências. Além disso, o algoritmo Fuzzy-RQoTO apresenta um sistema Fuzzy para auxiliar na escolha da melhor rota de qualidade (rota com mais recursos disponíveis) inferindo um grau de pertinência nas métricas fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados. Assim, o algoritmo Fuzzy-RQoTO atua na redução de bloqueio causado pela degradação da qualidade de transmissão do circuitos ópticos selecionando a melhor rota para o estabelecimento do circuito.

A segunda proposta denominada de CIR-MAS (*Circuit Interference Reduction with Minimum Allocation Slots*), é caracterizada pela redução de interferências com a minimização de slots alocados, e conseqüentemente, a seleção de formato de modulação mais resistente a interferência de circuitos ativos utilizando o $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$. O $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$ é um valor dinâmico que depende do estado da rede (dos circuitos ativos na rede). Além disso, o algoritmo CIR-MAS seleciona a rota com mínimo de slots alocados dentre as soluções alternativas de rotas, resultando na redução de bloqueio causado pela degradação de circuito. Um estudo de avaliação de desempenho foi realizado considerando ambas topologias NSFNet e EON comparando o desempenho do algoritmo CIR-MAS com os algoritmos *K-Shortest Path Computation* (KS-PC), *Modified Dijkstra Path Computation* (MD-PC) e *K-Shortest Path with Reduction Quality of Transmission other circuits* (KSP-RQoTO) já disponíveis na literatura.

Neste contexto, foi realizado um estudo de avaliação de desempenho nas topologias NSFNet e EON comparando com o desempenho dos algoritmos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO com os algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO. Os algoritmos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO apresentaram ganhos mínimos de 40,5% e 27,5% em termos de probabilidade de bloqueio do circuito, respectivamente. Em termos de probabilidade de bloqueio de largura de banda, o CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO relataram ganhos mínimos de 37,5% e 21,9%, respectivamente.

Além disso, realizou-se uma análise de eficiência energética dos algoritmos CIR-MAS, Fuzzy-RQoTO, KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO, considerando os equipamentos: transponders, comutadores ópticos e amplificadores (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012). Os transponders ficam localizados na parte do transmissor e receptor e são utilizados para modificar as propriedades do sinal. Os comutadores suportam diferentes canais de largura

de banda. Já o amplificador é utilizado para amplificação do sinal óptico.

Posteriormente, em termos de eficiência energética o algoritmo CIR-MAS apresentou uma eficiência energética superior (ganho mínimo) de 1,8% quando comparado aos algoritmos KS-PC e MD-PC, enquanto que apontou uma eficiência energética inferior (perca mínima) de 0,9% quando comparado aos algoritmos KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO.

1.1 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica de redes ópticas elásticas. Neste contexto, são destacados os problemas identificados na literatura das EON, como: RMLSA, restrições do meio óptico e fragmentação do espectro óptico. Adicionalmente, é apresentada informações sobre o modelo de camada física adotado nas redes ópticas elásticas.

O Capítulo 3 apresenta uma fundamentação teórica de lógica Fuzzy destacando o funcionamento de um sistema Fuzzy.

O Capítulo 4 apresenta a descrição do algoritmo Fuzzy-RQoTO (*Fuzzy-Reduction Quality of Transmission Other circuits*).

O Capítulo 5 apresenta a proposta do algoritmo de redução de interferência do circuito com minimização de slots alocados (*CIR-MAS – Circuit Interference Reduction with Minimum Allocation Slots*).

O Capítulo 6 apresenta um estudo de avaliação dos algoritmos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO.

O capítulo 7 apresenta a modelagem do consumo de energia. Além disso, é destacado a eficiência energética para avaliação dos algoritmos propostos.

O Capítulo 8 apresenta as conclusões e considerações finais deste trabalho de mestrado.

1.2 Trabalhos Publicados

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

- BARBOSA, E. L. V.; BRASILEIRO, I. B. ; SOARES, A. C. B. ; REIS JUNIOR, J. V. . **Análise do Consumo Energético dos Algoritmos Dijkstra e MMRDS na topologia USA nas Redes Ópticas Elásticas.** In: Encontro Regional de Informática do Piauí, 2017, Picos. Encontro Regional de Informática do Piauí, 2017.

- BARBOSA, E. L. V.; BRASILEIRO, I. B. ; SOARES, A. C. B. ; REIS JUNIOR, J. V. . **Nova Abordagem para o Problema de Roteamento nas Redes Ópticas Elásticas Utilizando Sistema Fuzzy**. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2017, Porto Alegre - RS. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente., 2017.
- BARBOSA, ENIO LUCIANO V.; BRASILEIRO, ITALO B. ; SOARES, ANDRE C. B. ; JUNIOR, JOSE V. DOS REIS . **Energy efficiency analysis with different modulation formats in elastic optical networks**. In: 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2017, Girona. 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2017. p. 1.
- BARBOSA, E. L. V.; Melo, Hallison P. ; BRASILEIRO, I. B. ; CUNHA NETO, R. P. ; RABELO, R. A. L. ; SOARES, A. C. B. ; REIS JUNIOR, J. V. . **Novo Algoritmo baseado no Uso dos Slots Para Definição de Roteamento nas Redes Ópticas Elásticas**. REVISTA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO - RSC, v. 7, p. 9, 2017.
- Barbosa, Ê. L., Soares, A., Machado, V. P., de AL Rabelo, R., Júnior, J. V. D. R. (2018, July). **New Solution based on Fuzzy System for the IA-RMLSA Problem in Elastic Optical Network**. In 2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE) (pp. 1-8). IEEE.
- BARBOSA, E. L. V.; Rabelo, R. A. L.; Soares, A. C. B.; Reis Junior, J.V.. **Avaliação de Desempenho de um Sistema Fuzzy nas Redes Ópticas Elásticas considerando o Problema IA-RMLSA para a Topologia USA**. Congresso Brasileiro de Automação - CBA, 2018.

2 Redes Ópticas Elásticas

Este capítulo descreve conceitos identificados na literatura das redes ópticas elásticas. São apresentadas as principais características da rede óptica elástica. Também é descrito a arquitetura da rede óptica elástica e seus principais componentes. Ainda neste capítulo, são apresentados os principais conceitos do problema RMLSA ciente dos efeitos de camada física (IA-RMLSA – *Impairment -Aware* RMLSA).

2.1 Introdução a Redes Ópticas Elásticas

As redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks-EON*) (TOMKOS et al., 2012), (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015) surgiram como solução para atender a grandes demandas de tráfego de dados, proporcionando flexibilidade no atendimento de requisições com diferentes larguras de banda em uma única fibra óptica. Essa flexibilidade ocorre devido à utilização da tecnologia (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM*) permitindo a divisão do espectro óptico em pequenos intervalos de frequência (12,5GHz) denominados de *slots* (BEYRANVAND; SALEHI, 2013). Os *slots* podem ser agrupados para formar maiores canais de comunicação de dados de acordo com os requisitos de largura de banda.

A arquitetura de uma EON é composta principalmente de *Bandwidth Variable Transponder* (BVT) e *Bandwidth Variable Cross-Connect* (BV-WXC) (FONTINELE et al., 2017). Neste contexto, as BVT são empregadas para adequar a largura de banda por meio do ajuste da taxa de bits de transmissão ou formato de modulação. Além disso, auxiliam nas transmissões de alta velocidade utilizando formatos de modulação mais eficientes espectralmente, a exemplo da aplicação do formato de modulação 64-*Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) para circuitos ópticos de pequenas distâncias. Para circuitos ópticos de longas distâncias, por outro lado, são adotados formatos de modulações menos eficientes em termos de alocação de espectro, porém mais robustos em termos de distância, a exemplo da modulação *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Os BV-WXC, por sua vez, representam a comutação de uma forma flexível por meio da largura espectral do sinal óptico. Este sinal é transmitido do nó origem até o nó destino completamente no domínio óptico sem sofrer conversão O-E-O (Óptico - Eletro - Óptico) nos nós. Isso ocorre devido ao surgimento dos dispositivos tais como os amplificadores ópticos à fibra dopada com érbio (*EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier*), multiplexadores/demultiplexadores ópticos e comutadores ópticos (*OXC - Optical Cross*

Connect) (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009). Em consequência disso, esses equipamentos permitem uma redução de custo na implantação e manutenção das redes ópticas.

Para estabelecer um circuito nas EON, é necessário solucionar o problema RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*), o qual consiste em escolher uma rota para um dado par (origem, destino), selecionar um nível de modulação e escolher uma faixa de espectro livre na rota escolhida (COSTA; DRUMMOND, 2016). A Figura 2 ilustra o problema RMLSA nas EON.

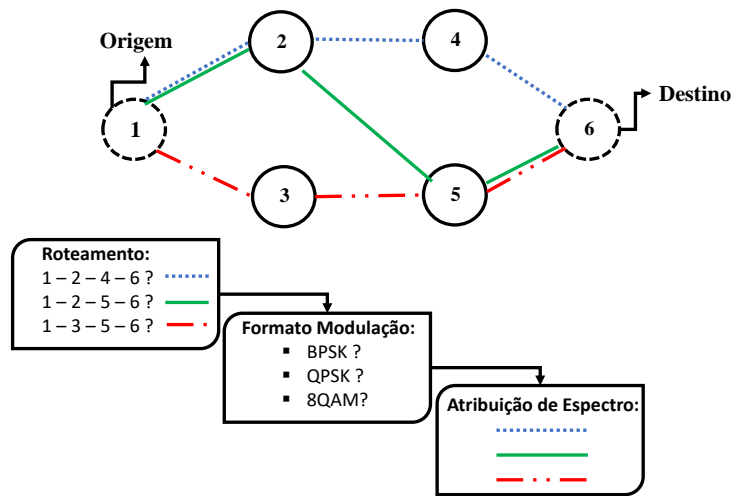


Figura 2 – Exemplo do problema RMLSA nas EON.

Como pode ser observado na Figura 2, a primeira etapa é a escolha da rota para o estabelecimento do circuito do nó 1 (origem) ao nó 6 (destino). Utilizando o algoritmo de menor caminho de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959), por exemplo, podem ser encontradas três possíveis rotas candidatas para o estabelecimento do circuito: 1-2-4-6, 1-2-5-6 ou 1-3-5-6. O problema da escolha da rota consiste em determinar qual das rotas candidatas possui a menor quantidade de saltos ou a menor distância física entre os nós origem e destino.

Após sanar o problema de roteamento é necessário escolher o nível do formato de modulação para o circuito. Formatos de modulação mais complexos transmitem mais bits por símbolo, como por exemplo, o 64QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) porém, são mais sensíveis a interferências. Por outro lado, formatos menos complexos transportam menos bits por símbolo, a exemplo do BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), entretanto são mais resistentes a interferências (FONTINELE et al., 2017). A Figura 3 ilustra os formatos de modulação com seus respectivos limiares de SNR.

Como ilustrado na Figura 3, os formatos de modulação BPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*(QPSK), 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM com seus limiares de SNR (6, 9, 12, 15, 18, 21), respectivamente (FONTINELE et al., 2017). Formatos de modulação que apresentam maiores limiares de SNR são mais eficientes espectralmente, pois transmitem

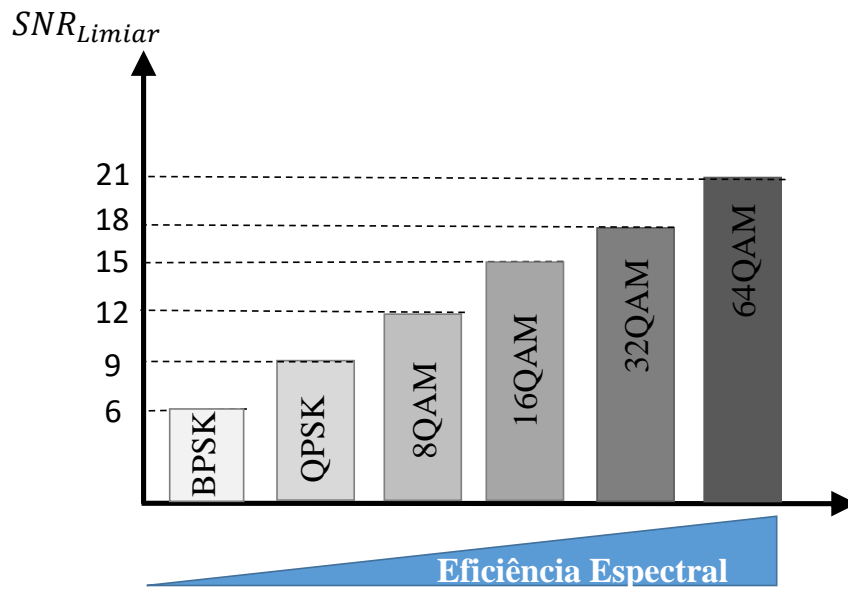


Figura 3 – Formatos de modulação.

mais bits por símbolo, entretanto, são mais suscetíveis a interferências de circuitos (FONTINELE et al., 2016). Ao estabelecer um circuito, é necessário que o nível de SNR do circuito seja maior que o limiar de SNR do formato de modulação para que não torne o sinal indecifrável para o receptor.

A escolha do nível de modulação leva em consideração a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission - QoT*) necessária e, por conseguinte, a tolerância de relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio - SNR*) (COSTA; DRUMMOND, 2016).

Para avaliação da QoT dos circuitos, foi adotado um modelo de camada física que representa o impacto dos principais efeitos deletérios provenientes da não idealidade do meio físico no sinal transmitido. Esse modelo permite calcular o SNR durante a propagação do sinal. O cálculo de SNR do circuito p é definido pela Equação 2.1 (JOHANNISSON; AGRELL, 2014), (ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015), (YAN et al., 2015):

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

onde, I representa a densidade espectral da potência do sinal (*PSD - Power Spectral Density*), definido por $I = P_{tx}/\Delta_f$, em que P_{tx} representa a potência de sinal e Δ_f representa 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).

À medida que o sinal óptico se propaga de um nó origem até o nó destino, existe um acúmulo das degradações no sinal óptico que pode vir a tornar a taxa de erro de

bit (BER - *Bit Error Rate*) intolerável no receptor e, conseqüentemente, inviabilizar a comunicação (RAHBAR, 2012). A Figura 4 ilustra a propagação do sinal até chegar ao destino com qualidade abaixo do limiar tolerado pela rede.

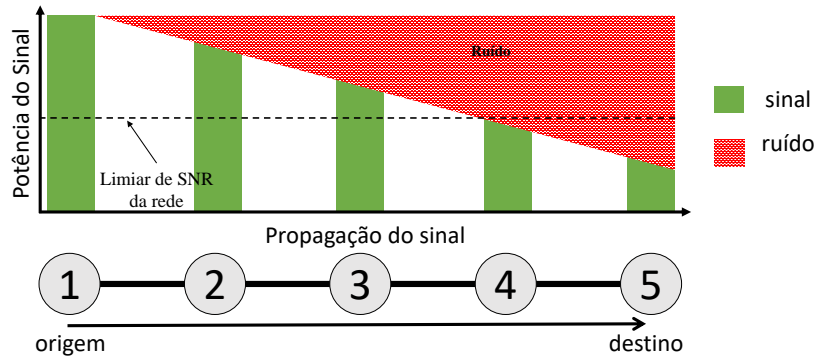


Figura 4 – Propagação do sinal até o destino com qualidade de transmissão abaixo do limiar tolerado pela rede.

Como pode ser observado na Figura 4, o nível de SNR é reduzido à medida em que o sinal óptico se propaga até o receptor. Isso pode tornar o sinal óptico indecifrável e inviabilizar a detecção de dados. Isso ocorre devido às imperfeições de camada física conhecidos como efeitos lineares e efeitos não-lineares (FONTINELE et al., 2016). Os efeitos lineares são conhecidos como atenuação e dispersão cromática. Já para os efeitos não-lineares são a auto modulação de fase, modulação de fase cruzada e a mistura de quatro ondas.

Ao escolher o formato de modulação surge o problema de selecionar um intervalo de *slots* do espectro óptico livres para atender a requisição. A quantidade de *slots* utilizados para cada circuito óptico depende do formato de modulação adotado e da largura de banda requisitada. Depois de determinar a quantidade de *slots* necessários para o estabelecimento do circuito, deve-se procurar os *slots* livres nos enlaces da rota respeitando as restrições do meio óptico. Tais restrições são caracterizadas de ambas continuidade e contiguidade do espectro (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Na restrição de continuidade, os mesmos *slots* selecionados para alocação devem estar livres em todos os enlaces da rota. Para a restrição de contiguidade, os *slots* precisam estar adjacentes para atender requisições que necessitem de dois ou mais *slots*. A dinâmica de alocação e desalocação dos recursos espectrais provoca o surgimento de pequenos intervalos de *slots* livres isolados. A Figura 5 ilustra as restrições do meio óptico.

A Figura 5(a) têm-se a representação da restrição de continuidade no espectro óptico. Ao surgir requisição de um *slot* para estabelecer um circuito óptico do nó 1 (origem) ao nó 4 (destino), cada índice de cada enlace deve estar livre para o estabelecimento do circuito. Por exemplo, o índice 2 do enlace 1, enlace 2 e enlace 3 deve estar livre, caso

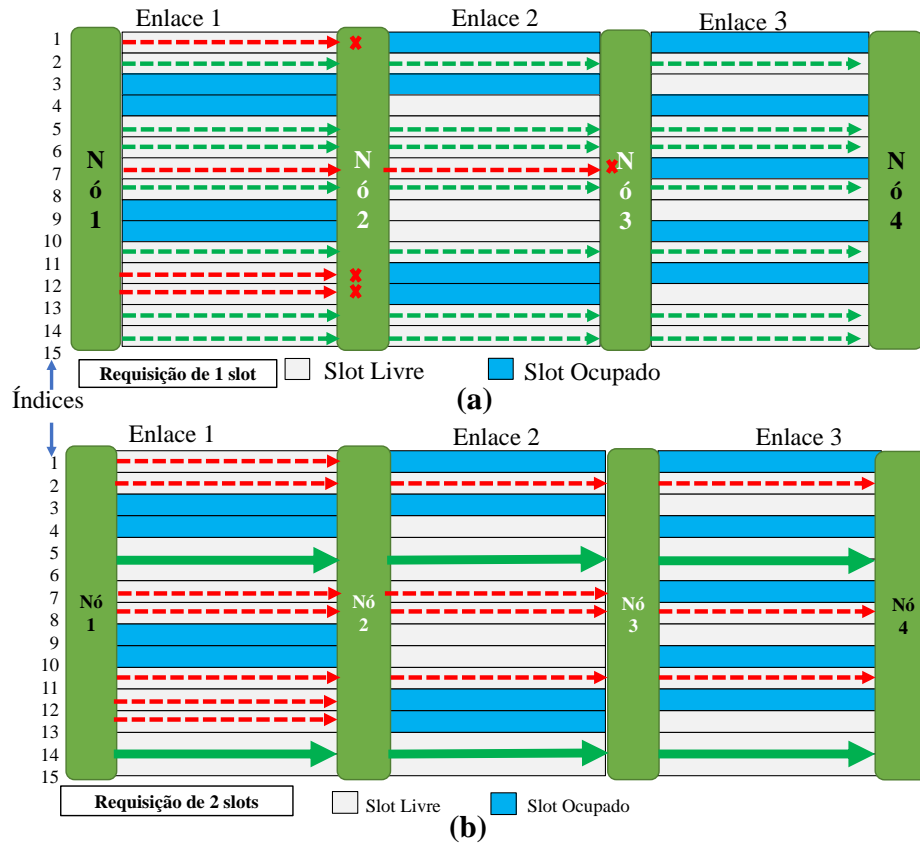


Figura 5 – Restrição do meio óptico nas EON: (a) Restrição de continuidade e (b) restrição de contiguidade.

contrário, o circuito não será estabelecido. A Figura 5(b) apresenta, por sua vez, um exemplo da restrição de contiguidade. Quando surgem requisições de dois ou mais *slots*, os *slots* devem ser adjacentes. Por exemplo, os índices 5 e 6 dos enlaces 1, 2 e 3 estão livres e, dessa forma, a requisição é atendida. Nesse cenário, as requisições de 3 *slots* não serão atendidas devido a ausência de *slots* livres contínuos e contíguos.

Esses *slots* livres isolados caracterizam o problema de fragmentação de espectro (HOROTA; FIGUEIREDO; FONSECA, 2014). A Figura 6 ilustra um exemplo das restrições do meio óptico e do problema da fragmentação.

A Figura 6 têm-se o nó origem e destino representados pelos nós 1 e 3, respectivamente. O enlace 1 apresenta 4 *slots* ocupados no espectro (índices 1, 4, 5, 7) e 4 *slots* livres (índices 2, 3, 6, 8). O enlace 2, por outro lado, apresenta 5 *slots* ocupados (índices 1, 4, 5, 6, 7) e 3 *slots* livres (índices 2, 3, 8). Portanto, uma requisição que necessite de 3 *slots* não pode ser atendida devido a ausência de 3 *slots* livres contínuos e contíguos no espectro óptico, em consequência da fragmentação. No entanto, requisições que necessitem de 1 *slot* podem ser atendidas (índices 2, 3 e 8) a partir dos enlaces 1 e 2. Além disso, requisições de 2 *slots* podem ser atendidas devido os índices (2 e 3) do espectro óptico dos enlaces 1 e 2 serem contínuos e contíguos. Para avaliar o quanto o espectro da rota está

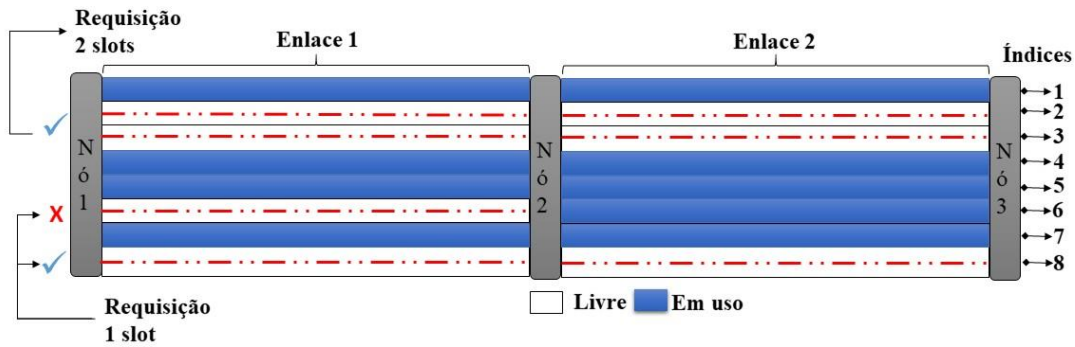


Figura 6 – Problema da Fragmentação.

fragmentado é realizado o cálculo da fragmentação relativa (HOROTA; FIGUEIREDO; FONSECA, 2014), conforme apresentado na Equação 2.2.

$$F_R(r) = 1 - \frac{r * ReqSimultaneous(r)}{TotalFreeSlots}, \quad (2.2)$$

onde r representa a quantidade de *slots* da requisição para ser atendida, $ReqSimultaneous(r)$ representa o número de requisições simultâneas de tamanho r que podem ser atendidas e $TotalFreeSlots$ representa a quantidade de *slots* livre que o espectro possui na rota.

À medida que o sinal óptico se propaga da origem ao destino, o mesmo sofre degradações devido as imperfeições da camada física (*Impairment Aware* – IA) provenientes de atenuação e dispersões (lineares e não lineares). Aos leitores interessados, a modelagem da camada física utilizada neste trabalho podem ser encontradas em (FONTINELE et al., 2017). Além disso, o excesso de degradações do sinal óptico ao longo da rota resulta em uma *BER* intolerável no receptor, dificultando a comunicação (FONTINELE et al., 2017).

Além de solucionar o problema RMLSA, é necessário satisfazer novos critérios para o estabelecimento de um circuito, como: *i*) se existe disponibilidade de espectro óptico na rota escolhida; *ii*) A QoT é aceitável para o circuito que está sendo estabelecido e *iii*) a QoT para todos os demais circuitos já ativos na rede é mantida aceitável, considerando que o novo circuito óptico seja atendido. Seguindo esta modelagem, pode-se decompor a probabilidade de bloqueio geral da rede em três componentes: *i*) bloqueio pela indisponibilidade de espectro livre que dê suporte à largura de banda requisitada pelo novo circuito óptico – esse tipo de bloqueio pode ocorrer pela fragmentação do espectro ou pela Ausência de Espectro Livre (*Absence of Free Spectrum* - *AFS*) na rota selecionada; *ii*) QoT inadequada para o novo circuito óptico (*Quality of Transmission New circuit* - *QoTN*) e *iii*) QoT

inadequada para os outros circuitos ópticos já ativos na rede (*Quality of Transmission Other circuit - QoTO*).

Neste contexto, o bloqueio por fragmentação ocorre quando há slots disponíveis na rota, porém encontra-se dispersos no espectro, resultando na ausência de slots contínuos e contíguos suficientes para atender as requisições. Quando não há quantidade suficiente de slots disponíveis no espectro para atender a requisição, ocorre o bloqueio por ausência de espectro livre. Em termos de bloqueio do tipo QoTN, ao estabelecer um novo circuito é necessário que o SNR do novo circuito seja maior que o limiar de SNR exigido da rede, caso contrário, irá resultar em bloqueio do tipo QoTN. Já no bloqueio do tipo QoTO, ao estabelecer um novo circuito, os circuitos ativos sofrem interferência reduzindo os seus respectivos SNR. Caso algum dos circuitos ativos apresente um nível de SNR inferior ao limiar de SNR exigido da rede, então irá sofrer bloqueio do tipo QoTO. A Figura 7 ilustra um exemplo de um circuito sendo bloqueado por QoTN e QoTO.

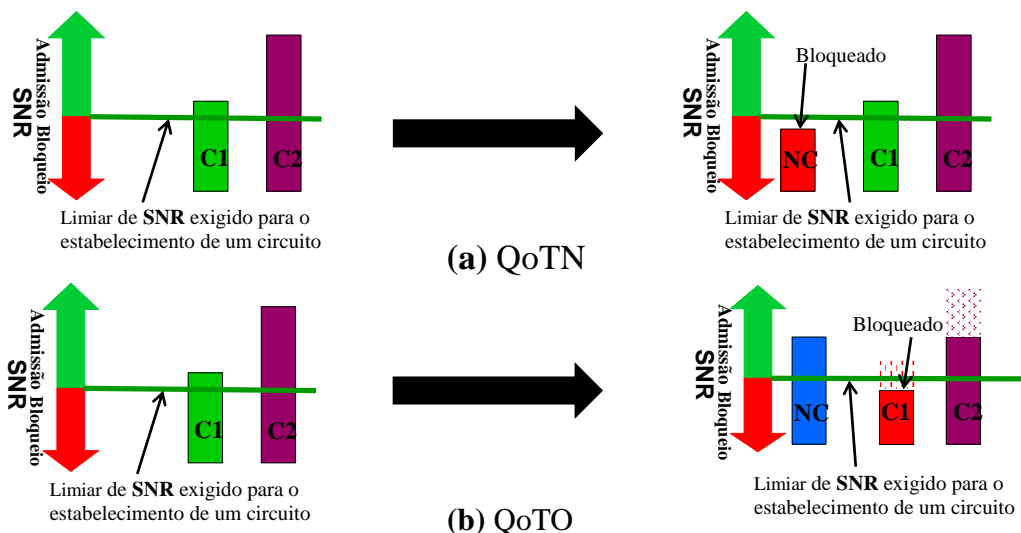


Figura 7 – Circuito causando bloqueio do tipo (a)QoTN e (b)QoTO.

De acordo com a Figura 7(a), são apresentados dois circuitos ativos (C1 e C2). Vale ressaltar que o circuito C1 está próximo ao limiar de SNR. Os circuitos que apresentarem um SNR maior ou igual ao limiar de SNR exigido pela rede, podem ser estabelecidos. Nesse sentido, um novo circuito (NC) tenta ser estabelecido, porém apresenta um SNR abaixo do limiar de SNR exigido pela rede e dessa forma, esse novo circuito não é estabelecido resultando em um bloqueio do tipo QoTN. Já na Figura 7(b), um novo circuito (NC) é estabelecido, pois apresenta um limiar superior ao limiar exigido pela rede. No entanto, quando os circuitos são estabelecidos, os circuitos ativos (C1 e C2) sofrem interferências reduzindo o limiar de SNR e nesse caso, o circuito C1 apresenta um SNR abaixo do limiar exigido pela rede resultando em um bloqueio do tipo QoTO. Diferentemente, o circuito C2, mesmo reduzindo o seu limiar, ainda apresenta um SNR superior ao limiar exigido pela rede portanto, não é bloqueado.

2.2 Topologias nas Redes Ópticas Elásticas

Um das principais topologias utilizada na literatura são as Topologias NSFNet, USA e EON. (BRASILEIRO; JÚNIOR; SOARES, 2016) (FONTINELE et al., 2017) (BARBOSA et al., 2018), vide Figura 8.

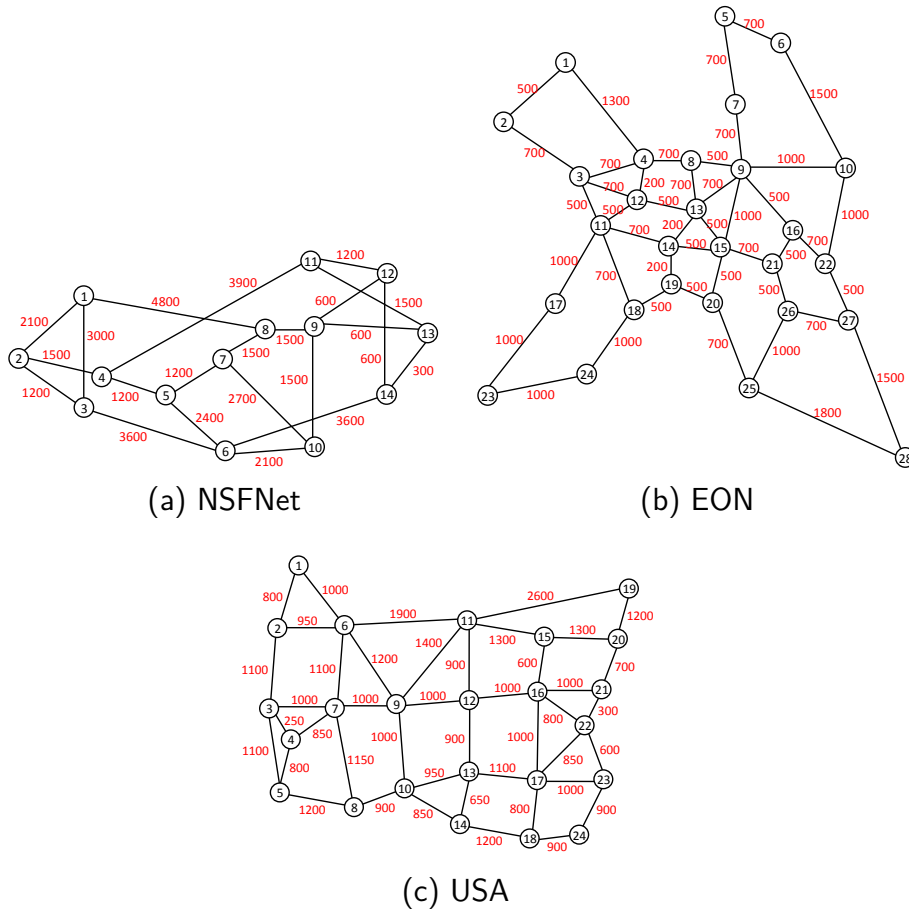


Figura 8 – Topologias usadas no estudo de avaliação de desempenho. O número em cada enlace corresponde a distância em km.

De acordo com a Figura 8 (a), a topologia NSFNet apresenta 14 nós e 22 enlaces, já a topologia EON apresenta 28 nós e 54 enlaces (Figura 8(b)), enquanto que a topologia USA apresenta 24 nós e 43 enlaces (Figura 8(c))

Este capítulo apresentou a fundamentação de redes ópticas elásticas, considerando o problema RMLSA e qualidade de transmissão. Além disso, apresentou conceitos e termos utilizados na literatura de redes ópticas elásticas. O próximo capítulo uma fundamentação teórica de lógica Fuzzy destacando o funcionamento de um sistema Fuzzy.

3 Sistemas Fuzzy

Este capítulo descreve conceitos identificados na literatura de lógica Fuzzy destacando o funcionamento de um sistema Fuzzy.

3.1 Conceitos de sistemas *Fuzzy*

A lógica fuzzy tem contribuído muito para suas aplicações, mostrando ser uma técnica de controle bastante eficiente e de fácil aplicação. Esta ideia surgiu como um aperfeiçoamento da lógica booleana, no qual respostas como “verdadeiro” (1) ou “falso” (0) não são aplicáveis para situações reais (MARRO et al., 2010), portanto a lógica fuzzy fornece uma melhor representação da realidade do que o método matemático clássico. O termo *fuzzy* é uma palavra da língua inglesa, e significa *incerto, vago, nebuloso* (mais utilizado pela comunidade científica) (MARRO et al., 2010).

A teoria dos conjuntos fuzzy e os conceitos de lógica fuzzy podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Devido a sua facilidade de implementação, a lógica fuzzy tem sido aplicado em várias áreas, bem como na engenharia, ciência da computação, matemática, ciências sociais e humanas, ciências da vida, dentre outras (KAHRAMAN; ÖZTAYŞI; ONAR, 2016).

Neste contexto, a lógica *Fuzzy* utiliza valores entre (0) e (1), buscando valores inexatos, imprecisos e aproximados. Essa capacidade de fornecer respostas sobre um conjunto de informações imprecisas e vagas é o que define à lógica *fuzzy* (CAVALCANTI et al., 2012). Diferentemente da lógica booleana, no qual necessitam de valores definidos, exatos, precisos, como: alto, baixo, quente, frio, leve, pesado, impedindo o uso de um meio termo (meio alto, meio frio, meio quente, meio pesado). Assim, uma pertinência de 0.5 pode ser considerado "meia verdade". A Figura 9 apresenta a lógica booleana e lógica *Fuzzy*.

Considerando dois objetos, com as alturas de 1,78m (Obj_1) e 1,81 (Obj_2), respectivamente. Na lógica booleana, o Obj_1 é considerado baixo, apesar de ter uma altura próximo á 1.80 (que ja é considerado alto), enquanto que o Obj_2 representa uma altura alta. Na lógica *Fuzzy*, cada um dos objetos apresenta um grau de pertinência do conjunto *Fuzzy* delineado no intervalo de [0, 1]. O grau de pertinência é o quanto aquele elemento pertence a um determinado conjunto *Fuzzy*, além disso, o elemento pode pertencer a diversos conjuntos *Fuzzy*, com um valor de grau de pertinência pertencente a cada conjunto (CAVALCANTI et al., 2012). Vale ressaltar que o grau de pertinência é um cálculo de

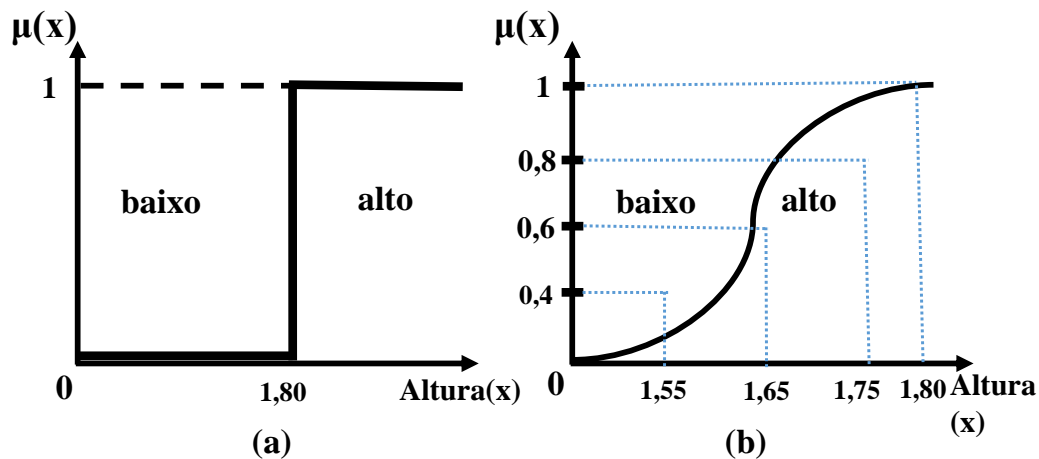


Figura 9 – Exemplo da altura de um objeto representada por: (a) lógica booleana e (b) lógica *fuzzy*.

compatibilidade do elemento com o conceito representado pelo conjunto *Fuzzy* (CAVALCANTI et al., 2012). A Figura 10 apresenta os elementos componentes de um conjunto *fuzzy*.

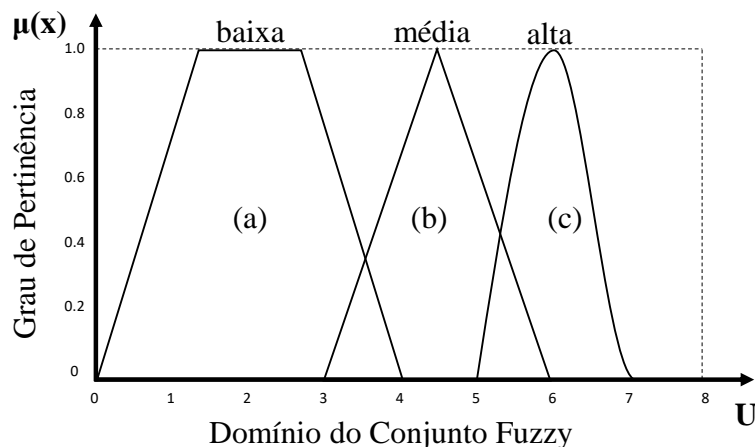


Figura 10 – Componentes de um conjunto *fuzzy*.

Na Figura 10, as variáveis baixa, média e alta representam as variáveis linguísticas. Uma variável linguística representa valores que são palavras na linguagem natural. As variáveis linguísticas oferece uma maneira sistemática de aproximação das variáveis encontradas em problemas complexos. Essas variáveis são definidas através de termos, como "baixo", "média", "alta", "mediano", "quente", "frio", "morno" e dentre outros. As variáveis linguísticas tem como objetivo utilizar termos linguísticos do dia a dia empregados por pessoas, permitindo uma análise de sistemas complexos por meio de mecanismos matemáticos para solução do problema (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 1995).

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). As variáveis linguísticas podem ser combinadas, através de diferentes operadores (*AND*, *OR*), gerando novas proposições (*IF..THEN*). O resultado dessa combinação é descrito em termos de relações *fuzzy*. A determinação do valor da combinação pode ser determinado de maneiras diferentes ocorrendo da melhor forma quando a análise é feita por um especialista (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 1995).

As funções de pertinências são associadas diretamente aos conjuntos *fuzzy*, no qual são formas de representar o conhecimento do especialista em relação o grau de pertinência que o objeto pertence ao conjunto *fuzzy*. De acordo com a Figura 10, são apresentados três tipos de funções de pertinência: trapezoidal (Figura 10(a)), triangular (Figura 10(b)) e gaussiana (Figura 10(c)). Essas funções de pertinência são as mais utilizadas por consequência da facilidade de implementação e determinação dos parâmetros.

Além disso, a lógica Fuzzy apresenta três etapas de raciocínio Fuzzy: a fuzzificação, inferência e defuzzificação. No processo de fuzzificação as variáveis linguísticas são definidas de forma subjetiva, bem como as funções membro (funções de pertinência), ou seja, englobando a análise dos problemas, definição das variáveis, definição das funções de pertinências. Na etapa da inferência, as proposições (regras, *IF.. THEN*) são definidas e depois analisadas paralelamente. Já o processo de defuzzificação os valores são convertidos em valores numéricos para a variável de saída do sistema. A Figura 11 apresenta o sistema de Inferência Fuzzy.

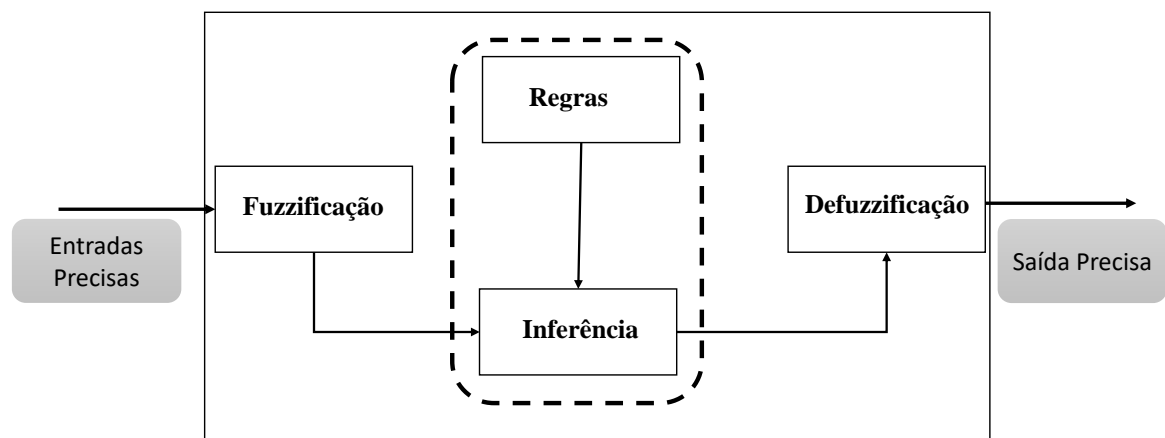


Figura 11 – Sistema de Inferência Fuzzy *fuzzy*.

De acordo com a Figura 11, as *Entradas Precisas* são consideradas não-fuzzy, resultantes de medições ou observações, como por exemplo, conjuntos de dados. Neste contexto, é necessário efetuar um mapeamento dos dados precisos para os conjuntos fuzzy (de entrada), no qual é caracterizado de *fuzzificação*. Além disso, ocorre a ativação das regras

relevantes para um determinado momento. Já as *Regras* são fornecidas pelo especialista da área que está sendo utilizado o sistema Fuzzy em forma de sentença linguística (Se.. então) e o estágio de *Inferência* define como as regras são ativadas e combinadas.

Após obtido o conjunto Fuzzy de saída através do processo de inferência, o processo de defuzzificação é realizado uma interpretação dessa informação fornecendo uma saída precisa (valor numérico). Neste contexto, para aplicação do método de defuzzificação é necessário que a função de pertinência do conjunto de saída esteja definida. Existem diversos métodos de defuzzificação e para utilização de cada um, depende do domínio de aplicação em desenvolvimento.

Desta forma, os métodos de defuzzificação são: centro de massa (ou centróide), média dos máximos, média ponderada dos máximos, método do critério máximo (ou mínimo) (YING, 2000). O método centróide representa o centro de gravidade da distribuição de possibilidade de saída do sistema fuzzy obtida pelo valor numérico. O método da média dos máximos representa o valor médio de todos os valores centrais ativados obtidos de um valor numérico. O método da média ponderada dos máximos considera a média ponderada dos valores centrais ativados através de um valor numérico, enquanto que o método do critério máximo (ou mínimo) representa um valor numérico igual ao máximo (mínimo) valor ativado.

O sistema de inferência Fuzzy aqui abordado é o Mamdani, no qual iniciou diversas aplicações na década de 70 (YING et al., 1999). Um outro sistema de inferência Fuzzy também ficou bem conhecido, caracterizado de Sugeno, criado por H.Takagi e M. Sugeno (SUGENO, 1985). Esse sistema de inferência Fuzzy representa uma simplificação do controlador de Mamdani, no qual o consequente da regra é caracterizado por uma função das variáveis linguísticas de entrada. Neste contexto, o resultado de cada regra é representado por um valor numérico (não é um conjunto fuzzy), assumindo como peso o valor do grau de pertinencia resultante do processamento do antecedente da regra, e por conseguinte, não há necessidade de uma definição de uma função de implicação específica (ANDRADE; JAQUES, 2008). Além disso, não há processo de defuzzificação devido a resposta final do controlador ser obtida pela média ponderada das respostas das regras individuais. O próximo capítulo aborda a proposta do algoritmo Fuzzy-RQoTO nas redes ópticas elásticas.

4 Proposta do Algoritmo Fuzzy-RQoTO

Este capítulo é apresentada a descrição do algoritmo proposto fuzzy-RQoTO nas redes ópticas elásticas. Neste contexto, as informações sobre o funcionamento de um Sistema Fuzzy, genericamente, podem ser encontrada no capítulo 3.

4.1 Algoritmo Fuzzy-RQoTO

Inicialmente, o algoritmo Fuzzy-RQoTO calcula os k menores caminhos para cada par de nó origem e destino da rede em uma fase *off-line*. O algoritmo aplica o sistema Fuzzy para seleção de rota em conjunto com a escolha da modulação e mecanismo de alocação de espectro. A Figura 12 apresenta o fluxograma com os passos seguidos pelo algoritmo Fuzzy-RQoTO.

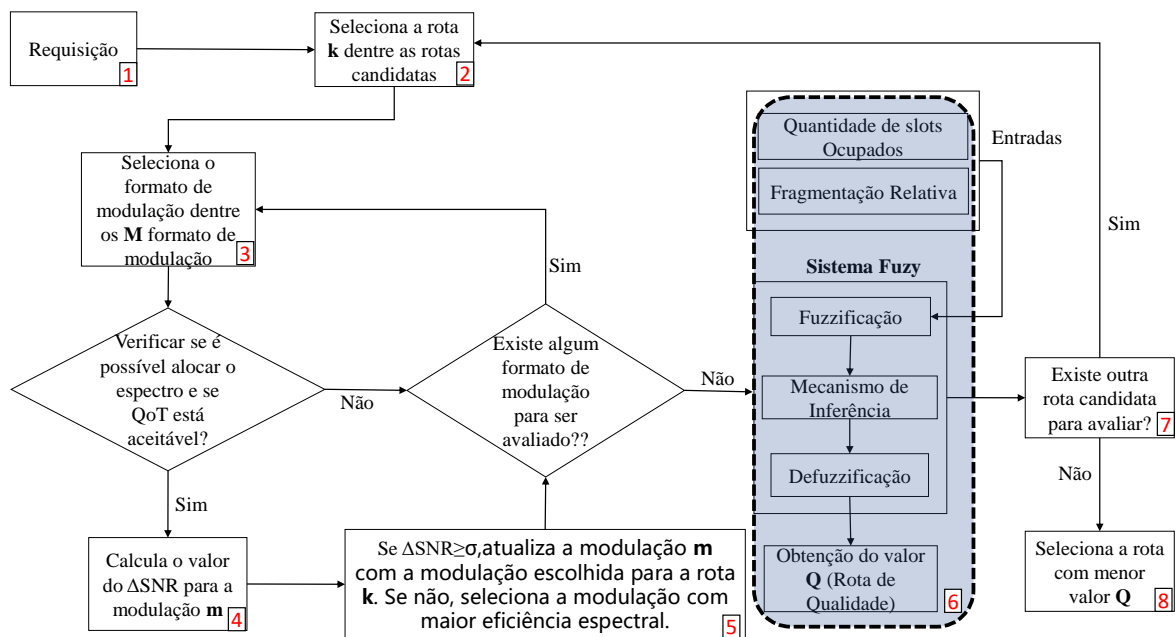


Figura 12 – Fluxograma do algoritmo Fuzzy-RQoTO.

O bloco em destaque na Figura 12 representa a contribuição do algoritmo Fuzzy-RQoTO em relação a proposta KSP-RQoTO (FONTINELE et al., 2017). Em cada retângulo do fluxograma do algoritmo apresenta uma enumeração representando as etapas do algoritmo Fuzzy-RQoTO de 1 até 8.

Como pode ser observado na 12, surge uma requisição (etapa 1) e verifica-se que no primeiro passo é escolhida uma rota entre as k rotas candidatas que foram encontradas

na fase *off-line* do algoritmo (etapa 2). A seguir, é selecionado o primeiro formato de modulação entre o M formatos de modulação disponíveis (etapa 3).

Os formatos de modulação estão ordenados de maneira crescente em eficiência espectral. Sabendo qual formato de modulação deverá ser testado, é possível calcular a quantidade de slots necessários para o estabelecimento do circuito. Com essa informação é verificado se é possível alocar espectro e se a QoT do circuito está aceitável (significa que o SNR alcançado pelo circuito está acima ou igual ao limiar de SNR do formato de modulação selecionado). O limiar de SNR caracteriza o limite mínimo de SNR tolerado pelo receptor.

Se for possível estabelecer o circuito com o formato de modulação escolhido, então é calculado o ΔSNR do circuito (etapa 4). Depois é verificado se o ΔSNR é maior ou igual ao valor do sigma (σ) (etapa 5). O σ representa uma margem de segurança para a seleção de um formato de modulação. O ΔSNR representa a diferença entre o SNR atual do circuito e o limiar de SNR do formato de modulação. Se o $\Delta\text{SNR} \geq \sigma$ o formato de modulação m é selecionado para a rota em avaliação. Caso contrário, o algoritmo escolherá o formato de modulação com a maior eficiência espectral que for possível estabelecer o circuito. A fase de seleção de formato de modulação é realizada até que todos os m formatos de modulação sejam avaliados (etapa 5).

A escolha de um valor para σ deve ser feita durante a fase de planejamento da rede ou durante uma alteração da configuração da rede. O valor ideal para o σ tem como objetivo estabelecer circuitos mais resistentes as degradações causadas pelo estabelecimento de novos circuitos e deve ser escolhido de maneira a reduzir a probabilidade de bloqueio geral. A Figura 13 apresenta a importância de selecionar com ponderação o valor para o σ .

Observa-se na Figura 13 que se o valor para o σ for muito pequeno o circuito estabelecido pode ser frágil a interferências de outros circuitos (Circuito 2). O estabelecimento de novos circuitos que afetem significativamente um circuito frágil pode deixar o seu SNR abaixo do limiar de SNR exigido para o estabelecimento de um circuito (Circuito 1). No entanto, não é conveniente escolher um valor muito grande para o σ , pois o circuito pode precisar de muitos recursos (espectro) para ser estabelecido (Circuito 3). Isso pode fazer o circuito sofrer um bloqueio por fragmentação ou ausência de espectro livres. Assim, o ideal é buscar por um valor de σ que torne o circuito resistente a interferências de outros circuitos e não consuma muitos recursos da rede (Circuito 4). Esses valores do σ (0,25 e 0,5) foram os mesmos adotados no trabalho de (FONTINELE et al., 2017). São valores fixos feitos por um estudo do valor do σ , por meio de varias simulações. Mais detalhes podem ser encontrados em (FONTINELE et al., 2017).

Posterior à fase da seleção do formato de modulação, é necessário selecionar a rota com mais recursos disponíveis para o estabelecimento do circuito. Adicionalmente, o sistema Fuzzy auxilia na escolha da rota mapeando duas métricas a fragmentação

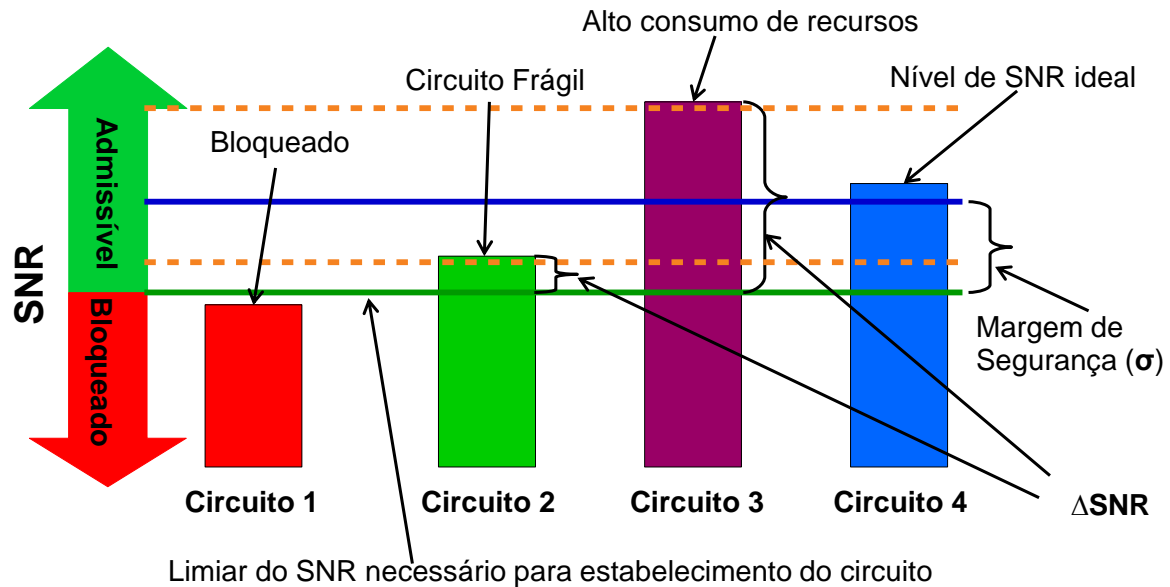


Figura 13 – A importância de selecionar com ponderação um valor para a margem de segurança (σ).

relativo e quantidade de slots ocupados (etapa 6). A escolha dessas duas métricas é em consequência do impacto que causam na rede. O sistema Fuzzy é composto por uma base de dados, mecanismo de inferência e regras (ZHANG; ZHU, 2014). É atribuído um grau de pertinência para as k rotas utilizando as métricas adotadas para a escolha da rota. Além disso, para a definição da função de pertinência associada as variáveis de entradas foram adotadas a função gaussiana por apresentar resultados mais significativos quando comparada as funções de pertinência triangular e trapezoidal. Já para a função de pertinência associada a qualidade da rota, a função triangular apresentou resultados mais significativos quando comparado a função gaussiana e trapezoidal.

O primeiro critério avaliado é a fragmentação relativa para a escolha da rota. São adotados valores entre zero (0) e um (1) considerando que quanto mais próximo de um (1), mais o espectro está fragmentado resultando em bloqueios de requisições por fragmentação. Os valores entre 0 e 1 são utilizados de acordo com a Equação 2.2.

Portanto, a fragmentação relativa é útil para apontar a rota com menor grau de fragmentação para estabelecer o circuito. A Figura 14 ilustra a definição das funções de pertinências associada à variável linguística fragmentação relativa. Foi utilizada a função gaussiana com três termos linguísticos baixo, médio e alto adotando valores de 0, 0.5 e 1, utilizando o desvio padrão de 0.2.

O segundo critério avaliado para a definição da qualidade da rota é a quantidade de slots ocupados. Quanto menos slots contíguos e contínuos na rota, mais requisições serão aceitas com diferentes larguras de banda. A Figura 15 ilustra a definição da função

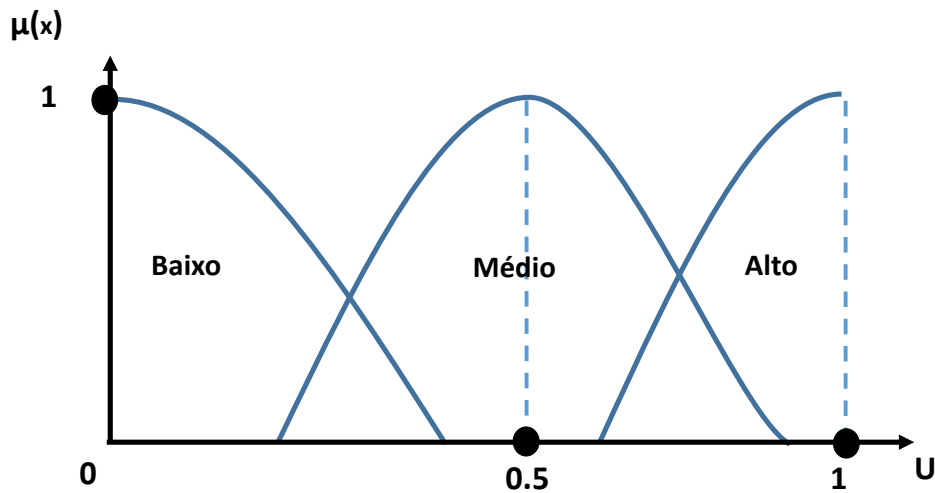


Figura 14 – Definição da função de pertinência associadas à fragmentação relativa.

de pertinência associadas à fragmentação relativa com os valores definidor de 1, 200 e 400 slots ocupados e um desvio padrão de 80. Foi utilizado 400 como limite máximo para o universo de discurso, porque cada enlace da rede possui 400 slots.

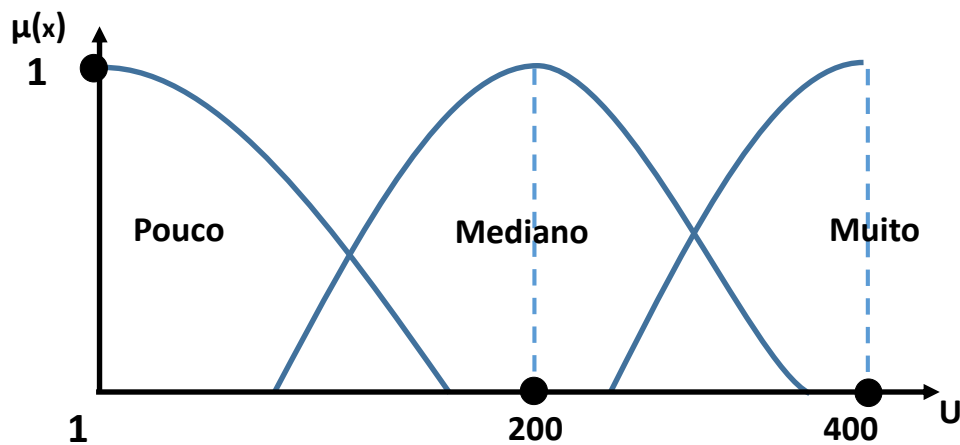


Figura 15 – Definição da função de pertinência associadas à quantidade de slots ocupados.

Uma função de pertinência gaussiana utilizando três termos linguísticos foi adotada, são eles pouco, mediano e muito. No processo de defuzzificação foi adotado o método centróide e quatro (4) termos linguísticos, descritos como: excelente, muito bom, bom e regular. A função de pertinência triangular foi adotada que se possível comparar os resultados obtidos com os previamente estabelecidos em (BRASILEIRO; JÚNIOR; SOARES, 2016). A Figura 16 ilustra a função de pertinência triangular para a definição da função linguística associada a qualidade da rota.

No estágio de defuzzificação, cada rota terá um valor de Q representando a qualidade da rota (rota com mais recursos disponíveis)(etapa 7) e a rota que apresentar um menor

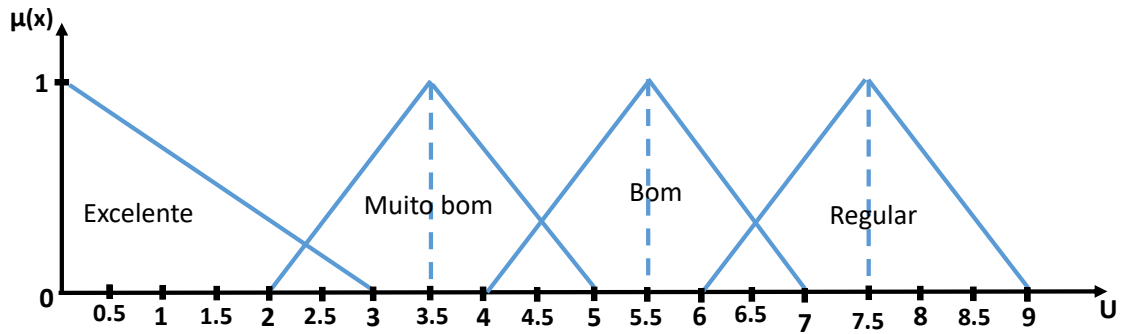


Figura 16 – Termos primários para a definição da função linguística associada a qualidade da rota.

valor de Q será a rota escolhida (etapa 8).

A quantidade de regras é baseada na quantidade de variáveis de entrada e de termos linguísticos, utilizando a fórmula k^n . A variável k representa a quantidade de termos linguísticos, enquanto n representa a quantidade de variáveis de entrada. Neste caso, a quantidade de regras para o cenário em estudo totaliza nove (9) regras. A Tabela 1 apresenta a base de regras adotada na modelagem do sistema Fuzzy.

Tabela 1 – Base de regras do sistema Fuzzy.

Regras	Fragmentação Relativa	Quantidade de Slots Ocupados	Saída
Regra 1	Baixo	Pouco	Excelente
Regra 2	Baixo	Mediano	MuitoBom
Regra 3	Baixo	Muito	Bom
Regra 4	Médio	Pouco	Excelente
Regra 5	Médio	Mediano	MuitoBom
Regra 6	Médio	Muito	Bom
Regra 7	Alto	Pouco	MuitoBom
Regra 8	Alto	Mediano	Regular
Regra 9	Alto	Muito	Regular

Para compor a base de regras, foram utilizadas informações do especialista que foram obtidas por meio de diversas simulações da rede, considerando os valores das probabilidades de bloqueio isoladamente das métricas adotadas. Assim, a composição da base de regras foi feita por meio do especialista calibrando a base de regras resultante de simulações anteriores. A Figura 17 ilustra a superfície de controle obtida a partir da base de regras. Na Figura 17, a métrica fragmentação relativa apresenta valores de zero (0) a (1), a métrica quantidade de slots ocupados tem valores de um (1) a quatrocentos (400) e a saída do sistema Fuzzy (valor Q) apresenta valores de zero (0) a dez (10). Quanto

menor o valor de Q para a rota, mais recursos disponíveis na rota para o estabelecimento do circuito.

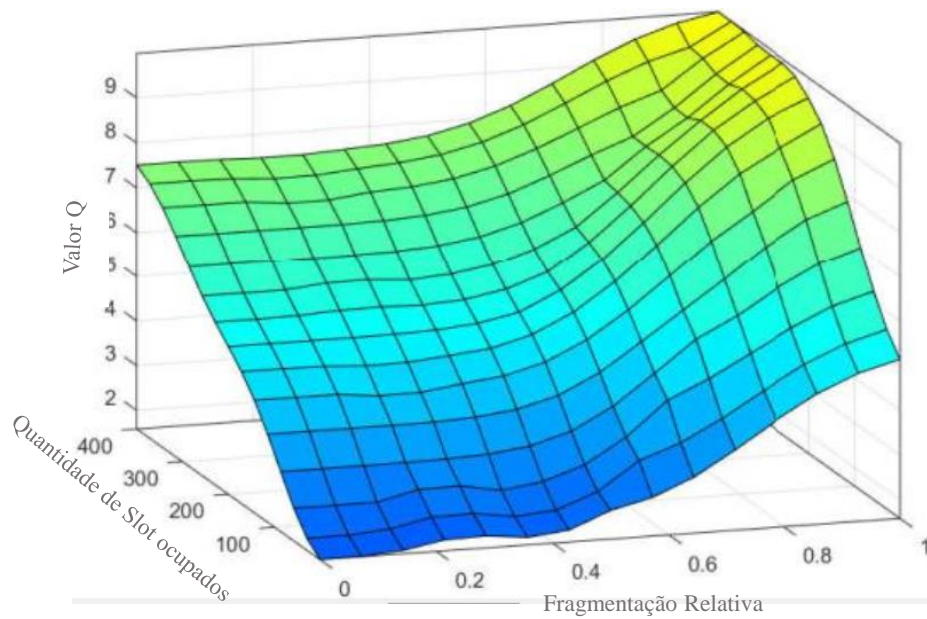


Figura 17 – Superfície de controle obtida da base de regras.

Este capítulo apresentou o funcionamento do algoritmo Fuzzy-RQoTO para solução do problema RMLSA nas redes ópticas elásticas. O próximo capítulo aborda o funcionamento da proposta do algoritmo CIR-MAS para solução do problema RMLSA nas redes ópticas elásticas.

5 Proposta do algoritmo CIR-MAS

Este capítulo apresenta o funcionamento do algoritmo CIR-MAS (*Circuit Interference Reduction with Minimum Allocation Slots*). O algoritmo CIR-MAS utiliza o $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$ para selecionar um formato de modulação resistente a interferência de circuitos e seleciona a rota com o mínimo de slots alocados na rota.

5.1 Algoritmo CIR-MAS

O algoritmo CIR-MAS quantifica os k -menores caminhos para cada par de nó origem e destino da rede na fase *offline*. Na fase *offline* do algoritmo, são calculados as rotas de menores caminhos para todos os pares de nós da rede.

As chegadas de requisições são distribuídas de modo uniforme entre todos os pares de nós (s,d) (*source, destination*) na rede. As rotas candidatas representam as rotas de menor caminho definido para cada par (s, d) . No caso dos pares (s, d) com apenas uma rota de menor caminho, não é necessário usar o algoritmo para selecionar a rota, uma vez que ela foi previamente definida.

Na fase online, quando surge uma requisição, verifica-se qual das rotas foram escolhidas para o conjunto de rotas de menor caminho de um dado par (s, d) . A Figura 18 ilustra o funcionamento do algoritmo CIR-MAS. Cada retângulo do fluxograma do algoritmo CIR-MAS apresenta uma enumeração representando as etapas de 1 a 6.

Na primeira etapa, é escolhida o conjunto das k rotas candidatas de cada par (s,d) na fase *offline*. Em seguida, seleciona a rota dentre as k rotas candidatas e seleciona o primeiro formato de modulação dentre os M formatos de modulação disponíveis (etapa 1). Os formatos de modulação estão ordenados de maneira crescente em eficiência espectral. Sabendo qual formato de modulação deverá ser testado, é possível calcular a quantidade de slots necessários para o estabelecimento do circuito. Com essa informação é verificado a possibilidade de alocar espectro e se a QoT do circuito está aceitável (significa que o SNR alcançado pelo circuito está acima ou igual ao limiar de SNR do formato de modulação selecionado). O limiar de SNR caracteriza o limite mínimo de SNR tolerado pelo receptor.

Se for possível estabelecer o circuito com o formato de modulação escolhido, o ΔSNR do circuito é calculado(etapa 2). Em seguida, é calculado o $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$ dos circuitos ativos na rota k (etapa 3). Após a etapa 3 é verificado se o ΔSNR é maior ou igual a $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$ (etapa 4). O ΔSNR representa a diferença entre o SNR atual do circuito e o limite de SNR do formato de modulação. A Equação, 5.1 apresenta o cálculo de ΔSNR .

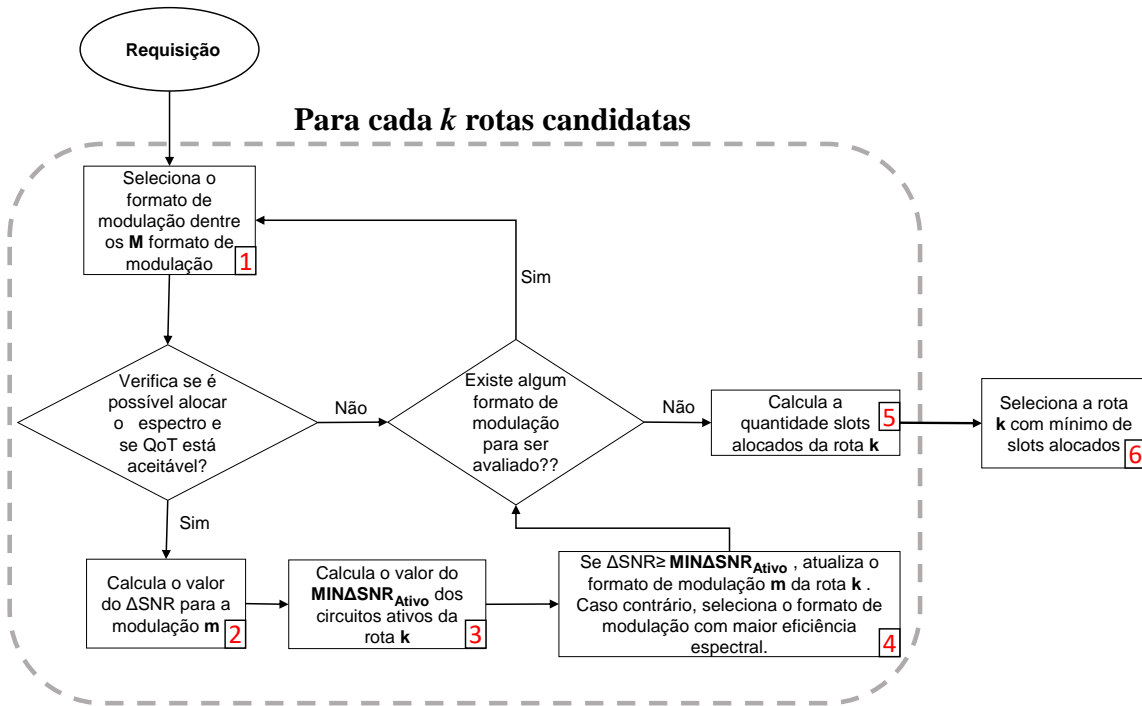


Figura 18 – Fluxograma do algoritmo CIR-MAS.

$$\Delta SNR = SNR_{circuito} - SNR_{LimiarMod} \quad (5.1)$$

Na Equação 5.1, o $SNR_{circuito}$ representa o SNR do circuito que será estabelecido. O $SNR_{LimiarMod}$ representa o limiar de SNR do formato de modulação atual. O $MIN\Delta SNR_{ativo}$ representa o circuito ativo mais frágil na rota k , isto é, o menor valor do ΔSNR dos circuitos ativos na rota k . Além disso, o $MIN\Delta SNR_{ativo}$ corresponde a uma margem de segurança para selecionar um formato de modulação que reduza a interferência dos circuitos. A escolha do valor para $MIN\Delta SNR_{ativo}$ deve ser feita durante a fase online da rede. O valor $MIN\Delta SNR_{ativo}$ muda de acordo com o estado da rede. À medida em que se estabelecem os circuitos na rede, o valor de $MIN\Delta SNR_{ativo}$ é alterado.

Dessa forma, se $\Delta SNR \geq MIN\Delta SNR_{ativo}$, é selecionado o formato de modulação atual para a rota k avaliada (etapa 4). Caso contrário, o algoritmo escolherá o formato de modulação com maior eficiência espectral para estabelecer o circuito (etapa 4). A fase de seleção do formato de modulação é realizada até que todos os formatos de modulação disponíveis sejam avaliados. Caso não tenha formatos de modulação disponíveis, então a requisição é bloqueada. Os valores de $MIN\Delta SNR_{ativo}$ tornam o circuito mais robusto às degradações causadas pelo estabelecimento de novos circuitos e devem ser escolhidos de forma a reduzir a probabilidade de bloqueio geral. A Figura 19 ilustra um exemplo de funcionamento do algoritmo proposto no atendimento de um novo circuito do nó de origem

(nó 1) para o nó de destino (nó 4), usando a rota r considerando apenas três formatos de modulação, BPSK, QPSK e 8QAM.

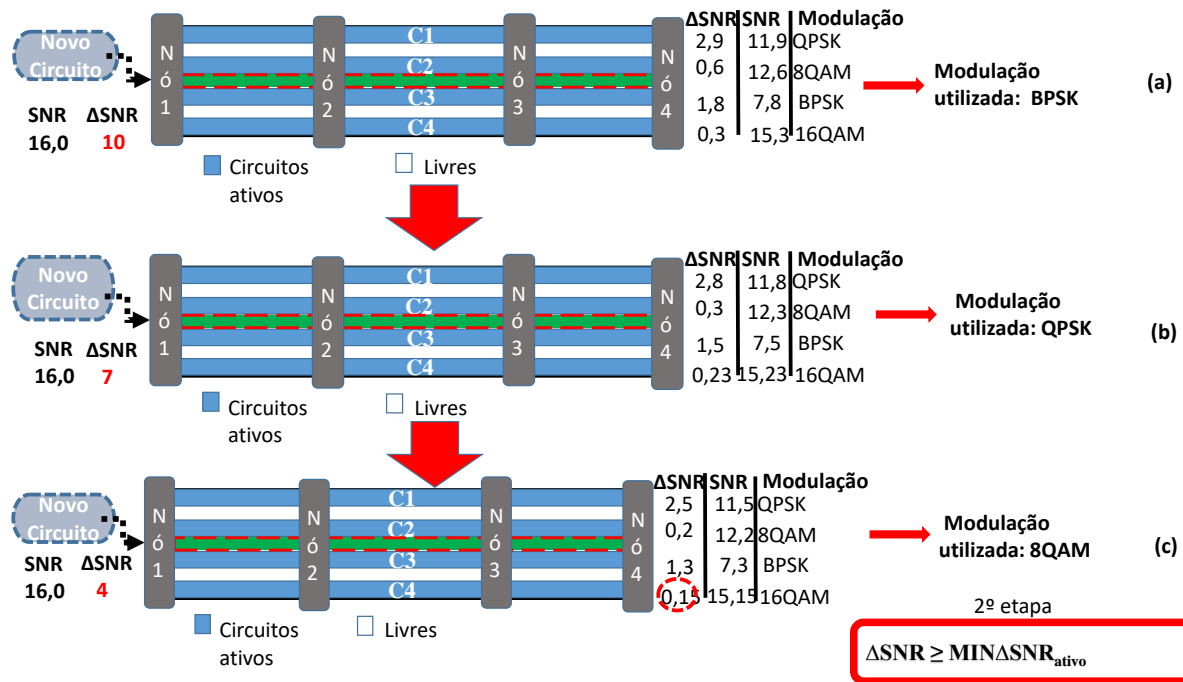


Figura 19 – Estratégia de seleção do $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$.

De acordo com a Figura 19, no momento da chegada da requisição para o novo circuito (nó 1, nó 4), outros quatro circuitos já estão ativos na mesma rota r (C1, C2, C3 e C4). Os ΔSNR , SNR e o formato de modulação dos respectivos circuitos podem ser observados à direita da Figura 19.

Inicialmente, deve ser definida uma rota para o atendimento da requisição do novo circuito. Neste exemplo (Figura 19), o circuito do nó 1 (origem) até o nó 4 (destino) utiliza a rota r . Além disso, verifica-se os formatos de modulações que estão disponíveis para estabelecer o novo circuito. O SNR do novo circuito deve ser maior que o limiar do formato de modulação adotado para ser estabelecido.

O próximo passo é identificar o menor ΔSNR dentre todos os circuitos já ativos ($\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$) que possuem pelo menos 1 enlace em comum com a rota r . O cálculo do $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$ considera que o novo circuito (nó 1, nó 4) foi atendido. Isto é, busca-se identificar o circuito já ativo mais sensível a novas interferências. No exemplo da Figura 19(a), os circuitos C1, C2, C3 e C4 interferem no novo circuito (nó 1, nó 4). Dentre eles, o circuito C4 é o mais sensível, com $\Delta\text{SNR} = 0,3$ decibel (dB).

Para o estabelecimento do novo circuito (nó 1, nó 4) temos $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo} = 0,3$ dB. Além disso, o formato de modulação utilizado para o novo circuito é o BPSK. Após utilizar o BPSK, é verificado se o formato de modulação QPSK pode ser utilizado. Ao

utilizar o QPSK para o novo circuito, como mostra Figura 19(b), os circuitos C1, C2, C3 e C4 sofrem interferências diferentes das interferências com o formato de modulação BPSK, Figura 19(a), conseqüentemente, altera o valor do $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$ se for menor que o $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$ anterior. Caso seja menor, o novo valor do $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo} = 0.23$.

O processo continua para o formato de modulação 8QAM, como mostra a Figura 19(c). Os circuitos C1, C2, C3 e C4 apresentam interferências diferentes dos formatos de modulação anteriores. Dessa forma, o valor do $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo} = 0.15$. Após selecionar o $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$ o algoritmo passa para etapa de verificar se o $\Delta\text{SNR} \geq \text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$. Se for verdadeiro, então seleciona o formato de modulação atual (8QAM). Caso contrário, seleciona o formato de modulação com maior eficiência espectral. Posterior a fase de seleção do formato de modulação, é realizado o cálculo da quantidade de slots alocados da rota atual (etapa 5), dada pela Equação 5.2.

$$\text{NumeroSlotsAlocados} = \text{totalSlots} - \text{slotsLivres}, \quad (5.2)$$

Na Equação 5.2, totalSlots representa a quantidade máxima de slots por enlace na rede e slotsLivres representa a quantidade de slots livres contínuos e contíguos na rota.

Após a avaliação de todas as rotas candidatas ser concluída, a rota com o mínimo de slots alocados (etapa 6) é selecionada isso ocorre porque a rota escolhida apresenta mais recursos para estabelecer um circuito, e conseqüentemente, será menor a probabilidade de novas requisições serem bloqueadas. O impacto dessa estratégia de seleção de rotas é refletido no desempenho da rede oferecendo uma ampla utilização dos recursos de rede. A Figura 20 ilustra um exemplo do processo de seleção de rota do algoritmo CIR-MAS.

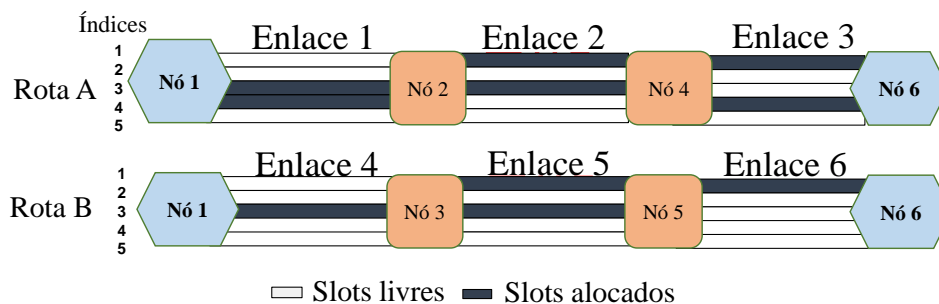


Figura 20 – Estratégia de seleção da rota do algoritmo CIR-MAS.

De acordo com a Figura 20 duas rotas candidatas para selecionar a rota com o mínimo de slots alocados para estabelecer o circuito são apresentadas. Como a requisição é do nó 1 (origem) até o nó 6 (destino), então o algoritmo irá selecionar a rota com o mínimo de slots alocados na rota atendendo as restrições de continuidade e contiguidade. Os slots alocados representam pelo menos um dos enlaces na faixa de espectro que apresentam circuitos ativos na rede.

Por exemplo, na rota A do índice 1 (considerando o nó 1 (origem) e nó 6 (destino), são considerados como slots alocados em consequência do índice 1 dos enlaces 2 e 3 apresentarem slots alocados. Se houver, pelo menos um slot alocado em uma determinada faixa de espectro de um dos enlaces, é computado como slot alocado.

Neste exemplo, a rota A apresenta três slots alocados ($5-2 = 3$) e a rota B apresenta dois slots alocados ($5-3 = 2$). Dessa forma, a rota B será escolhida para estabelecer o circuito devido o mínimo de slots alocados.

Assim, este método de seleção de rotas evita rotas com um alto acúmulo de circuitos ativos que impossibilitam o atendimento de um novo circuito. Além disso, os circuitos sofrem menos interferências. Portanto, o algoritmo torna-se mais eficiente, selecionando uma rota com o mínimo de slots alocados, o que resulta em mais circuitos estabelecidos na rede.

Adicionalmente, foi realizada uma comparação do algoritmo CIR-MAS com o algoritmo KSP-RQoTO, Tabela 2. O algoritmo KSP-RQoTO utiliza como estratégia de seleção da rota o menor índice do slot de frequência na faixa de espectro e maior valor do ΔSNR . Já para a estratégia de seleção do formato de modulação, o algoritmo KSP-RQoTO utiliza um valor fixo para o σ resultando em circuitos mais resistentes a outros circuitos. Já o algoritmo CIR-MAS, por outro lado, utiliza os slots alocados para selecionar a rota, isto é, a rota que apresentar uma quantidade mínima de slots alocados será escolhida. Na estratégia de seleção do formato de modulação, o algoritmo CIR-MAS utiliza um valor dinâmico caracterizado como $\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$, ou seja, seleciona o menor valor de ΔSNR dos circuitos ativos na rota.

Tabela 2 – Estratégia de comparação dos algoritmos CIR-MAS e KSP-RQoTO.

Algoritmo	CIR-MAS	KSP-RQoTO
Estratégia de seleção da rota	Mínimo de slots alocados	ΔSNR
Estratégia de seleção da modulação	$\text{MIN}\Delta\text{SNR}_{ativo}$	σ

Uma vez explicado o funcionamento do algoritmo CIR-MAS, a análise de sua complexidade de tempo é detalhada. Para isto, o procedimento deve ser dividido em duas fases: planejamento e operação. Durante a fase de planejamento (que ocorre em um momento *offline* da rede), o algoritmo de Yen é utilizado para computar os k menores caminhos entre dois pares de nós origem e destino da rede. A complexidade de tempo do algoritmo de Yen é $O(k * |N|(|E| + |N| * \log|N|))$ para cada par de rotas, onde k é a quantidade de rotas candidatas (menores caminhos), N é um conjunto de nós da rede e E é um conjunto de enlaces da rede. Na fase de operação, por sua vez, a complexidade de tempo do algoritmo para selecionar a rota, formato de modulação e faixa de espectro livre é da ordem de $O(k * |M| * |E| * |S|)$, onde M é o conjunto de formatos de modulação

disponíveis e S é o conjunto de slots em cada enlace da rede.

Este capítulo apresentou o funcionamento do algoritmo CIR-MAS para solução do problema RMLSA nas redes ópticas elásticas. O próximo capítulo aborda o estudo de avaliação de desempenho dos algoritmos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO nas redes ópticas elásticas

6 Análise dos Resultados dos Algoritmos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO

Este capítulo apresenta a avaliação de desempenho dos algoritmos CIR-MAS comparando com os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO.

6.1 Avaliação de Desempenho

Este trabalho apresenta um estudo de avaliação de desempenho comparando os algoritmos propostos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO com os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO. As figuras de mérito consideradas para a avaliação dos algoritmos foram a probabilidade de bloqueio de circuito geral e suas decomposições (Ausência de Espectro Livre - AEL, Fragmentação, QoTN e QoTO) e a probabilidade de bloqueio de banda. Utilizou-se o simulador *Slice Network Simulator* (SNetS) (FONTINELE et al., 2017).

Foram adotadas duas topologias reais (NSFNet e EON) (FONTINELE et al., 2017) para avaliação dos resultados (Figura 8(a) e Figura 8(b)). Os parâmetros utilizados na simulação são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros para as simulações.

Parâmetros	Valores
Número de requisições	100.000
Quantidade de replicações	10
Pontos de carga	5
Quantidade de slot por enlace	400
Intervalo de frequência de um slot	12,5 GHz
Larguras de banda requisitadas	10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps

Para a geração de requisições foi utilizado o processo de Poisson com taxa média de λ e o tempo de retenção é distribuído exponencialmente por meio da média $1/\mu$. A carga de tráfego entre todos os pares de nós origem e destino é distribuída de modo uniforme. Utilizou-se o método de replicação independente e adotou-se nível de confiança de 95% para os intervalos de confiança. Os formatos de modulação considerados nesse estudo foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM (FONTINELE et al., 2017). Outros parâmetros utilizados estão listados na Tabela 4.

A Figura 21 apresenta a probabilidade de bloqueio de circuito obtida pelos algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO, Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS para as topologias NSFNet e EON, respectivamente. Analisando a Figura 21, nota-se que o algoritmo CIR-MAS apresentou menores probabilidades de bloqueio de circuitos quando comparado aos

Tabela 4 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

Descrição	Valores
Densidade espectral de potência do sinal	-17 dBm/GHz
Atenuação da fibra	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra	16 ps ² /Km
Coefficiente não linear da fibra	1,22(Wkm) ⁻¹
Tamanho de um span	100 km
Figura de ruído do amplificador	6 dB
Potência de saturação do amplificador	16 dBm

algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO para as topologias NSFNet (Figura 21(a)) e EON (Figura 21(b)). Vale ressaltar que para o primeiro ponto de carga (200 Erlangs) na topologia NSFNet (Figura 21(a)) o algoritmo CIR-MAS não apresentou bloqueio, que conseqüentemente, estabeleceu todos os circuitos. Enquanto que o algoritmo Fuzzy-RQoTO apresentou bloqueio a partir do terceiro ponto de carga.

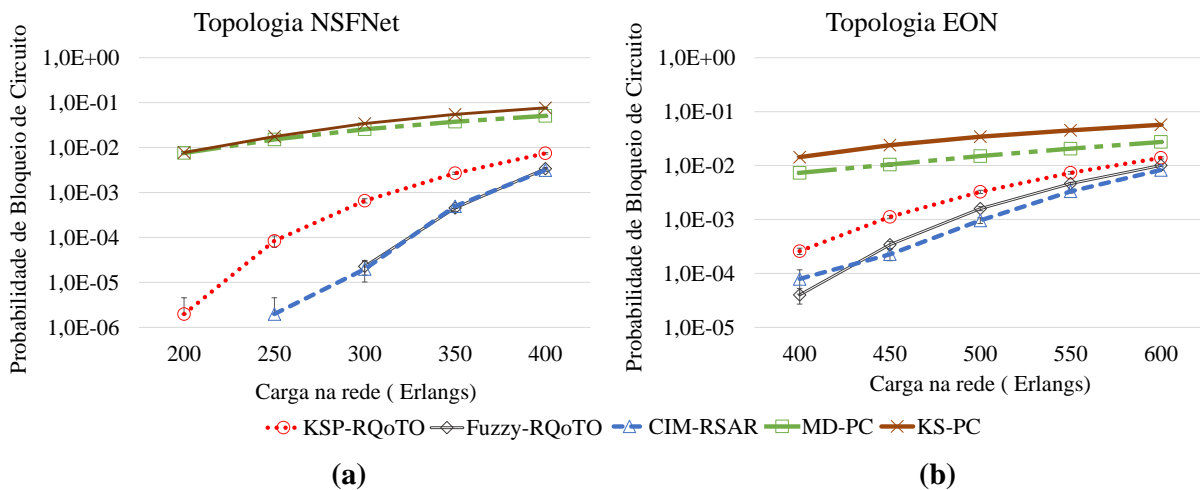


Figura 21 – Probabilidade de bloqueio de circuito para as topologias (a) NSFNet e (b) EON.

Ainda na Figura 21(a), para o ponto de carga de 400 Erlangs, o algoritmo CIR-MAS apresentou ganho de 95,8%, 93,8%, 57,8% e 7,3% quando comparado aos algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO, respectivamente. Enquanto que, o algoritmo Fuzzy-RQoTO para o mesmo ponto de carga (400 erlangs) apontou um ganho de 95,5%, 93,3% e 54,5% comparado aos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO.

Já para a topologia EON, Figura 21(b), considerando o ponto de carga de 600 Erlangs, o algoritmo CIR-MAS apresentou um ganho de 85,5%, 69,8%, 40,5% e 17,9% comparado aos algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO, respectivamente. Já o algoritmo Fuzzy-RQoTO apontou um ganho de 82,4%, 63,2%, 27,5% quando comparado aos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO.

Adicionalmente, foram avaliadas as componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para ambas as topologias. A Figura 22 ilustra as componentes da probabilidade de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO, Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS para a topologia NSFNet. Na Figura 22, a probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos é decomposta em: Fragmentação, QoTN, QoTO e AEL. As probabilidades de bloqueios são apresentadas em sua respectiva escala. Os resultados permitem inferir qual das componentes contribui mais para o desempenho de cada algoritmo explicitados a seguir.

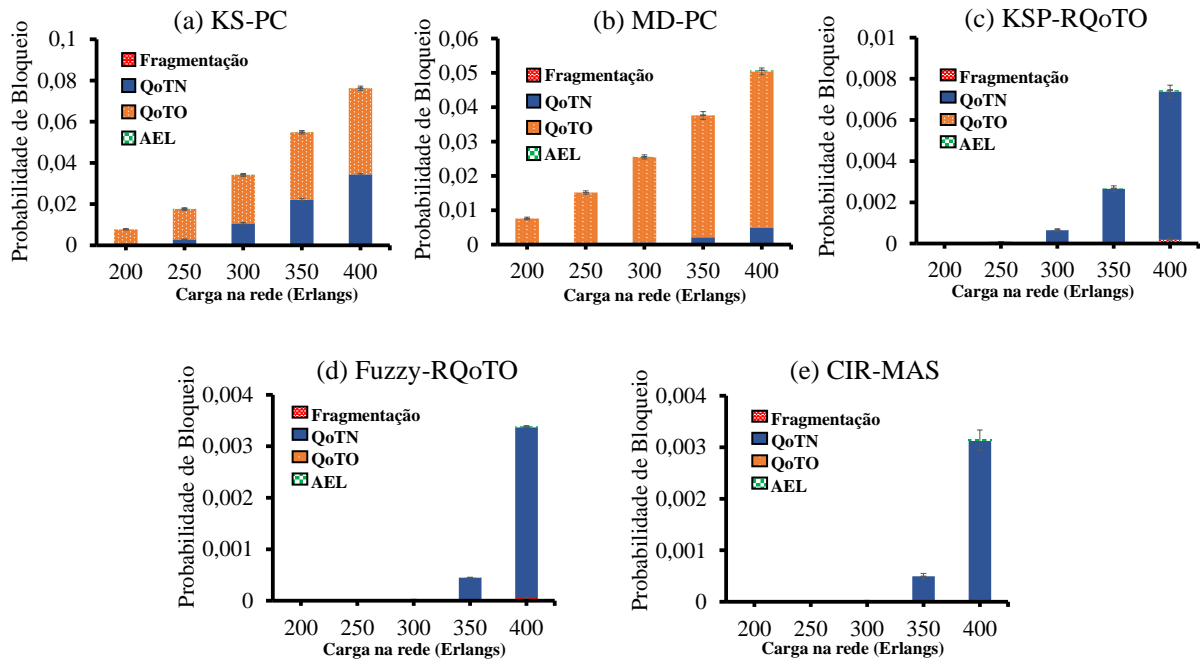


Figura 22 – Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia NSFNet.

Observa-se pela Figura 22 que a componente que impacta mais para os bloqueios nos algoritmos KS-PC, MD-PC é a QoTO. Isso ocorreu porque os algoritmos estabelecem circuitos frágeis a interferências de outros circuitos. Já os algoritmos KSP-RQoTO, Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS buscam estabelecer circuitos mais resistentes a interferências e eliminam as ocorrências de bloqueios por QoTO (Figuras 22(c), 22(d) e 22(e), respectivamente).

Com a eliminação dos bloqueios por QoTO, os algoritmos KSP-RQoTO, Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS permitem o estabelecimento de mais circuitos, o que aumenta a disputa pelos recursos disponíveis na rede tornando mais difícil encontrar faixas de espectro livre que permitam estabelecer circuitos com QoT aceitável. Por esse motivo a componente que mais contribui para os bloqueio dos algoritmos KSP-RQoTO, Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS é a QoTN (Figuras 22(c), 22(d) e 22(e), respectivamente). Assim, a estratégia de

seleção do formato de modulação e o mecanismo de seleção de rotas do algoritmo CIR-MAS mostra-se mais eficiente do que o mecanismo adotado pelo KSP-RQoTO para esse cenário. Já a estratégia de seleção de rotas utilizando uma técnica inteligente apresentou ser mais eficiente do que o mecanismo adotado pelo KSP-RQoTO.

A Figura 23 ilustra as componentes da probabilidade de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO, Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS para a topologia EON. Observa-se pela Figura 23(a) e Figura 23(b) que as componentes que mais contribuem para o bloqueio dos algoritmos KS-PC, MD-PC é a QoTN e QoTO.

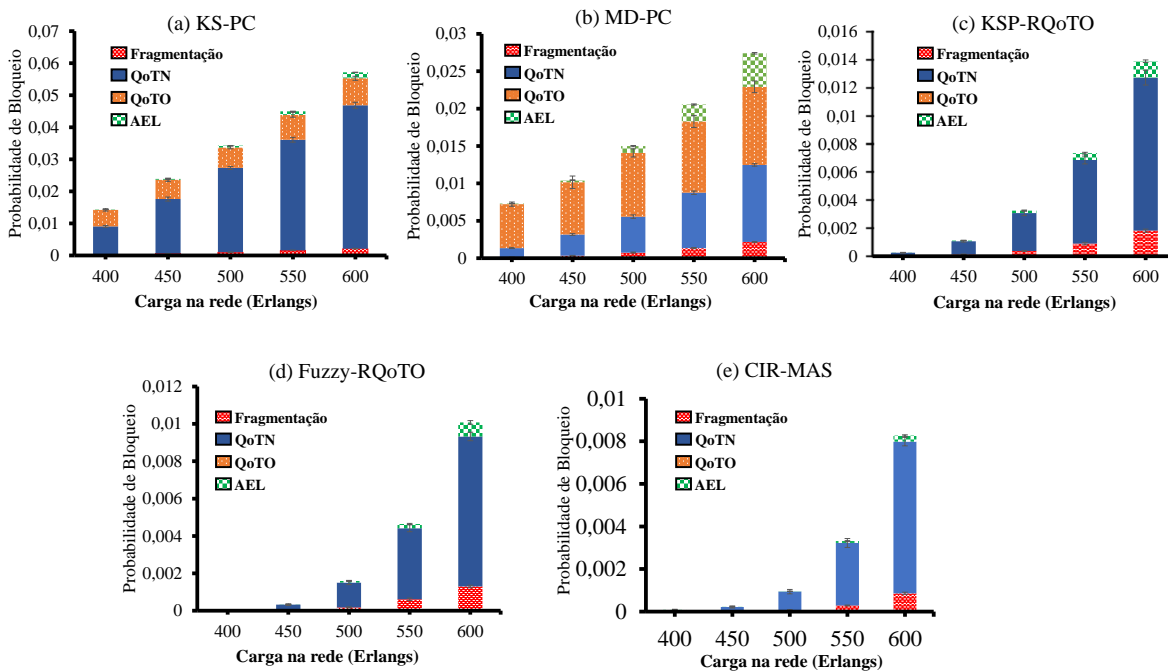


Figura 23 – Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia EON.

Ainda analisando a Figura 23(b) verifica-se que para todos os pontos de carga a dificuldade para o estabelecimento de circuitos não estava apenas relacionada com a fragilidade dos circuitos já estabelecidos pelo algoritmo MD-PC mas sim, na dificuldade de encontrar faixas de espectro livre que permitiam estabelecer circuitos com QoT aceitável. Por isso, há um aumento nos bloqueios por AEL. Os comportamentos dos algoritmos KSP-RQoTO, Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS na topologia EON (Figuras 23(c), 23(d) e 23(e), respectivamente) são semelhantes aos comportamentos apresentados na topologia NSFNet, no entanto com o aumento de bloqueios por fragmentação e AEL, pelos motivos já mencionados.

A Figura 24 apresenta a probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO, Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS para as setes larguras de banda (10 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps, 100 Gbps, 160 Gbps, 200 Gbps e 400 Gbps) nas duas topologias. Os resultados apresentados para a topologia NSFNet (Figura 24(a)) são para o ponto

de carga de 400 Erlangs. Já os resultados apresentados para a topologia EON (Figura 24(b)) são para o ponto de carga de 600 Erlangs. Esses valores (400 e 600 *erlangs*) foram selecionados em consequência do estado da rede, no qual a rede se encontra com alto fluxo de dados. Analisando a carga 400 Erlangs para a taxa de bloqueio de banda para a

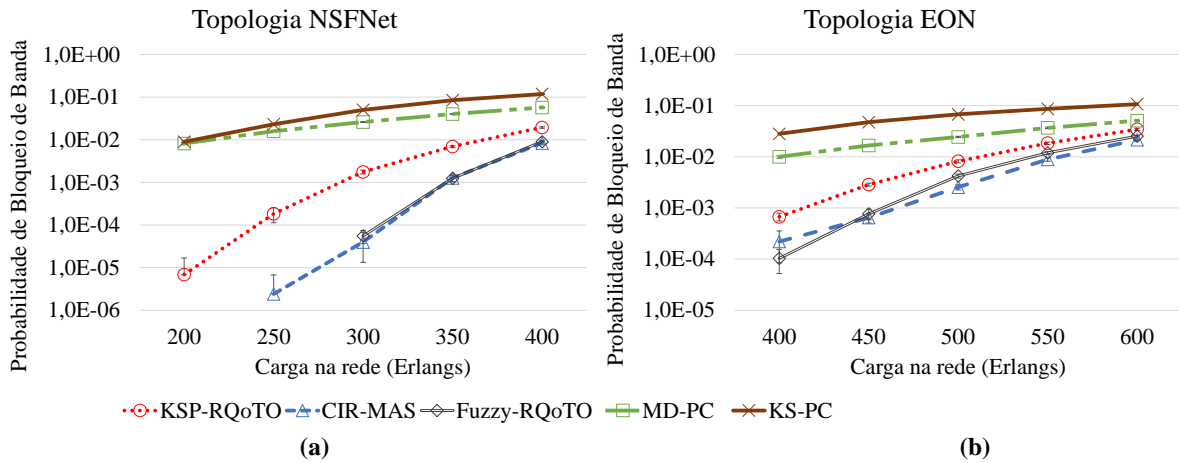


Figura 24 – Probabilidade de bloqueio por largura banda para as topologias (a) NSFNet e (b) EON.

topologia NSFNet (Figura 24(a)), temos que o algoritmo CIR-MAS alcançou um ganho de 92,4%, 85,2%, 56,8% e 7,1% em relação aos algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO, respectivamente. Para a topologia EON (Figura 24(b)), o algoritmo CIR-MAS apresentou um ganho de 79,8%, 57,7%, 37,5% e 15,1% quando comparado aos algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO, respectivamente.

Assim, verifica-se que o algoritmo CIR-MAS torna-se uma alternativa eficiente para as redes ópticas elásticas para a solução do problema RMLSA ciente dos efeitos de camada física. Além disso, a utilização de um sistema Fuzzy auxilia na seleção da rota para aproveitar amplamente os recursos da rede. Neste contexto, quando há uma ou mais métricas de avaliação (fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados) para selecionar a rota para estabelecimento do circuito, o algoritmo Fuzzy-RQoTO torna-se uma alternativa eficaz para solucionar o problema RMLSA.

Este capítulo apresentou os resultados dos algoritmos Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS. Além disso, foi feita uma avaliação de desempenho do algoritmo proposto, comparando com os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO. O próximo capítulo apresenta a eficiência energética do algoritmo Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS.

7 Eficiência Energética

O consumo de energia elétrica dos equipamentos de rede como os amplificadores, roteadores e links de comunicação aumentou com a crescente demanda dos serviços de voz, vídeo e dados pelos usuários da internet (DONG; EL-GORASHI; ELMIRGHANI, 2013b). Neste contexto, o consumo desses equipamentos chegam até 4% do orçamento energético total do mundo, implicando em um impacto ambiental em termos de emissões de gases com efeito estufa (fenômeno natural de aquecimento térmico da terra) (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012).

Desta forma, o setor de tecnologia da informação e comunicação (*ICT-Information and Communication Technology*) é responsável pela produção de 2- 2,5% das emissões de gases com efeito de estufa (ITU, oct. 2013). Em consequência do crescimento contínuo de investimentos em infraestrutura do segmento ICTs, surge a necessidade de analisar o consumo de energia das redes ópticas elásticas.

7.1 Modelo de Consumo de Energia e Eficiência Energética

Para avaliar o consumo energético das EON, foram considerados os *transponders*, comutadores ópticos e amplificadores, que serão detalhados a seguir. A Figura 25 ilustra os equipamentos utilizados para medir o consumo de energia nas EON.

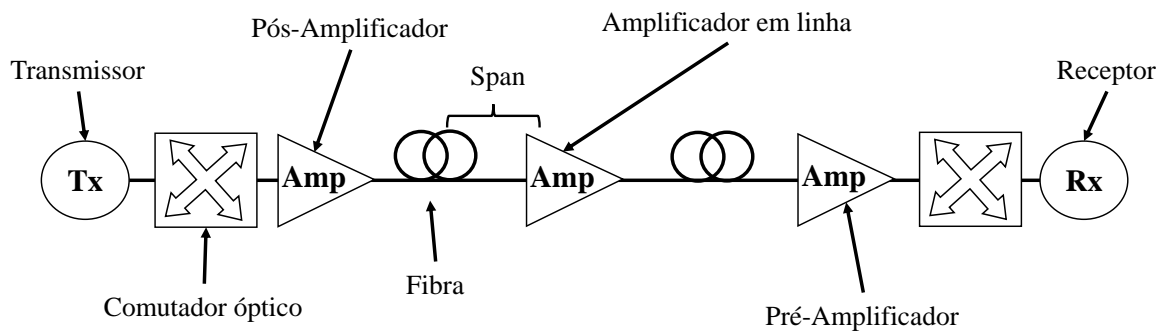


Figura 25 – Equipamentos para medir o consumo de energia (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012) (VIZCAÍNO et al., 2014) (VIZCAÍNO et al., 2012)

7.1.1 Transponder

Nas redes ópticas elásticas, o *transponders* fica localizado na parte do transmissor, receptor (Figura 25) e pode ser utilizado devido à possibilidade de modificar as propriedades

do sinal, como o formato de modulação, taxa de bits e número de slot.

Portanto, o consumo de energia do transponder pode ser definido como uma função de sua taxa de transmissão (TR) de um slot com o formato de modulação adotado (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012). A Equação 7.1 apresenta a função do consumo do transponder (PC) em watts(W):

$$PC_{(W)} = 1.25 * TR_{(Gb/s)} + 31.5 \quad (7.1)$$

Além disso, o consumo energético do transponder tem uma contribuição de mais 20% no consumo energético nas EON (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012). A Tabela 5 apresenta o consumo de energia dos formatos de modulação considerando um slot.

Tabela 5 – Consumo de energia considerando um slot (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012)

Modulação	TR(Gbps)	PC(w)
BPSK	12,5	47,13
QPSK	25,0	62,75
8QAM	37,5	78,38
16QAM	50,0	94
32QAM	62,5	109,63
64QAM	75,0	125,23

7.1.2 Comutador Óptico

A utilização de um comutador óptico (Figura 25) em uma EON é diferente quando comparado a uma rede WDM, devido a necessidade de suportar diferentes canais de largura de banda. Portanto, foram empregados nas redes EON os mesmos valores obtidos para um comutador óptico de uma rede WDM (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012). A Equação 7.2 apresenta o consumo energético de um OXC (POXC) em watts.

$$POXC_{(W)} = N * 85 + 150 \quad (7.2)$$

Além disso, o consumo do POXC depende do grau do nó (N) da topologia e uma contribuição de 150W por localização do nó (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012).

7.1.3 Amplificador

Para o consumo de energia para um EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) (Figura 25), foi considerado 30 Watts por direção (par de fibras) do enlace (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012). Cada enlace possui um par de fibras, uma fibra para transmitir e outra para receber os dados, portanto totaliza em 60W (2*30W). Além disso, é considerada uma adição de 140 watts pela localização do amplificador (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012).

7.1.4 Eficiência Energética

Além do consumo total de energia nas redes globais que representa cerca de 8% e poderá atingir até 20% em 2020, têm se destacado a eficiência energética nas EON (WANG et al., 2016). Neste contexto, a eficiência energética oferece soluções para suportar diversas classes de serviços sem excesso de provisionamento (YAMANAKA et al., 2016). A eficiência energética é caracterizada por atender o máximo de requisições possíveis buscando reduzir o consumo de energia na rede.

Assim, os autores em (VIZCAÍNO; YE; MONROY, 2012) apresentam um estudo da eficiência energética em redes ópticas de transporte, comparando uma rede óptica elástica utilizando a tecnologia multiplexação ortogonal de divisão de frequência (OFDM) com uma rede óptica que utiliza uma tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) adotando uma rede com um *Single Line Rate* (SLR) e com uma taxa de linha mista (MLR). Ainda, os mesmos autores apontam os resultados obtidos em eficiência energética e probabilidade de bloqueio da rede destacando os benefícios da elasticidade das larguras de banda e flexibilidades com diferentes formatos de modulações oferecidos pelas redes OFDM.

Já os autores em (BARBOSA et al., 2017) apresentam um algoritmo adaptado que busca um formato de modulação intermediário, resultando em uma ponderação da eficiência energética e probabilidade de bloqueio. A adaptação foi feita no nível de modulação do algoritmo RMLSA (Routing and Modulation Level, Spectrum Assignment). O algoritmo adaptado RMLSA escolhe a rota com uma modulação diferente de eficiência mais robusta ou menos robusta, forçando o uso de uma modulação com um consumo de energia intermediária.

Neste contexto, para avaliação da eficiência energética nas EON, foi considerado o consumo de energia dos transponders, comutadores ópticos, amplificadores e a largura de banda em bits. Assim, a eficiência energética é calculado através da Equação 7.3.

$$Eff_{(Mbs/J)} = \frac{TaxaTransmissao(bits)}{ConsumoEnergeticoTotal(W)} \quad (7.3)$$

onde *TaxaTransmissao* representa a largura de banda em bits utilizada para atender a requisição. *ConsumoEnergeticoTotal* representa o consumo de energia total dos equipamentos da rede (transponders, comutadores ópticos e amplificadores).

7.2 Análise dos Resultados de Eficiência Energética

Para análise da eficiência energética e custo energético foi considerado os algoritmos KS-PC, MD-PC, KSP-RQoTO, Fuzzy-RQoTO e CIR-MAS nas topologias NSFNet e EON. A Figura 26 apresenta a eficiência energética dos algoritmos nas topologias NSFNet e EON.

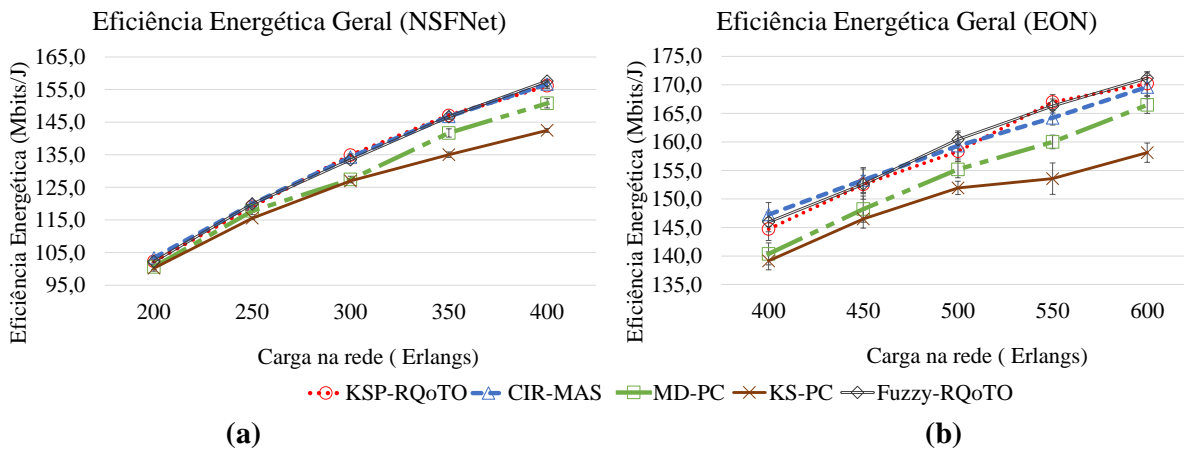


Figura 26 – Eficiência Energética dos algoritmos na topologia (a) NSFNet e (b) EON.

De acordo com a Figura 26(a), o algoritmo CIR-MAS apresenta uma eficiência energética superior de 9,9%, 3,9% e 0,33% quando comparado aos algoritmos KSP, MD-PC e KSP-RQoTO, respectivamente. Por sua vez, o algoritmo Fuzzy-RQoTO apresentou uma eficiência energética superior de 0,5% comparado ao algoritmo CIR-MAS. Como os algoritmos KSP e MD-PC selecionam formatos de modulações mais complexos, consequentemente, apresentam um consumo de energia maior, resultando em uma eficiência energética inferior aos algoritmos KSP-RQoTO e CIR-MAS.

Mesmo que os algoritmos apresentem estratégias semelhantes para a escolha do formato de modulação para redução de interferência, o algoritmo CIR-MAS apresenta uma eficiência energética superior. Já na Figura 26(b) o algoritmo apresenta uma eficiência energética superior de 1,8% e 7,27% nos algoritmos MD-PC e KSP, respectivamente. Para o algoritmo KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO, o algoritmo CIR-MAS obteve uma eficiência energética inferior de 0,35% e 0,9%, respectivamente.

Este capítulo apresentou um estudo de avaliação de desempenho dos algoritmos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO comparando com três algoritmos já propostos na literatura de redes ópticas elásticas. O próximo capítulo apresenta as conclusões finais do trabalho.

8 Conclusões

Para atender a necessidade de grandes volumes de transmissões de dados e o crescente aumento do número de usuários na internet, é necessário uma infraestrutura de rede que suporte a essa demanda. Neste contexto, destacam-se as redes ópticas elásticas por alcançar altas taxas de transmissões, permitindo uma flexibilidade na largura de banda em uma única fibra óptica para proporcionar eficiência no atendimento de requisições com diferentes largura de banda.

Para aproveitar amplamente os recursos da rede, é necessário solucionar uma série de problemas. Um dos principais problemas é o RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation*), no qual consiste no problema de roteamento, escolha do nível de formato de modulação e faixa de espectro livre. Além disso, é necessário levar em consideração o impacto dos efeitos de camada física devido a modelagem do sistema tornar mais parecido com o modelo real. Dessa forma, deve ser considerado a degradação do sinal óptico para evitar rotas e formatos de modulação que poderiam ser inviáveis na realidade.

Neste trabalho foram propostos dois novos algoritmos denominados de CIR-MAS (*CIR-MAS – Circuit Interference Reduction with Minimum Allocation Slots*) e Fuzzy-RQoTO (*Fuzzy-Reduction Quality of Transmission Other Circuits*). Os algoritmos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO solucionam o problema RMLSA ciente dos efeitos de camada física nas redes ópticas elásticas. O algoritmo CIR-MAS busca reduzir o bloqueio causado pela degradação da qualidade de transmissão dos circuitos ópticos e busca soluções de rotas alternativas para aproveitar amplamente os recursos da rede. Já o algoritmo Fuzzy-RQoTO utiliza um sistema fuzzy para auxiliar na seleção da rota inferindo um grau de pertinência na fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados. Foram realizados estudos de avaliação de desempenho do algoritmo CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO nas topologias NSFNet e EON comparando com os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO já propostos na literatura. O CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO apresentaram um ganho mínimo de 40,5% e 27,5% em termos de probabilidade de bloqueio de circuito. Em termos de probabilidade de bloqueio por banda o CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO alcançou um ganho mínimo de 37,5% e 21,9%.

Além disso, foi avaliado a eficiência energética dos algoritmos CIR-MAS, Fuzzy-RQoTO, KSP-RQoTO, KSP e MD-PC nas topologias NSFNet e EON. O algoritmo CIR-MAS apresentou uma eficiência energética superior de 9,9%, 3,9% e 0,33% quando comparado aos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO, respectivamente. Enquanto que o algoritmo Fuzzy-RQoTO apresentou uma eficiência superior de 0,5% comparando com o algoritmo CIR-MAS. Já o algoritmo CIR-MAS apresenta uma eficiência energética

superior de 1,8% e 7,27% nos algoritmos MD-PC e KS-PC, respectivamente. Para o algoritmo KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO, o algoritmo CIR-MAS obteve uma eficiência energética inferior de 0,35% e 0,9%.

Como trabalhos futuros, poderá ser feito um estudo de avaliação do custo energético dos algoritmos CIR-MAS e Fuzzy-RQoTO. Além disso, pode ser feito um estudo dos dois algoritmos propostos para cargas maiores de rede, afim de avaliar o comportamento na rede. Outro estudo importante, é considerar a adição de uma variável de entrada, como critério de seleção da rota, para o sistema fuzzy a fim de avaliar o custo energético.

Referências

- ANDRADE, M.; JAQUES, M. A. P. Estudo comparativo de controladores de mamdani e sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas. *TRANSPORTES*, v. 16, n. 2, 2008. Citado na página 18.
- BARBOSA, Ê. L. et al. New solution based on fuzzy system for the ia-rmlsa problem in elastic optical network. In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. [S.l.], 2018. p. 1–8. Citado 4 vezes nas páginas 1, 2, 3 e 14.
- BARBOSA, Ê. L. V. et al. Energy efficiency analysis with different modulation formats in elastic optical networks. In: IEEE. *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.], 2017. p. 1–4. Citado 3 vezes nas páginas 2, 3 e 39.
- 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 7 e 9.
- 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 2 vezes nas páginas 14 e 22.
- BUYSSE, J. et al. Energy-efficient resource-provisioning algorithms for optical clouds. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 5, n. 3, p. 226–239, 2013. Citado na página 2.
- CAVALCANTI, J. H. F. et al. *Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias*. [S.l.]: João Pessoa PB, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.
- 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 3 vezes nas páginas 2, 7 e 10.
- 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 2.
- COSTA, L. R.; DRUMMOND, A. C. Novo algoritmo rmlsa com roteamento multihop em redes ópticas elásticas. *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos SBRC*, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 2, 3, 8 e 9.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959. Citado na página 8.
- DONG, X.; EL-GORASHI, T. E.; ELMIRGHANI, J. M. Energy efficiency of optical ofdm-based networks. In: IEEE. *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2013. p. 4131–4136. Citado na página 2.

- DONG, X.; EL-GORASHI, T. E. H.; ELMIRGHANI, J. M. H. Energy efficiency of optical ofdm-based networks. In: *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 4131–4136. ISSN 1550-3607. Citado na página 37.
- 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 7 vezes nas páginas 7, 8, 12, 14, 19, 20 e 31.
- 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 4 vezes nas páginas 2, 3, 9 e 10.
- 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 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- 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 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- ITU. Itu and climate change report. oct. 2013. Citado na página 37.
- 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 9.
- KAHRAMAN, C.; ÖZTAYŞI, B.; ONAR, S. Ç. A comprehensive literature review of 50 years of fuzzy set theory. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, Taylor & Francis, v. 9, n. sup1, p. 3–24, 2016. Citado na página 15.
- MARRO, A. A. et al. Lógica fuzzy: conceitos e aplicações. *Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)*, 2010. Citado na página 15.
- 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 10.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical networks: a practical perspective*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009. Citado na página 8.
- SUGENO, M. An introductory survey of fuzzy control. *Information sciences*, Elsevier, v. 36, n. 1-2, p. 59–83, 1985. Citado na página 18.
- 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 7.
- VIZCAÍNO, J. L. et al. Cost evaluation for flexible-grid optical networks. In: IEEE. *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE*. [S.l.], 2012. p. 358–363. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 37.

- VIZCAÍNO, J. L. et al. Protection in optical transport networks with fixed and flexible grid: Cost and energy efficiency evaluation. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 11, p. 55–71, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 14, 2 e 37.
- VIZCAÍNO, J. L.; YE, Y.; MONROY, I. T. Energy efficiency analysis for flexible-grid ofdm-based optical networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 56, n. 10, p. 2400–2419, 2012. Citado 7 vezes nas páginas 14, 15, 2, 4, 37, 38 e 39.
- WANG, K. et al. An energy-efficient reliable data transmission scheme for complex environmental monitoring in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 16, n. 11, p. 4051–4062, 2016. Citado na página 39.
- 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 2 vezes nas páginas 2 e 3.
- YAMANAKA, N. et al. The action project: application coordinating with transport, ip and optical networks. In: IEEE. *Transparent Optical Networks (ICTON), 2016 18th International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 1–4. Citado na página 39.
- 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 9.
- YING, H. *Fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications*. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2000. Citado na página 18.
- YING, H. et al. Comparison of necessary conditions for typical takagi-sugeno and mamdani fuzzy systems as universal approximators. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, IEEE, v. 29, n. 5, p. 508–514, 1999. Citado na página 18.
- 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 21.
- 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 9.
- ZHU, P. et al. Software-defined elastic optical network node supporting spectrum defragmentation. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 9, n. 1, p. A63–A70, 2017. Citado na página 1.