

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FUZZY NAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS CONSIDERANDO O PROBLEMA IA-RMLSA PARA A TOPOLOGIA USA

ENIO L. V. BARBOSA, RICARDO A. L. RABÊLO, ANDRÉ SOARES, JOSÉ V. R. JUNIOR*

**Departamento de Computação – UFPI
Universidade Federal do Piauí
Teresina, Piauí, Brasil*

Email: enioluciano@gmail.com, ricardoalr@edu.ufpi.br, andresoares@edu.ufpi.br, valdemirreis@edu.ufpi.br

Abstract— In this paper, a new proposal for a Fuzzy system, called Fuzzy-RQoTO (Fuzzy-Reduction Quality of Transmission Other circuit), is presented to solve IA-RMLSA (Impairment Aware - Routing, Modulation Level and Spectrum Assingment) problem in elastic optical networks. The proposal uses a fuzzy system assists in choosing the best route with the most available resources (quality route) for a given source and destination pair, inferring a degree pertinence in relative fragmentation and number of slots occupied metric. For performance analysis, the Fuzzy-RQoTO was compared with KS-PC, KSP-RQoTO algorithms and another Fuzzy approach selects route with more resources available using three metrics adopted. The results obtained in the USA topology show that the Fuzzy-RQoTO algorithm obtained a minimum gain of 29.5% in terms of circuit blocking probability. In terms of bandwidth blocking probability the algorithm pointed to a minimum gain of 26.5%.

Keywords— Elastic Optical Network, Fuzzy System, Routing, Modulation Level and Spectrum Assingment.

Resumo— Neste artigo, é apresentada uma nova proposta de um sistema Fuzzy, denominado de Fuzzy-RQoTO (Fuzzy - Reduction Quality of Transmission Other circuit), para solucionar o problema IA-RMLSA (*Impairment Aware – Routing, Modulation Level and Spectrum Assingment*) nas redes ópticas elásticas. A proposta utiliza um sistema fuzzy que auxilia na seleção de uma melhor rota (rota de qualidade) para um dado par origem e destino, inferindo um grau de pertinência nas métricas fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados. Para análise de desempenho, o Fuzzy-RQoTO foi comparado com os algoritmos KS-PC, KSP-RQoTO e uma outra abordagem Fuzzy que seleciona a rota com mais recursos disponíveis utilizando três métricas adotadas. Os resultados obtidos do algoritmo Fuzzy-RQoTO, na topologia USA, apresenta um ganho mínimo de 29,5% em termos de probabilidade de bloqueio de circuito. Em termos de probabilidade de bloqueio por banda, o algoritmo apontou um ganho mínimo de 26,5%.

Palavras-chave— Redes Ópticas Elásticas, Sistemas Fuzzy, Roteamento, Nível de Modulação e Alocação de Espectro

1 Introdução

Considerando o alto crescimento do tráfego da Internet e pelos serviços decorrente (aplicações multimídia, TV de alta definição, aplicações de rede em tempo real), as redes ópticas estão evoluindo para suportar a altas taxas de transmissão de dados e com uma maior flexibilidade de largura de banda.

Neste contexto, as redes ópticas elásticas (*EON- Elastic Optical Network*) destacam-se por atender a altas taxas de transmissões com diferentes larguras de banda (Zhu et al., 2017). A EON divide o espectro em slots de frequência (6,25GHz ou 12,5GHz) que estabelecem diversos circuitos, aumentando a capacidade de transmissão (Brasileiro et al., 2016).

Para estabelecer o circuito nas EON é necessário solucionar o problema RMLSA que consiste em selecionar uma rota, escolher um nível de formato de modulação e uma faixa de espectro disponível (Costa and Drummond, 2017). Uma boa solução RMLSA aproveita amplamente os recursos da rede, resultando no atendimento de uma maior quantidade de clientes pela operadora de

rede.

Nas EONs os dados são transmitidos da origem ao destino através do sinal óptico. Porém, esse sinal sofre degradação a medida que se propaga até o destino devido as imperfeições da camada física (Fontinele et al., 2017). Os algoritmos que buscam solucionar o problema RMLSA considerando os impactos dos efeitos de camada física são denominados de *Impairment Aware RMLSA* (IA-RMLSA). Os algoritmos IA-RMLSA obtém resultados satisfatórios na resolução do problema RMLSA em cenários em que os circuitos causam interferências entre si.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma novo algoritmo baseado em sistema Fuzzy, denominado de Fuzzy-RQoTO (*Fuzzy - Reduction QoTO*). O algoritmo Fuzzy-RQoTO utiliza um sistema Fuzzy para auxiliar na escolha da melhor rota de qualidade inferindo um grau de pertinência nas métricas fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados. Para o estudo de avaliação de desempenho foi utilizado o simulador SNetS (*Slice Network Simulator*) (Fontinele et al., 2017). Para análise dos resultados adotou-se a topologia USA (Brasileiro et al., 2016), comparando com

dois algoritmos IA-RMLSA: KS-PC (*K-Shortest Path Computation*), KSP-RQoTO (*K-Shortest Path with Reduction of QoTO*) (Beyranvand and Salehi, 2013) (Fontinele et al., 2017). Adicionalmente, o algoritmo Fuzzy-RQoTO também foi comparado com outra proposta Fuzzy (Brasileiro et al., 2016) que infere um grau de pertinência nas métricas fragmentação relativa, índice do slot inicial do primeiro intervalo espectral e quantidade de slots ocupados para selecionar a melhor rota de qualidade.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 contém os principais conceitos sobre as redes ópticas elásticas e o problema RMLSA. Os principais trabalhos relacionados estão relatados na Seção 3. Já na Seção 4, é apresentada a proposta do trabalho. Na Seção 5 é feita uma avaliação de desempenho da proposta; seguido das conclusões.

2 Redes Ópticas Elásticas

As EON têm o espectro particionado em intervalos de frequência estabelecendo múltiplos circuitos em uma única fibra óptica (Moura, 2015). Como consequência da divisão do espectro, os recursos da rede são utilizados de forma mais eficiente. Para transmitir os dados da origem até o destino, é necessário solucionar o problema RMLSA. O problema RMLSA consiste em selecionar uma rota, nível de modulação e faixa de espectro livre nos enlaces da rota (Costa and Drummond, 2017). A Figura 1 apresenta o problema RMLSA nas redes ópticas elásticas.

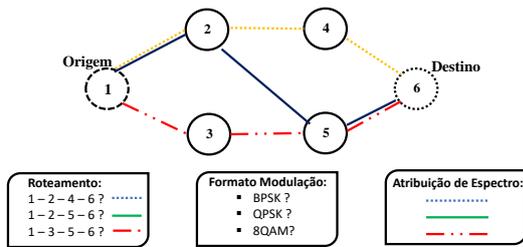


Figura 1: Problema RMLSA nas EON.

De acordo com a Figura 1, a primeira etapa do problema RMLSA 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 identificadas três possíveis rotas candidatas para estabelecer o 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 o nó origem e nó destino.

Após tratar o problema de roteamento, é necessário escolher o nível do formato de modulação.

Alguns formatos de modulação possuem a capacidade de transmitir mais bits por símbolo, por exemplo o 64QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e outros transportam menos bits por símbolo, como o BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) (Barbosa, Brasileiro, Soares and dos Reis Júnior, 2017).

A escolha do nível de modulação leva em conta a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission - QoT*) necessária e, consequentemente, a tolerância de relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio - SNR*) (Costa and Drummond, 2017). Após a escolha do formato de modulação, surge o problema de selecionar um intervalo de *slots* do espectro óptico livres para atender a requisição. A quantidade de *slots* utilizado para cada circuito óptico depende do formato de modulação utilizado 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 de continuidade e contiguidade de espectro óptico (Chatterjee et al., 2015).

Na primeira restrição exige que a faixa espectral de cada enlace da rota escolhida esteja livre para que seja atendida a requisição. Já na restrição de contiguidade exige que o conjunto de *slots* sejam contíguos, ou seja, os *slots* precisam estar livres e adjacentes no espectro óptico para aceitar requisições de dois ou mais *slots*. Se o espectro não possuir *slots* suficientes para estabelecer circuitos, então a requisição será bloqueada. Devido ao dinamismo de alocação e desalocação de circuitos, pequenos intervalos de *slots* desocupados surgem entre circuitos ativos na rede. Assim, surge outro problema nas redes ópticas elásticas, denominado de problema da fragmentação (Horota et al., 2014). A Figura 2 ilustra o problema da fragmentação no espectro.

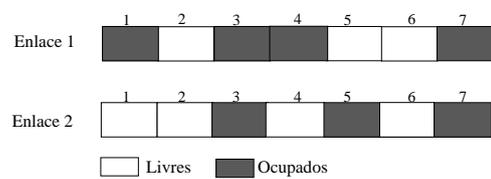


Figura 2: Problema da fragmentação do espectro.

Na Figura 2, o enlace 1 apresenta 4 *slots* ocupados no espectro (índices 1, 3, 4, 7) e apenas 3 *slots* livres (índices 2, 5, 6). No enlace 2 apresenta 3 *slots* ocupados (índices 3, 5, 7) e apenas 4 livres (índices 1, 2, 4, 6). 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, pois há slots contínuos no espectro (índices 2, 6) do enlace 1 e 2. Para avaliar o quanto o espectro da rota está fragmentado é realizado o cálculo da fragmentação relativa (Horota et al., 2014), conforme apresentado na Equação 1:

$$F_R(req) = 1 - \frac{req * ReqSimultaneas(req)}{TotalSlotsLivres} \quad (1)$$

Na Equação 1, req representa a quantidade de slots da requisição para ser atendida, $ReqSimultaneas(req)$ representa o número de requisições simultâneas de tamanho req que podem ser satisfeitas e $TotalSlotsLivres$ representa a quantidade de slots livres que o espectro possui na rota. A fragmentação relativa admite valores de 0 até 1. O valor 1 representa o espectro completamente fragmentado, consequentemente não há slots livres para atender determinadas requisições, enquanto que o valor 0 representa o espectro completamente desfragmentado.

Assim, na nova proposta deste trabalho, além de solucionar o problema RMLSA utilizando o sistema Fuzzy, é necessário satisfazer novos critérios para o estabelecimento de um circuito, como: i) Há disponibilidade de espectro óptico na rota escolhida; ii) A QoT é aceitável para o circuito 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 por fragmentação do espectro ou pela Ausência de Espectro Livre (AEL) na rota selecionada; ii) QoT inadequada para o Novo circuito óptico (QoTN) e iii) QoT inadequada para os Outros circuitos ópticos já ativos na rede (QoTO).

A seguir são apresentados os principais trabalhos relacionados as redes ópticas elásticas.

3 Trabalhos Relacionados

Os autores em (Shakya and Cao, 2013) apresentam o problema da fragmentação nas redes ópticas elásticas. Quando os circuitos de diferentes larguras de banda são estabelecidos e desligados, apresentam entre intervalos de slots ocupados, pequenos intervalos no espectro. Portanto esse problema pode evoluir impedindo o atendimento das requisições, mesmo que tenha slots livres. Para evitar este problema, é feito um estudo de algoritmos cientes de fragmentação.

Os autores em (Beyranvand and Salehi, 2013) apresentam um esquema denominado de *RSA-Routing and Spectrum Allocation* ciente a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* -

QoT) para redes ópticas elásticas. Esse esquema emprega dois algoritmos *Impairment Aware-RSA: Modified Dijkstra Path Computation* (MD-PC) e *K-Shortest Path Computation* (KS-PC) utilizando três etapas: cálculo das rotas viáveis, seleção de uma rota e alocação de espectro. O MD-PC é um algoritmo modificado do Dijkstra, que avalia todas as rotas possíveis entre o par origem/destino e determina o melhor formato de modulação para cada rota. Já o algoritmo KS-PC de K-menores caminhos, é empregado para encontrar as k rotas candidatas. Para cada rota é escolhido um formato de modulação, caso não seja possível determinar um formato de modulação para uma rota, esta rota é excluída das rotas candidatas.

Em (Ribeiro, 2014) foi investigado o problema de roteamento utilizando mais de um critério para obtenção da função de custo para ser utilizada pelos algoritmos de roteamento em redes ópticas elásticas, além de investigar técnicas de abordagem multicritério para buscar maximizar a utilização da largura de banda e minimizar a probabilidade de bloqueio nas redes ópticas elásticas. Ainda no mesmo trabalho, foram propostas novas métricas para roteamento nas EON dinâmicas, utilizando uma abordagem multicritério baseada na teoria da utilidade multiatributo e nas regras da lógica Fuzzy. Inferiu-se o grau de pertinência em dois critérios: a quantidade de enlaces na rota e quantidade de slots ocupados, atribuindo variáveis linguísticas para uma melhor escolha de roteamento.

Em (Brasileiro et al., 2016) foi proposta uma nova solução para o problema de roteamento em redes ópticas elásticas utilizando um algoritmo baseado em Sistema Fuzzy. Adicionalmente, o algoritmo não considera os impactos dos efeitos de camada física. O algoritmo seleciona a rota de melhor qualidade (mais recursos disponíveis) para um dado par (o, d) , considerando os como métricas para a escolha da rota a fragmentação relativa, quantidade de slots ocupados e índice do slot inicial do primeiro intervalo espectral alocável. Para cada métrica foi inferido um grau de pertinência para obter a rota de qualidade. Neste contexto, a proposta dos autores apresentaram um desempenho superior em termos de probabilidade de bloqueio de circuito e por banda.

Os autores em (Barbosa, Brasileiro, Rabêlo, Soares and Junior, 2017) apresentam uma nova abordagem de um sistema Fuzzy para a escolha da melhor rota (rota de qualidade) e com tempo de simulação inferior para solução do problema RSA nas redes ópticas elásticas. Os autores não consideram as imperfeições da camada física. O sistema fuzzy infere um grau de pertinência nas métricas fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados para a escolha da rota de qualidade. Os resultados apontam que a nova abordagem do sistema Fuzzy apresentam menores taxas de bloqueio de requisições e uma redução do tempo global da

simulação computacional para as topologias NSF-Net e USA.

Em (Fontinele et al., 2017) é proposto um algoritmo IA-RMLSA para redes ópticas elásticas caracterizado de *K-Shortest Path with Reduction of QoTO* (KSP-RQoTO). O algoritmo busca reduzir a probabilidade de bloqueio causada pela degradação da qualidade de transmissão proveniente do estabelecimento de novos circuitos. O algoritmo KSP-RQoTO utiliza um parâmetro denominado de σ para selecionar formatos de modulação buscando estabelecer circuitos mais resistentes a interferências de novos circuitos. A estratégia de seleção de rotas do algoritmo KSP-RQoTO é selecionar aquelas que evitem uma degradação maior em termos de SNR dos circuitos já ativos na rede.

4 Algoritmo Fuzzy-RQoTO

Primeiramente, o algoritmo Fuzzy-RQoTO computa os k menores caminhos para um dado par de nós de origem e destino da rede na fase *offline*. O algoritmo Fuzzy-RQoTO utiliza o sistema Fuzzy para seleção de rota em conjunto com a escolha de mecanismo de modulação e alocação de espectro. A Figura 3 apresenta o fluxograma do algoritmo Fuzzy-RQoTO. O blocos em destaque na Figura 3 representam as contribuições do novo algoritmo Fuzzy-RQoTO em relação a proposta KSP-RQoTO (Fontinele et al., 2017). O primeiro passo do algoritmo é selecionar uma rota entre as k rotas candidatas que foram identificadas na fase *offline*. Após a seleção da rota, é escolhido o primeiro formato de modulação entre o m formatos de modulação disponíveis.

Os formatos de modulação estão ordenados de maneira crescente em eficiência espectral. Com essa informação, verifica 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 Δ SNR do circuito. Depois é verificado se o Δ SNR é maior ou igual ao valor de σ . O Δ SNR representa a diferença entre o SNR atual do circuito e o limiar de SNR do formato de modulação. Se o Δ SNR $\geq \sigma$ o formato de modulação m é escolhida para a rota em avaliação. Caso contrário, o algoritmo irá escolher o formato de modulação com a maior eficiência espectral que foi possível estabelecer o circuito. A fase de seleção de formato de modulação é realizada até que todos os m formatos de modulação sejam avaliados.

O σ representa uma margem de segurança para a escolha do formato de modulação. A escolha de um valor para σ deve ser feita durante a fase de planejamento da rede ou durante uma alte-

ração 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 para reduzir a probabilidade de bloqueio geral. A Figura 4 apresenta a importância de selecionar com ponderação um valor para a margem de segurança (σ). Observa-se na Figura 4 que se o valor para o σ for muito pequeno o circuito estabelecido pode ser frágil a interferências de outros circuitos (Circuito 2). E 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). Entretanto, não deve 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 falta de recursos livres. Assim, o ideal é buscar por um valor de σ que torne o circuito resistente a interferências de outros circuitos e não tenha um alto consumo dos recursos da rede (Circuito 4).

Após a fase de seleção do formato de modulação, é necessário selecionar a rota com maior recursos disponíveis para estabelecer o circuito. Dessa forma, o sistema Fuzzy irá auxiliar na seleção da rota. O sistema Fuzzy é composto por uma base de dados, mecanismo de inferência e regras (Zhang et al., 2014).

Neste contexto, o sistema Fuzzy utiliza duas métricas para obter a rota de qualidade: a fragmentação relativa e a quantidade de slots ocupados na rota. Foi atribuído um grau de pertinência nas k rotas utilizando as métricas adotadas para a seleção da rota.

O primeiro critério de avaliação para a escolha da rota é a fragmentação relativa. Foram adotados valores entre zero (0) e um (1) considerando que (1) representa o espectro fragmentado resultando é mais bloqueios de requisições por fragmentação. Esses valores são calculados através da Equação 1.

Dessa forma, a fragmentação relativa é útil para apontar a rota com menor grau de fragmentação para o estabelecimento do circuito. A Figura 5 apresenta o processo de fuzzificação da métrica fragmentação relativa. A função gaussiana foi utilizada adotando três termos linguísticos: baixo, médio e alto com valores de 0, 0,5 e 1 e desvio padrão de 0,2. O segundo critério avaliado para a escolha da rota de qualidade foi a quantidade de slots ocupados. Quanto menor a quantidade de slots contínuos e contíguos ocupados na rota, mais requisições serão aceitas com diferentes larguras de banda. A Figura 6 apresenta a quantidade de slots ocupados no processo de fuzzificação. Adotou-se valores de 1, 200, 400 slots ocupados e desvio padrão de 80. A função de pertinência adotada foi a gaussiana, foi utilizado três

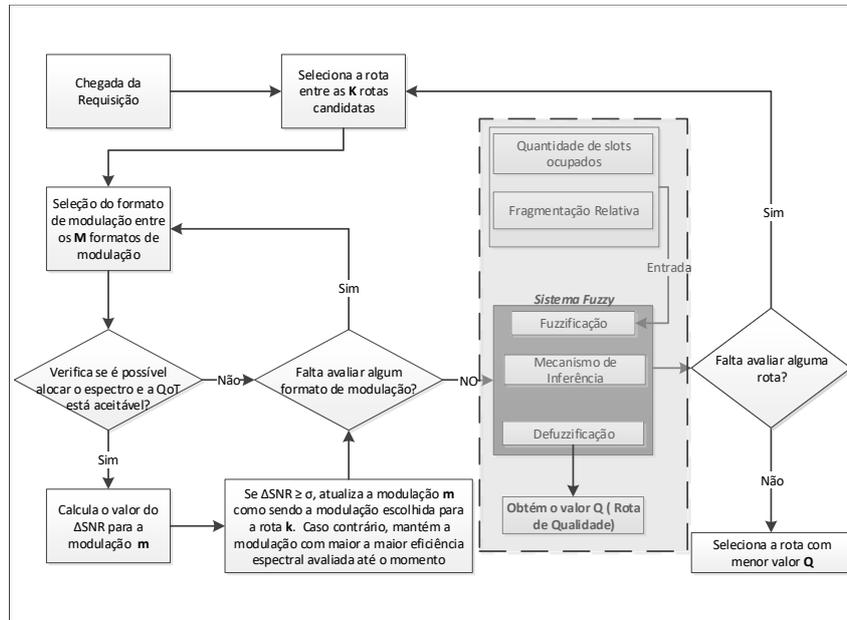


Figura 3: Fluxograma do algoritmo Fuzzy-RQoTO.

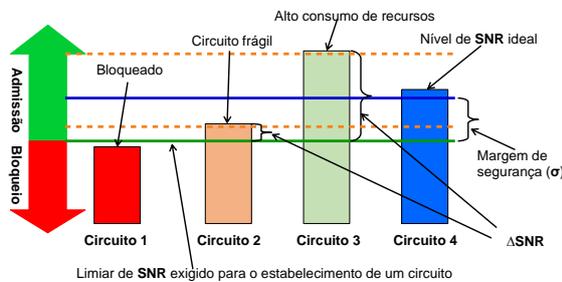


Figura 4: Seleção do circuito óptico que atenda a margem de segurança (σ).

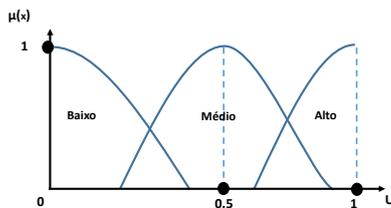


Figura 5: Função de pertinência para a primeira entrada Fuzzy representada pela fragmentação relativa no processo de fuzzificação.

termos linguísticos: pouco, mediano e muito.

No processo de defuzzificação foi utilizado o método centróide (Barbosa, Brasileiro, Rabelo, Soares and Junior, 2017) adotando cinco (5) termos linguístico, descritos como: excelente, muito bom, bom, regular, péssimo. A função de pertinência triangular foi a mesma adotada por (Brasileiro et al., 2016). A Figura 7 apresenta a função de pertinência triangular no processo de defuzzificação com seus respectivos termos linguísticos. No estágio de defuzzificação (Figura 7),

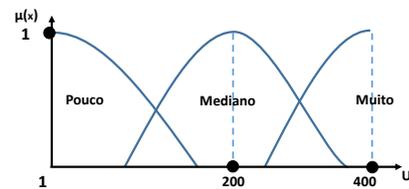


Figura 6: Função de pertinência para a segunda entrada Fuzzy representada pela quantidade de slots ocupados no processo de fuzzificação.

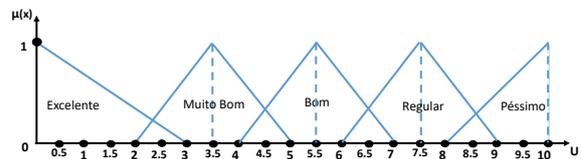


Figura 7: Função de pertinência para obtenção do valor Q no processo de defuzzificação.

cada rota terá um valor de Q que representa a qualidade da rota (rota com mais recursos disponíveis). Neste contexto, a rota que tem o menor valor Q será a rota escolhida para o estabelecimento do circuito óptico.

A quantidade de regras é baseado no número de variáveis de entrada e termos linguístico no processo de fuzzificação, utilizando a fórmula k^n . k representa a quantidade de termos linguísticas no processo de fuzzificação. n representa o número de variáveis de entrada para o sistema Fuzzy. Neste contexto, o número de regras neste cenário de estudos são nove (9) regras.

Para compor a base de regras, foram utilizadas informações resultante de diversas simulações

de redes ao considerar isoladamente os valores das probabilidades de bloqueio em relação aos elementos fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados. Assim, a Tabela 1 contém a base de regras adotadas na modelagem aqui proposta. A

Tabela 1: Base de regras do sistema Fuzzy proposto

Regras	Fragmen- tação 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

Figura 8 representa a superfície de controle obtida a partir da base de regras. Ainda na Figura 8, os valores da métrica de fragmentação relativa têm valores de zero (0) a (1), a métrica quantidade de slots ocupados apresenta 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 estão disponíveis na rota para o estabelecimento do circuito. A seguir são apresentados os

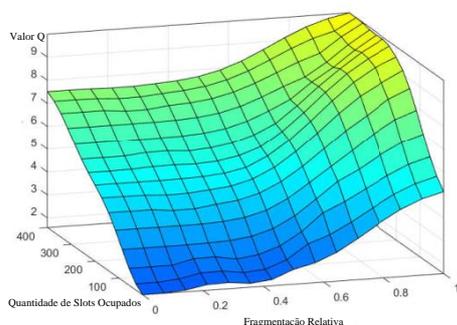


Figura 8: Superfície de controle da base de regras.

resultados obtidos das simulações computacionais referentes a atual proposta do sistema Fuzzy.

5 Análise dos Resultados

Para análise de desempenho o algoritmo Fuzzy-RQoTO foi comparado com os algoritmos KS-PC, Fuzzy e KSP-RQoTO na topologia USA. A Figura 9 apresenta a topologia de estudo. As métricas consideradas para avaliação dos algoritmos foram a probabilidade de bloqueio de circuito e sua decomposição (fragmentação, AEL, QoTN e QoTO) e probabilidade de bloqueio de banda. As simulações foram feitas utilizando o SNetS (*Simulator Network Slice*) (Fontinele et al., 2017). Em

(Fontinele et al., 2017). estão descritos os detalhes técnicos sobre o modelo de camada física implementado, que no caso, é o mesmo adotado no presente trabalho. Como o desempenho do algo-

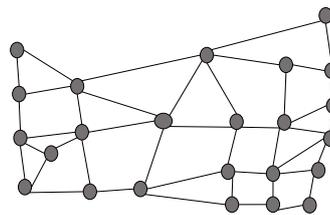


Figura 9: Topologia USA.

ritmo Fuzzy-RQoTO depende do valor do sigma a ser adotado, foi realizado um estudo para encontrar o melhor valor do sigma para a topologia USA (Fontinele et al., 2017), que para o cenário em estudo, obteve-se 0,25 como o melhor valor do sigma. Este valor foi adotado para os algoritmos KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO no estudo de avaliação de desempenho neste trabalho. Os parâmetros adotados para a realização da simulação são apresentados na Tabela 2.

Para geração das requisições foi utilizado o processo de Poisson com 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. Foi utilizado 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 (*Quadrature Phase Shift Keying*), 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM (Fontinele et al., 2017). Outros parâmetros utilizados encontram-se em (Fontinele et al., 2017).

A Figura 10 apresenta a probabilidade de bloqueio de circuito adquirido pelos algoritmos KS-PC, Fuzzy, KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO para a topologia USA. Analisando a Figura 10, nota-se que o algoritmo Fuzzy-RQoTO apresentou taxas de bloqueios inferiores quando comparado aos algoritmos KS-PC, Fuzzy e KSP-RQoTO. Ainda

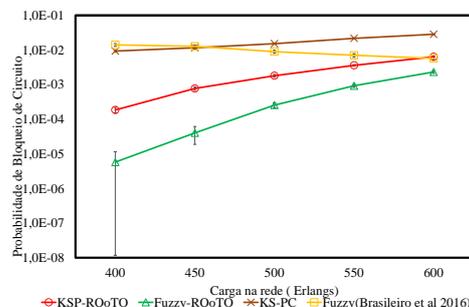


Figura 10: Probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia USA.

Tabela 2: Parâmetros para as simulações.

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

na Figura 10, considerando o ponto de carga de 600 Erlangs, o algoritmo Fuzzy-RQoTO apresentou um ganho de 91,85%, 59,5% e 63,7% quando comparado aos algoritmos KS-PC, Fuzzy e KSP-RQoTO, respectivamente. O ganho é a diferença do valor da probabilidade de bloqueio do algoritmo Fuzzy-RQoTO em relação as demais algoritmos.

Além disso, foram avaliadas as componentes da probabilidade de bloqueio de circuito (fragmentação, AEL, QoTN e QoTO). A Figura 11 apresenta as componentes da probabilidade de bloqueio de circuito adquiridas pelos algoritmos KS-PC, Fuzzy, KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO. Na Figura 11 a probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos é decomposta em: Fragmentação, QoTN, QoTO e AEL. Os bloqueios para cada algoritmo é apresentado na sua respectiva escala. Estes resultados indicam qual das componentes contribui mais para o desempenho de cada algoritmo. Observa-se pela Figura 11, que a compo-

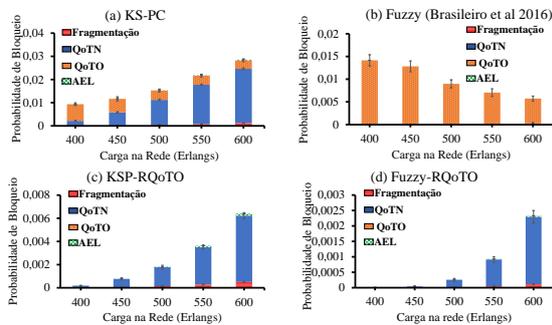


Figura 11: Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia USA.

nente que impacta mais para o bloqueio do algoritmo KS-PC é a QoTN. Isso ocorreu porque o algoritmo não encontrou uma QoT aceitável para uma determinada rota, modulação e faixa de espectro livre para estabelecer um novo circuito. Além disso, o algoritmo KS-PC e Fuzzy(Figura 11(b)) apresentaram bloqueio de QoTO em consequência dos algoritmos estabelecerem circuitos frágeis a interferências de outros circuitos já ativos na rede. Ainda na Figura 11(b), o algoritmo apresenta bloqueios por Fragmentação, QoTN e AEL. Devido o algoritmo apresentar um bloqueio de QoTO elevado as outras componentes de bloqueio (Fragmentação, QoTN e AEL) ficam reduzi-

dos na Figura 11(b). Enquanto que os algoritmos KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO buscam reduzir o bloqueio por QoTO, a Figura 11(c) e Figura 11(d) apresentam ausência do bloqueio QoTO.

Com a eliminação dos bloqueios por QoTO os algoritmos KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO 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 bloqueios dos algoritmos KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO é a QoTN (Figuras 11(c) e 11(d), respectivamente).

Assim, o mecanismo de seleção de rotas do algoritmo Fuzzy-RQoTO mostra-se mais eficiente do que o mecanismo adotado pelo KSP-RQoTO para esse cenário. Além disso, o algoritmo Fuzzy-RQoTO apresenta um desempenho superior. A Figura 12 apresenta a probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos KS-PC, Fuzzy, KSP-RQoTO e Fuzzy-RQoTO. Nota-se na Figura

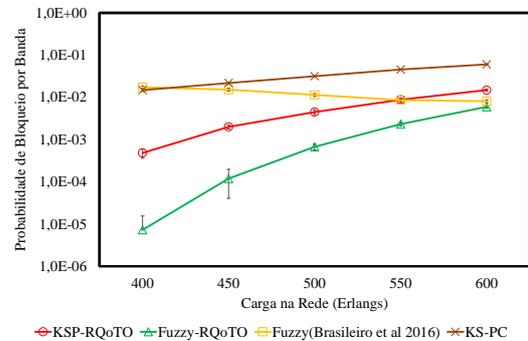


Figura 12: Probabilidade de bloqueio por largura banda para a topologia USA.

12 que o algoritmo Fuzzy-RQoTO apresentou um bloqueio inferior quando comparado aos algoritmos KS-PC, Fuzzy(Brasileiro et al., 2016) e KSP-RQoTO. Analisando a carga de 400 Erlangs para a taxa de bloqueio de banda (Figura 12), o algoritmo Fuzzy-RQoTO alcançou um ganho de 90,1%, 26,5% e 60% em relação aos algoritmos KS-PC, Fuzzy e KSP-RQoTO, respectivamente. Assim, verifica-se que o algoritmo Fuzzy-RQoTO é capaz de selecionar a rota com mais recursos disponíveis (rota de qualidade) para estabelecer o circuito. Desta forma, a utilização do sistema

fuzzy é eficiente para auxiliar na tomada de decisão da rota com mais recursos disponíveis na rede.

6 Conclusão

Neste artigo foi proposto um novo algoritmo IA-RMLSA para solucionar o problema RMLSA utilizando o sistema Fuzzy, denominado de Fuzzy-RQoTO para as redes ópticas elásticas. O algoritmo Fuzzy-RQoTO seleciona a melhor rota (rota de qualidade) para o estabelecer o circuito. Além disso, o algoritmo busca reduzir os impactos causadas no QoT e na fragmentação.

Foram adotadas duas métricas para seleção da rota: fragmentação relativa e a quantidade de slots ocupados. Neste contexto, o sistema Fuzzy infere um grau de pertinência para as métricas adotadas em busca da melhor rota de qualidade.

Foi realizado um estudo de avaliação de desempenho do algoritmo comparando a proposta com os algoritmos KS-PC, Fuzzy (Brasileiro et al., 2016) e KSP-RQoTO na topologia USA. Esses algoritmos também fazem parte da categoria IA-RMLSA.

Em termos de probabilidade de bloqueio por circuito, verificou-se que o algoritmo Fuzzy-RQoTO apresentou um ganho de 91,85%, 59,5% e 63,7% quando comparado aos algoritmos KS-PC, Fuzzy e KSP-RQoTO, respectivamente. Em termos de probabilidade de bloqueio de largura de banda, verificou-se que o algoritmo proposto apresentou um ganho de 90,1%, 26,5% e 60% em relação ao KS-PC, Fuzzy (Brasileiro et al., 2016) e KSP-RQoTO, respectivamente.

Neste contexto, a utilização do sistema Fuzzy torna-se eficaz para solucionar o problema RMLSA nas redes ópticas elásticas, resultando em uma alternativa viável para aplicação em tempos reais.

Referências

- Barbosa, E. L., Brasileiro, Í. B., Rabêlo, R. A., Soares, A. C. and Junior, J. V. (2017). Nova abordagem para o problema de roteamento nas redes ópticas elásticas utilizando sistema fuzzy, *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI*.
- Barbosa, Ê. L. V., Brasileiro, Í. B., Soares, A. C. and dos Reis Júnior, J. V. (2017). Energy efficiency analysis with different modulation formats in elastic optical networks, *Transparent Optical Networks (ICTON), 2017 19th International Conference on*, IEEE, pp. 1–4.
- Beyranvand, H. and Salehi, J. A. (2013). A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks, *Journal of Lightwave Technology*. **31**(18): 3043–3054.
- Brasileiro, Í. B., dos Reis Júnior, J. V. and Soares, A. C. B. (2016). Nova solução para o problema de roteamento em redes ópticas elásticas utilizando algoritmo ciente de fragmentação baseado em sistemas fuzzy, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC*.
- Chatterjee, B. C., Sarma, N. and Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **17**(3): 1776–1800.
- Costa, L. R. and Drummond, A. C. (2017). Novo esquema para provisão de modulação adaptativa em redes ópticas elásticas, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos SBRC*.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische mathematik* **1**(1): 269–271.
- Fontinele, A., Santos, I., Neto, J. N., Campelo, D. R. and Soares, A. (2017). An efficient iarmlsa algorithm for transparent elastic optical networks, *Computer Networks* **118**: 1–14.
- Horota, A. K., Figueiredo, G. B. and da Fonseca, N. L. (2014). Algoritmo de roteamento e atribuição de espectro com minimização de fragmentação em redes ópticas elásticas, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC*.
- Moura, P. M. (2015). Roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas, *Universidade Estadual de Campinas*.
- Ribeiro, S. R. L. (2014). *Roteamento multicritério em redes ópticas elásticas dinâmicas*, Master's thesis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba.
- Shakya, S. and Cao, X. (2013). Spectral defragmentation in elastic optical path networks using independent sets, *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, pp. 1–3.
- Zhang, Q.-Y., Sun, Z.-M. and Zhang, F. (2014). A clustering routing protocol for wireless sensor networks based on type-2 fuzzy logic and aco, *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2014 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 1060–1067.
- Zhu, P., Li, J., Wu, D., Chen, Y., Tian, Y., Wu, Z., Ge, D., Chen, X., Chen, Z. and He, Y. (2017). Software-defined elastic optical network node supporting spectrum defragmentation, *Journal of Optical Communications and Networking* **9**(1): A63–A70.