

NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO NAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS UTILIZANDO SISTEMA FUZZY

ENIO L. V. BARBOSA*, ÍTALO B. BRASILEIRO[†], RICARDO A. L. RABÊLO*, ANDRÉ C. B. SOARES[‡],
JOSÉ V. R. JUNIOR[§]

**Sistemas Inteligentes
Universidade Federal do Piauí
Teresina, Piauí, Brasil*

Emails: enioluciano@gmail.com, italo.barbosabrasileiro@yahoo.com.br,
ricardoalr@edu.ufpi.br, andresoes@edu.ufpi.br, valdemirreis@edu.ufpi.br

Abstract— In this paper, a new proposal of Fuzzy System is presented to choose the best route with lower simulation time in Elastic Optical Networks. The proposed algorithm defines the best route to a given pair(o,d), considering as metrics the relative fragmentation of routes and the number of occupied slots. To perform the simulations we used the SnetS (Slice Network Simulator) tool considering the USA and NSFNet topologies. The obtained results show that the proposed approach has 92.6% and 84.96% lower simulation time, as well as 11.07% and 0.12% lower blocking rate as compared to another solution Fuzzy in both the NSFNet and USA topologies, respectively.

Keywords— Elastic Optical Network, Nebulous System, Routing and Spectrum Assingment.

Resumo— Neste artigo, é apresentada uma nova proposta de sistema Fuzzy para a escolha da melhor rota com o menor tempo de simulação em redes ópticas elásticas. O algoritmo proposto define a melhor rota para um determinado par(o,d), considerando como métricas a fragmentação relativa e a quantidade de slots ocupados das rotas. Para executar as simulações, utilizamos a ferramenta SnetS (*Slice Network Simulator*) considerando as topologias de USA e NSFNet. Os resultados obtidos mostram que a abordagem proposta obteve um menor tempo de simulação de 92,6% e 84.96%, bem como uma taxa de bloqueio inferior de 11.07% e 0,12% quando comparado com outra solução Fuzzy em ambas as topologias NSFNet e USA, respectivamente. Além disso, foi utilizado um algoritmo de roteamento de menor caminho (Dijkstra - Djik) afim de compara-lo com a proposta Fuzzy.

Palavras-chave— Redes Ópticas Elásticas, Sistemas Nebulosos, Roteamento e Alocação de Espectro

1 Introdução

Nas redes ópticas elásticas (*EON- Elastic Optical Network*) o espectro é dividido em slots de frequência (6,25GHz ou 12,5GHz) que estabelecem diversos circuitos, aumentando a capacidade de transmissão (Moura et al., 2014). Para transmissão dos dados, é necessário selecionar a rota e a faixa espectral, portanto para a utilização das EON, devem ser solucionado o problema de roteamento e alocação do espectro (*RSA-Routing and Spectrum Allocation*) (Talebi et al., 2014) que consiste em escolher qual das rotas candidatas e faixa espectral devem ser utilizados para atender às requisições.

As rotas candidatas são aquelas que possuem menores caminhos para atender às requisições, no entanto, para preservar a transmissão de dados no enlace, é necessário satisfazer às restrições de continuidade e contiguidade (de Sousa, 2016). Na restrição de continuidade, o circuito deve ser alocado no mesmo espectro de frequência ao longo da rota escolhida, enquanto que na restrição de contiguidade a agregação de dois ou mais slots, só é possível se os slots do espectro estiverem adjacentes.

Neste contexto, a aplicação de sistemas inteligentes têm auxiliado para a solução do problema RSA. Como por exemplo o uso do sistema Fuzzy

em [Brasileiro et al. 2016] que utilizou a fragmentação relativa, a quantidades de slots ocupados e o índice do primeiro slot para a escolha da qualidade da rota para atender as requisições melhorando o desempenho da rede.

Assim, no presente trabalho é proposta uma nova abordagem de um Sistema Fuzzy para solucionar o problema RSA nas redes ópticas elásticas, utilizando a fragmentação relativa e a quantidade de slots ocupados como métricas para a escolha das rotas, permitindo menores taxas de bloqueio no sistema, bem como a redução do tempo global da simulação computacional para as topologias NSFNet e USA (Fontenele, 2016).

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é descrita uma visão geral das Redes Ópticas Elásticas; na Seção 3 é descrito os trabalhos relacionados; a Seção 4 apresenta a modelagem do Sistema Fuzzy enquanto que na Seção 5 é realizado a análise dos resultados; seguido das conclusões.

2 Redes Ópticas Elásticas

As redes EON têm o espectro particionado em intervalos de frequência e estabelece múltiplos circuitos em uma única fibra óptica (Moura, 2015). Para a transmissão dos dados, o problema RSA devem ser solucionados nas EON (Talebi et al.,

2014). Para a escolha de uma rota e faixa espectral livre, é necessário satisfazer as restrições de continuidade e contiguidade, a fim de viabilizar a transmissão de dados no domínio óptico, evitando a conversão eletro-óptico (Wang and Mukherjee, 2014).

Neste contexto, a primeira restrição exige que a faixa espectral de cada enlace da rota escolhida esteja livre para que seja atendida a requisição. Já a 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 elástica, denominado de problema da fragmentação (Horota et al., 2014). A Figura 1 ilustra o problema da fragmentação no espectro. Observa-se

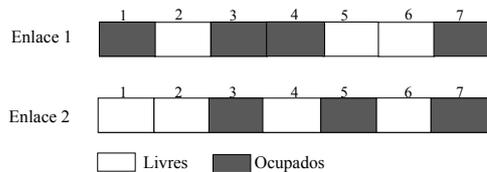


Figura 1: Problema da fragmentação do espectro ([Adaptada de [Horota, Figueiredo, da Fonseca, 2014]).

na figura 1 que no enlace 1 existem 4 slots ocupados no espectro (índices 1, 3, 4, 7) e apenas 3 slots livres (índices 2, 5, 6), já no enlace 2 existem 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 porque não atende as restrições de contiguidade e continuidade por consequência da fragmentação, pois o espectro no enlace 1 e 2 estão fragmentados e atendem apenas requisições de 1 slot, devido aos índices 2 e 6 do enlace 1 e 2 estarem livres e contínuos. 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:

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

onde req representa a quantidade de slots da requisição para ser atendida, $ReqSimultaneas(req)$ é o número de requisições simultâneas de tamanho req que podem ser satisfeitas e $TotalSlotsLivres$ é a quantidade de slots livres que o espectro possui na rota. A fragmentação relativa admite valores de 0

até 1, no qual o valor 1 representa o espectro completamente fragmentado, logo não há slots livres para atender requisições, enquanto que 0 representa o espectro completamente desfragmentado. 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 designado um formato de modulação, caso não seja possível determinar um formato de modulação para uma rota, esta rota é excluída das rotas candidatas.

Os autores em (Oliveira and da Fonseca, 2016) apresentam um novo algoritmo para fornecer proteção de caminho através do emprego de p-cycle de caminho, agregação de tráfego e sobreposição de espectro nas redes ópticas elásticas. O p-cycle é uma técnica de proteção no qual combina as propriedades de velocidade de proteção em anel com a eficiência das redes em malhas restauráveis.

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 elástica, 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 quan-

tidade de slots ocupados, atribuindo variáveis linguísticas para uma melhor escolha de roteamento.

Em (Zhao et al., 2015) foi abordado o problema RSA para viabilizar o estabelecimento de circuitos nas redes ópticas elásticas adotando uma nova formulação de programação linear, além de duas heurísticas de RSA cientes de efeitos de camada física, denominadas de GL (*Group List*) e CL (*Connection List*).

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. O algoritmo definia a melhor rota para um dado par, considerando como métricas para a escolha da rota a fragmentação relativa, a quantidade de slots ocupados e o índice do primeiro slot livre.

Neste contexto, a principal contribuição do presente trabalho é a proposta de uma adaptação no sistema Fuzzy, no qual busca a melhor rota para atender as requisições utilizando como métricas para a escolha da rota a fragmentação relativa e a quantidade de slots ocupados, para redução da taxa de bloqueio e tempo de execução da simulação.

Na seção seguinte é apresentada a modelagem do Sistema Fuzzy proposto.

4 Modelagem do Sistema Fuzzy

Na abordagem aqui proposta, o principal objetivo é a escolha da melhor rota dentre as rotas candidatas (rotas de menores caminho), ou seja, a rota que estabelece mais circuitos na rede. Para tal, utilizou-se um sistema Fuzzy para auxiliar na escolha da rota de melhor qualidade.

O sistema Fuzzy é composto de uma base de dados, mecanismo de inferência (raciocínio) e são empregadas regras pelo mecanismo de inferência para lidar com a base de dados (Marro et al., 2010). A Figura 2 ilustra a estrutura básica de um sistema Fuzzy.

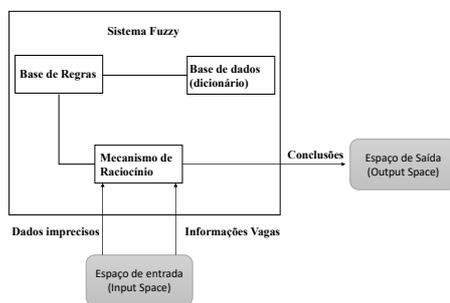


Figura 2: Ciclo básico de um Sistema Fuzzy.

A base de dados apresenta informações sobre o domínio em estudo, no qual contém o problema, além das formas de condução para identificação e solução do problema. O mecanismo de inferência

(raciocínio) opera como um processador e trabalha com as informações contidas na base de conhecimento (domínio da aplicação). A base de regras é formada por proposição fuzzy (IF.. then..), no qual possui o conhecimento no qual representa a decisão a ser tomada, quanto mais informações do domínio, mais preciso será o resultado.

Para obter o grau de pertinência das variáveis da entrada são atribuídos termos linguísticos para serem utilizados na base de regras, no qual é realizada a modelagem da informação das variáveis de entrada com os conjuntos Fuzzy, em que se empregam os termos linguísticos. Os termos linguísticos, como exemplo: (baixo, médio, alto) são modelados por um conjunto Fuzzy, no qual ao determinar os termos linguísticos (ou variáveis linguísticas), é realizada a classificação de cada variável encontrada, após isso, é feito o processo de defuzzificação para obter uma saída numérica, modificando o estado da variável de saída Fuzzy para um valor numérico.

O sistema aqui proposto utiliza duas métricas para a escolha da rota: a fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados. Ao surgir uma requisição, serão atribuídos um grau de pertinência para as rotas candidatas a fim de escolher a rota com mais recursos disponíveis para o estabelecimento do circuito.

O primeiro critério utilizado para a escolha da rota foi a fragmentação relativa, no qual verifica o quanto a rota está fragmentada para aceitar requisição. Para a fragmentação relativa, adotou-se valores entre zero (0) e um (1), considerando que quanto mais próximo de um (1), mais o espectro está fragmentado e mais requisições serão bloqueadas.

Portanto, a fragmentação relativa é útil para apontar as rotas que possuem uma menor fragmentação, afim de avaliar quais rotas podem aceitar determinada requisição. A Figura 3 apresenta a função de pertinência da fragmentação relativa. Foi utilizado a função gaussiana, além disso foi utilizado 3 termos linguísticos: baixo, médio e alto, alocados com os valores médios 0, 0.5, 1, como desvio padrão de 0.2.

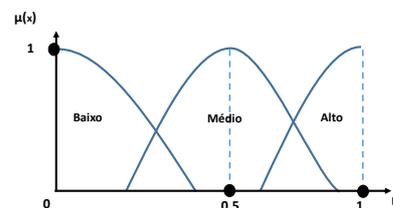


Figura 3: Função de pertinência para a primeira entrada Fuzzy que representa a fragmentação relativa.

O segundo critério para a escolha da melhor rota foi a quantidade de slots ocupados, conside-

rando que quanto menos slots estiverem ocupados nos enlaces da rota, mais requisições poderão ser aceitas com diferentes larguras de banda no qual resulta em menos bloqueio de requisições. A Figura 4 apresenta o gráfico da função de pertinência definidas com valores centrais de 1, 200, 400 slots ocupados e desvio padrão de 80. A função

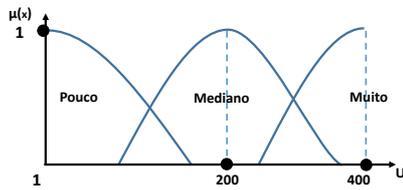


Figura 4: Função de pertinência para a segunda entrada Fuzzy que representa a quantidade de slots ocupados.

de pertinência adotada foi a gaussiana, utilizando três termos linguísticos: pouco, mediano e muito. Após definir as variáveis de entrada, e a adoção dos termos linguísticos no processo de fuzzificação é necessário definir os termos linguísticos que qualifique as rotas no processo de saída do Sistema Fuzzy, denominado de defuzzificação.

Na defuzzificação foram adotadas cinco (5) termos linguísticos, descritas como: excelente, muito bom, bom, regular e péssimo, no qual utilizou-se a função de pertinência triangular por apresentar um tempo de simulação inferior as outras funções de pertinência para definição da melhor rota. A Figura 5 apresenta a função de pertinência triangular para o processo de defuzzificação, juntamente com seus respectivos termos linguísticos. As duas variáveis linguísticas de entrada

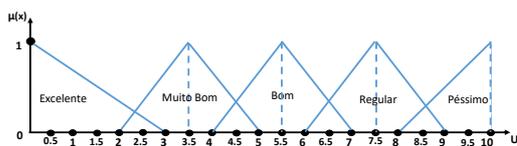


Figura 5: Termos linguísticos para o processo de defuzzificação.

(fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados) e três termos linguísticos na fuzzificação (baixo, médio e alto) para a fragmentação relativa; (pouco, mediano e muito) para a quantidade de slots ocupados, totalizam 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 quantidade total de regras (IF.. Then..) se dá por possuir apenas duas variáveis de entra-

das (fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados) e 3 termos linguísticos no processo de fuzzificação. A variável linguística "péssimo" não foi incluída devido a resultados de simulações anteriores no qual a ausência dela obteve resultados satisfatórios.

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

A seguir são apresentados os resultados obtidos das simulações computacionais referentes a atual proposta do sistema Fuzzy.

5 Análise de Desempenho do Sistema Fuzzy nas Redes Ópticas Elásticas

Para a análise de desempenho foram utilizadas as topologias NSFNet, possui 14 nós e 22 enlaces, e USA que apresenta 24 nós e 43 enlaces [Brasileiro et al 2016]. Em ambas topologias possuem variações nos tamanhos dos enlaces de um nó para outro, além das requisições surgirem de qualquer nó (origem) para qualquer nó(destino).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros que foram utilizados para as topologias NSFNet e USA com suas respectivas cargas, que representam a média da taxa de chegada e taxa de atendimento. A taxa de chegada corresponde a um valor médio de chegada, ou seja, a quantidade de requisições que surgem por unidade de tempo (horas, minutos ou segundos), enquanto que a taxa de atendimento equivale ao tempo que leva para o atendimento da requisição, ou seja, a duração média do circuito.

Tabela 2: Parâmetros utilizados em cada topologia.

Parâmetros	NSFNet	USA
Número de Nó	14	24
Número de enlaces	22	43
Carga inicial por nó	3	2.1
Incremento da carga	0.24	0.36

A Tabela 3, apresenta os parâmetros das simulações, considerando 100 mil requisições que são geradas pelo processo de poisson com media λ e o tempo de retenção é distribuído exponencialmente através da média $1/\mu$. Além disso, foram

adotados 7 pontos de carga que corresponde a média da taxa de chegada e taxa de atendimento. A taxa de chegada corresponde quantas requisições surgem por unidade de tempo e a taxa de atendimento é a duração em que a requisição é atendida.

Para esse cenário o espectro possui 400 slots livres no estado inicial da rede, adotando 12,5GHz de intervalo de frequência e utilizando larguras de banda de 10, 20, 40, 80, 160, 320 Gbps [Brasileiro et al. 2016]. A Tabela 4 apresenta o compara-

Tabela 3: Parâmetros para a simulação.

Parâmetros	Valores
Número de Requisições	100,000
Quantidade de replicações	10
Pontos de carga	7
Quantidade de slot	400
Intervalo de frequência	12.5 GHz
Largura de Banda	10, 20, 40, 80, 160, 320 Gbps

tivo da base de regras e quantidade de variáveis que foram utilizadas no sistema Fuzzy proposto e no sistema Fuzzy de (Brasileiro et al., 2016). Foi

Tabela 4: Comparativo dos sistemas Fuzzy.

Algoritmos	Quant. de Regras	Quant. de variáveis
Sistema Fuzzy proposto	9	2
Sistema Fuzzy [Brasileiro et al 2016]	125	3

calculado a média dos pontos de carga, no qual verificou-se que o sistema proposto obteve um bloqueio inferior de 11.07% e 97.31% quando comparado a Sistema Fuzzy (Brasileiro et al., 2016) e Djk na topologia NSFNet. A Figura 6 ilustra o resultado da probabilidade de bloqueio dos sistemas Fuzzy na topologia NSFNet. Já para a topologia

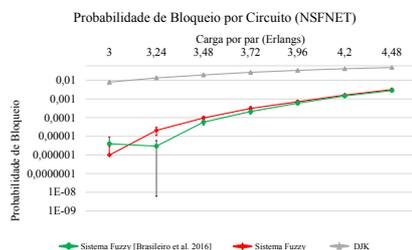


Figura 6: Comparação da probabilidade de Bloqueio para a topologia NSFNet.

USA, o sistema aqui proposto obteve um bloqueio inferior de 0.12%, quando comparado ao sistema fuzzy (Brasileiro et al., 2016) e quando comparado ao DJK apresentou uma taxa de bloqueio inferior de 63.94%, conforme ilustra a Figura 7.

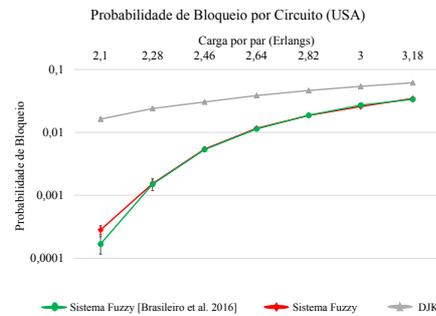


Figura 7: Comparação da probabilidade de Bloqueio para a topologia USA.

O tempo de simulação do sistema Fuzzy proposto apresentou uma redução de 25 horas quando comparado ao Sistema Fuzzy (Brasileiro et al., 2016) e um aumento de 39 minutos comparado ao DJK, na topologia NSFNet enquanto que para a topologia USA ocorreu uma redução de 25 horas e 29 minutos quando comparado ao sistema Fuzzy (Brasileiro et al., 2016) e um aumento de 2h e 24 minutos comparado ao DJK. Para executar as simulações foi utilizada uma máquina com o processador i7, sistema operacional Windows 10 e memória *Random Access Memory*(RAM) de 8Gb. A Figura 8 mostra a comparação do tempo de simulação (em Horas) dos sistemas Fuzzy para topologias NSFNet e USA.

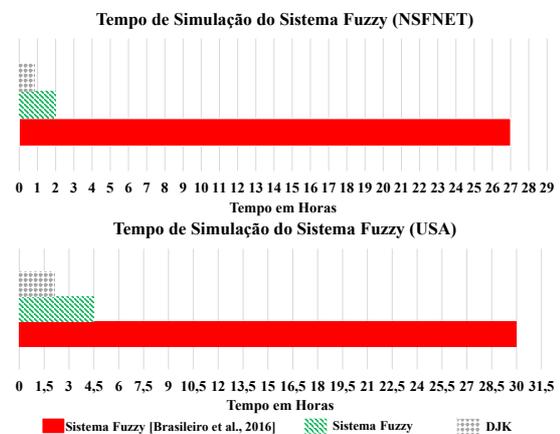


Figura 8: Tempo de simulação dos sistemas Fuzzy.

Com a simplificação dos termos linguísticos no processo de fuzzificação e com o aumento de termos linguísticos no processo de defuzzificação, o sistema Fuzzy proposto apresentou uma redução significativa do tempo de simulação computacional comparado com a outra proposta de (Brasileiro et al., 2016). O Sistema Fuzzy proposto apontou que a redução das regras e métricas utilizadas, resultou em um bloqueio inferior de requisições, bem como a redução do tempo computacional quando comparada a outra proposta do sistema Fuzzy (Brasileiro et al., 2016), porém

quando comparado ao algoritmo de menor caminho DJK, o tempo de simulação foi maior, porém a taxa de bloqueio foi inferior.

6 Conclusão

O Sistema Fuzzy proposto neste trabalho, busca a melhor rota dentre as rotas candidatas para o estabelecimento de circuito. A proposta deste artigo é reduzir a taxa de bloqueio, aumentando a quantidade de requisições para serem estabelecidas reduzindo o tempo de execução da simulação computacional. Para isso, o sistema Fuzzy proposto utilizou a fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados para a escolha da melhor rota. Verificou-se que o sistema proposto obteve uma redução no bloqueio e no tempo de execução computacional comparado ao sistema Fuzzy de [Brasileiro et al. 2016]. Com essa nova abordagem do sistema Fuzzy, verificou-se que o sistema proposto obteve uma redução no bloqueio e tempo de simulação computacional comparado ao sistema Fuzzy de [Brasileiro et al. 2016]. Portanto, foi constatado que para o mesmo cenário, o sistema Fuzzy aqui proposto apresentou um bloqueio inferior de 11.07% para o sistema fuzzy (Brasileiro et al., 2016) e uma taxa de bloqueio inferior de 97.31% quando comparado ao Djk e uma redução no tempo de simulação de 92.6% ao sistema Fuzzy (Brasileiro et al., 2016) e um aumento de 39 minutos comparado ao Djk, para a topologia NSFNet. Já para a topologia USA apresentou uma taxa de bloqueio de requisições de 0.12% e 63.94% para o sistema fuzzy (Brasileiro et al., 2016) e Djk, respectivamente. Enquanto que para o tempo de simulação apresentou uma redução de 84.96% quando comparado a proposta do sistema Fuzzy de (Brasileiro et al., 2016) e um aumento de 2h e 24 minutos para o Djk.

Referências

- 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*.
- de Sousa, L. S. (2016). *Provendo múltiplas transferências de dados em massa em redes ópticas elásticas*, PhD thesis, Universidade de Brasília.
- Fontenele, A. C. (2016). Um novo algoritmo rsaciente a imperfeições de camada física para redes ópticas elásticas, *Universidade Federal do Piauí*.
- 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*.
- Marro, A. A., de Carvalho Souza, A. M., de Sousa Cavalcante, E. R., Bezerra, G. S. and de Oliveira Nunes, R. (2010). Lógica fuzzy: conceitos e aplicações, *Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)*.
- Moura, P. M. (2015). Roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas, *Universidade Estadual de Campinas*.
- Moura, P. M., d. Fonseca, N. L. S. and Scaraficci, R. A. (2014). Fragmentation aware routing and spectrum assignment algorithm, *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1137–1142.
- Oliveira, H. M. d. S. and da Fonseca, N. L. (2016). Proteção de redes ópticas elásticas baseada em agregação de tráfego, sobreposição de espectro e p-cycle fipp, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC*.
- 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.
- Talebi, S., Alam, F., Katib, I., Khamis, M., Salama, R. and Rouskas, G. N. (2014). Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey, *Optical Switching and Networking* **13**: 34 – 48.
- Wang, R. and Mukherjee, B. (2014). Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks, *Optical Switching and Networking* **11**: 83–91.
- Zhao, J., Wymeersch, H. and Agrell, E. (2015). Nonlinear impairment aware resource allocation in elastic optical networks, *Optical Fiber Communication Conference*, Optical Society of America, pp. M2I–1.