Nova Solução para o Problema de Roteamento em Redes Ópticas Elásticas utilizando Algoritmo Ciente de Fragmentação Baseado em Sistemas Fuzzy

Ítalo Barbosa Brasileiro¹, José Valdemir dos Reis Júnior¹, André Castelo Branco Soares¹

¹Departamento de Computação – Universidade Federal do Piauí (UFPI) Teresina – PI – Brazil

italo.barbosabrasileiro@yahoo.com.br, {andre.soares, valdemirreis}@ufpi.edu.br

Abstract. This paper presents a new solution to the routing problem in Elastic Optical Networks using an intelligent approach based on Fuzzy System. The proposed algorithm defines the best route to a given pair, considering as metrics the fragmentation of routes, the number of occupied slots and the index of the first free interval to establish the circuit. Simulations taken with this new approach consider the USA and NSFNet topologies, which has large area and a crescent number of users. The obtained results shows that the proposed approach has blocking 30,43% lower when compared to DJK (Dijkstra), 20,87% lower to another Fuzzy implementation and 13,24% lower to MMRDS in USA topology, and 95,45% lower when compared to DJK, 78,03% compared to another Fuzzy implementation and 63,81% lower to MMRDS in NSFNet topology. The performance stated by this approach enables the exploration of new intelligent techniques to improve the quality of service in Elastic Optical Networks.

Resumo. Neste artigo é apresentada uma nova solução para o problema de roteamento em Redes Ópticas Elásticas utilizando uma abordagem inteligente baseada em Sistema Fuzzy. O algoritmo proposto define a melhor rota para um dado par, considerando como métricas a fragmentação das rotas, a quantidade de slots livres e o índice do primeiro intervalo livre para o estabelecimento do circuito. As simulações para essa nova abordagem consideram as topologias USA e NSFNet, que ocupam grande área e possuem número crescente de usuários. Os resultados obtidos apontam que a abordagem proposta apresenta bloqueio 30,43% inferior ao DJK (Dijkstra), 20,87% inferior a outra implementação Fuzzy e 13,24% inferior ao MMRDS para a topologia USA, enquanto que para a topologia NSFNet apresenta bloqueio 95,45% inferior ao DJK, 78,03% inferior à outra implementação Fuzzy e 63,81% inferior ao MMRDS. Os desempenhos relatados para esta proposta possibilitam a exploração de novas técnicas inteligentes para melhorar a qualidade de serviço das Redes Ópticas Elásticas.

1. Redes Ópticas Elásticas

Para acompanhar a crescente necessidade de maiores taxas de transmissão, surgem tecnologias que permitem a transmissão de grande volume de dados. Dentre essas tecnologias estão as Redes Ópticas Elásticas (EON - *Elastic Optical Networks*) [Kretsis et al. 2014],

que utilizam a luz como meio de transmissão dos dados, conseguindo atingir altas taxas de transmissão. As Redes Elásticas permitem o estabelecimento de múltiplos circuitos em uma única fibra, por meio da divisão do espectro em intervalos de frequência, aumentando a capacidade de transmissão [Moura et al. 2014].

As EON possuem a vantagem de acomodar circuitos que exigem diferentes quantidades de largura de banda, de forma a não subutilizar o intervalo espectral selecionado. Isso se deve à organização espectral: o intervalo de frequência do espectro é dividido em pequenos intervalos de frequência média de 12,5 GHz denominados *slots* [Cugini et al. 2013]. A Figura 1 ilustra os slots do espectro óptico de uma fibra. Para atender requisições que necessitem de maiores larguras de banda, slots adjacentes são agrupados para formar um intervalo espectral maior. Esse intervalo é destinado aos circuitos que necessitam de maior quantidade de banda para serem estabelecidos. Na Fig. 1 é possível observar a existência de circuitos com 1, 2 ou 3 slots. Essa "elasticidade" do espectro óptico é o que caracteriza e concede o nome das Redes Ópticas Elásticas.

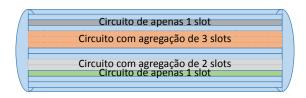


Figura 1. Representação de fibra óptica e capacidade elástica de slots.

Para o uso eficiente de redes ópticas, é necessária a seleção de rota e faixa espectral para atender as requisições de circuito, de modo a reduzir o impacto causado pelos recursos alocados na taxa de QoS (*Quality of Service*) causado pelos recursos a serem alocados. Portanto, o problema RSA (*Routing and Spectrum Allocation*) [Gerstel et al. 2012] tornase um desafio importante para a utilização de Redes Elásticas. A rota e a faixa espectral ideal escolhida como solução para o problema RSA devem resultar em melhor utilização dos recursos da rede e preservar a organização dos circuitos já estabelecidos.

Para manter a transmissão dos dados ao longo dos enlaces é necessário cumprir alguns requisitos provenientes do meio óptico, denominados de *restrições de continuidade e contiguidade espectral* [Wang and Mukherjee 2014]. Na *restrição de continuidade*, para que não haja necessidade de conversão do sinal óptico para o domínio eletrônico, tornase obrigatória a permanência do sinal óptico no mesmo intervalo espectral entre os nós de origem e destino. Assim, ao alocar um conjunto de slots para a formação de um circuito, o mesmo conjunto deve estar disponível em todos os enlaces constituintes da rota selecionada. Na *restrição de contiguidade*, para atender uma requisição, é preciso alocar um conjunto de slots dispostos de forma adjacente no espectro óptico. Assim, utiliza-se apenas um transmissor para cada circuito, pois apenas uma faixa espectral será ocupada. A Figura 2 ilustra os problemas de *continuidade* e *contiguidade* espectral.

Devido a restrições de *continuidade* e *contiguidade*, e a medida que circuitos são estabelecidos e desligados, vão surgindo pequenas lacunas de slots livres no espectro. Na Fig. 2(a), observa-se que algumas lacunas não poderão ser preenchidas devido à restrição de continuidade. Na Fig. 2(b), a restrição de contiguidade impede o estabelecimento de circuitos maiores que 2 slots, pois todo o espectro está dividido em pequenos fragmentos. A presença desses intervalos, em maior proporção, interfere no funcionamento da

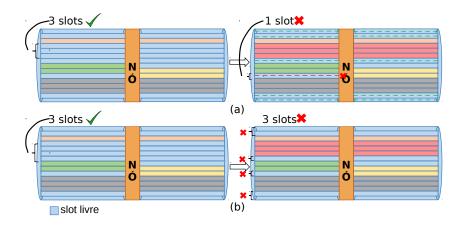


Figura 2. Restrições de continuidade (a) e contiguidade (b).

rede, pois algumas requisições não serão atendidas, ainda que existam slots suficientes. Estes slots estarão dispersos no espectro óptico, impedidos de serem alocados devido à *restrição de contiguidade*. Esse problema surge juntamente com as Redes Elásticas, e é caracterizado como *Problema de Fragmentação* [Wang and Mukherjee 2014].

Considerando o problema RSA, juntamente com suas restrições e o agravante de fragmentação, no presente trabalho é proposto um novo algoritmo baseado em lógica *Fuzzy* para solucionar o problema de roteamento em Redes Ópticas Elásticas. A técnica proposta utiliza informações do nível de fragmentação do espectro óptico, a fim de escolher a rota com menor grau de fragmentação para a formação de novos circuitos. Além de ser um sistema ciente de fragmentação, o algoritmo também utiliza informações como a quantidade de slots ocupados e o índice do slot que encabeça o primeiro intervalo capaz de suportar a requisição, para viabilizar um melhor balanceamento de carga durante a escolha de rotas.

A organização do trabalho segue a seguinte orientação: a Seção 2 apresenta uma visão geral dos trabalhos relacionados; a Seção 3 apresenta a modelagem do sistema *Fuzzy* proposto; a Seção 4 apresenta uma avaliação de desempenho do algoritmo, comparado com outros algoritmos de roteamento da literatura; e a Seção 5 apresenta as conclusões.

2. Trabalhos Relacionados

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

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

Os algoritmos que atacam o problema RSA podem ser classificados em dois tipos: *integrados* e *sequenciais*. Os algoritmos *sequenciais* dividem em duas partes o problema RSA, e podem ser classificados em algoritmos de roteamento [Wan et al. 2012] ou algoritmos de alocação de espectro [Wright et al. 2015]. Já os *integrados* tentam resolver o problema RSA em uma única etapa, realizando simultaneamente a escolha da rota e do intervalo de slots destinado para a requisição [Wang and Mukherjee 2012]. O algoritmo proposto neste trabalho ataca o problema de roteamento, portanto é classificado como *sequencial*.

Além do problema RSA, é observado o problema de *Fragmentação* nas redes elásticas [Shakya and Cao 2013]. A medida em que circuitos de diferentes larguras de banda são estabelecidos e desligados, pequenas lacunas de slots não-alocados surgem entre intervalos de slots ocupados. Esse problema pode evoluir de forma a impedir o atendimento de requisições, mesmo que a rota contenha a quantidade suficiente de slots. A fim de evitar a ocorrência desse problema, é feito o estudo de uma classe de algoritmos, classificados como *cientes de fragmentação*. Os autores em [Cugini et al. 2013] apresentam uma técnica de desfragmentação espectral, na qual ocorre suspensão dos circuitos, durante alguns segundos, para reorganização dos mesmos no espectro óptico. Já em [Wang and Mukherjee 2014] é apresentada uma política de particionamento do espectro, a fim de reduzir a desigualdade de atendimento para requisições de diferentes larguras de banda, impactando diretamente na taxa de fragmentação da rede. Nesse sentido, a solução RSA aqui proposta também busca reduzir o impacto da fragmentação no processo de estabelecimento de circuitos, pois leva em consideração o grau de fragmentação das rotas candidatas para a escolha da rota adequada.

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

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

A proposta deste artigo ataca o problema de roteamento utilizando um sistema

Fuzzy na escolha da rota adequada entre as rotas candidatas para o estabelecimento do circuito. Na seção seguinte será demonstrada a modelagem do algoritmo proposto.

3. Roteamento por Lógica Fuzzy

Para a escolha da rota durante a fase operacional da rede, o algoritmo proposto utiliza um sistema *Fuzzy* ao avaliar as rotas candidatas. A Figura 3 apresenta um fluxograma da execução do algoritmo. A chegada de requisições ocorre de forma dinâmica entre todos os pares de nós de origem e destino da rede, e as rotas candidatas são aquelas de menor caminho, caso exista mais de uma rota de menor caminho.

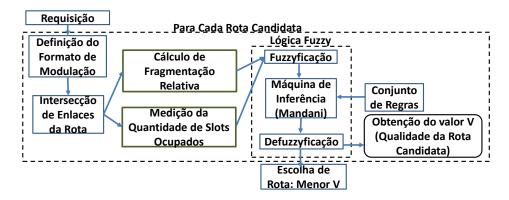


Figura 3. Fluxograma do algoritmo proposto utilizando Sistemas Fuzzy.

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

O sistema *Fuzzy* permite inferir uma *taxa de pertinência* do elemento em um conjunto, através da utilização de variáveis linguísticas e regras de controle. As variáveis classificam o elemento, enquanto as regras reunem as diferentes classificações e definem uma qualidade que represente o elemento avaliado. Considerando essa característica, percebe-se a diferença de procedimentos *Fuzzy* para a lógica clássica, na qual um elemento não-pertence (0) ou pertence totalmente (1) a um conjunto.

Para o cálculo de pertinência de uma rota, é feito inicialmente o processo de Fuzzyficação, quando é verificada um conjunto de características da rota em questão. Cada característica é avaliada em uma função de pertinência, que permite inferir quais variáveis linguísticas qualificam a rota em estudo. Após, o conjunto de variáveis linguísticas encontrado é transmitido para o modelo de inferência de Mamdani [Iancu 2012], que juntamente com o conjunto de regras de base define qual variável linguística de cada critério avaliado representa de melhor forma a rota. Por fim, ocorre o processo de Defuzzyficação, em que se obtém um valor numérico V para caracterizar o estado da rota em estudo.

O primeiro critério utilizado como função de pertinência é a *Quantidade de Slots Ocupados* na rota. Slots ocupados são aqueles que não estão livres de forma contínua na rota, ou seja, os slots que são utilizados em pelo menos um enlace da rota. Rotas com

muitos slots ocupados devem ser evitadas, a fim de não criar os chamados *gargalos* na rede. A Figura 4 apresenta uma modelagem da função de pertinência para a avaliação da *Quantidade de Slots Ocupados*. As variáveis linguísticas definidas foram *q1*, *q2*, *q3*, *q4* e *q5*, que representam respetivamente rotas com distribuição Gaussiana de média igual a 0, 100, 200, 300 e 400 slots ocupados e desvio igual a 80.

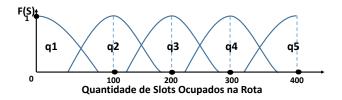


Figura 4. Função de Pertinência para Quantidade de Slots Ocupados.

O segundo critério utilizado como função de pertinência é o grau de *Fragmentação Relativa* [Horota et al. 2014] da rota. A *Fragmentação Relativa* permite verificar o quanto uma rota se encontra fragmentada para atender requisições que necessitam de determinada quantidade de slots. A Equação 1 apresenta o cálculo da *Fragmentação Relativa*:

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

na qual c é a quantidade de slots da requisição a ser atendida, RS(c) é a quantidade de requisições simultâneas de tamanho c que podem ser atendidas considerando o estado corrente do espectro óptico e S_L é a quantidade total de slots livres de forma contínua nos enlaces da rota observada. A Figura 5 exemplifica o cálculo de Fragmentação Relativa considerando uma rota de dois enlaces.

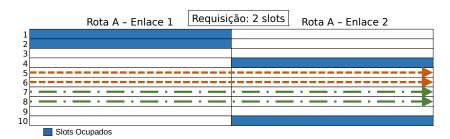


Figura 5. Exemplificação da métrica de Fragmentação Relativa.

No exemplo ilustrado na Figura 5, considerando uma requisição que necessite de 2 slots para ser atendida, percebe-se que apenas dois conjuntos de 2 slots contínuos e contíguos podem ser alocados de forma simultânea considerando o estado corrente do espectro. Observa-se também que, além dos dois conjuntos de slots que podem ser alocados, restam mais 2 slots que estão livres, mas não podem ser alocados devido à fragmentação da rota em questão. Portanto, o grau de *Fragmentação Relativa* da rota ilustrada para requisições de 2 slots é (2 * 2) / 6 = 0.6667.

Avaliar a *Fragmentação Relativa* é útil para apontar as rotas de menor grau de fragmentação. Utilizar essa métrica como critério de avaliação permite verificar as rotas

mais propícias para atender requisições que exijam diferentes quantidades de largura de banda. A Figura 6 ilustra a função de pertinência para a *Fragmentação Relativa*, dividida em 5 conjuntos *Fuzzy* com formato gaussiano: baixo, médio baixo, médio, médio alto e alto, de valor médio respectivamente igual a 0, 0.25, 0.5, 0.75 e 1, e desvio igual a 0.2.

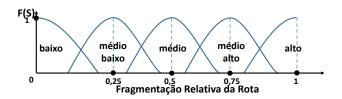


Figura 6. Função de pertinência para o critério de Fragmentação Relativa.

O terceiro critério utilizado como função de pertinência é o *Índice do Slot Inicial do Primeiro Intervalo Espectral Alocável*. Esse critério favorece a escolha da rota mais próxima do início espectral, acarretando em melhor organização no espectro utilizado. A escolha de rotas com o primeiro intervalo de slots alocáveis mais próximo do início do espectro viabiliza melhor aplicação da política *First Fit* no processo de alocação espectral. A Figura 7 apresenta a modelagem da função de pertinência para o critério de *Índice do Slot Inicial do Primeiro Intervalo Espectral Alocável*, na qual q1 apresenta a variável de maior qualidade e q5 a de menor qualidade.



Figura 7. Função de Pertinência para o critério de Índice do Slot Inicial do Primeiro Intervalo Espectral Alocável.

Após a parametrização das variáveis linguísticas para o processo de Fuzzyficação, é necessário modelar uma função que qualifique a rota após a avaliação das variáveis linguísticas que a caracterizam. A Figura 8 apresenta a modelagem das variáveis linguísticas para o processo de Defuzzyficação. Após a Defuzzyficação é obtido o valor V que será utilizado para a seleção da rota. Na modelagem deste trabalho, a rota de menor valor V dentre as rotas candidatas será a rota escolhida para o atendimento da requisição.

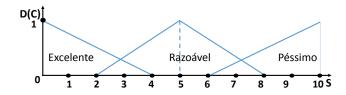


Figura 8. Conjunto de variáveis linguísticas para processo de Defuzzyficação.

Foram utilizadas 5 variáveis linguísticas para caracterizar cada uma das funções de pertinência. Maiores quantidades de variáveis linguísticas associariam maior comple-

xidade ao problema, considerando que um maior intervalo de valores precisaria ser observado. Já a utilização de um conjunto menor de variáveis linguísticas causaria redução impactante no grau de percepção das funções de pertinência.

Com a finalidade de agregar todas as variáveis linguísticas em um único conjunto, é utilizado o método de Mamdani no processo de inferência. A Figura 9 ilustra o funcionamento do método de Mamdani, observando os critérios de *Fragmentação Relativa* e *Quantidade de Slots Ocupados*, com valores de 0.6 e 150 respectivamente, em um total de 400 slots. Inicialmente, é definido o valor de pertinência (eixo y das Figs. 4, 6 e 7) para cada função de pertinência da rota. Nos casos em que uma rota é classificada por mais de uma variável linguística, a variável de menor valor é assumido. Após a decisão do valor para cada função de pertinência, o valor V final escolhido para a rota é o maior dentre os valores resultantes das funções de pertinência na fase anterior.

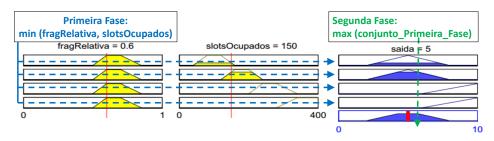


Figura 9. Conjunto de regras *Fuzzy*, com entrada de valores de Fragmentação relativa e Quantidade de Slots Ocupados iguais a 0.6 e 150, respectivamente.

Para o funcionamento da lógica *Fuzzy*, se faz necessário associar uma variável linguística do conjunto de saída a todas as possíveis combinações de variáveis linguísticas das funções de pertinência de entrada, criando assim a *base de conhecimento*. A Tabela 1 apresenta a base de conhecimento utilizada pelo algoritmo proposto.

A última etapa do algoritmo proposto é caracterizada como Defuzzyficação. Existem diferentes técnicas de Defuzzyficação, dentre as quais se considera principalmente o critério de complexidade computacional como métrica de escolha. O método utilizado neste trabalho é o Centroide (ou Centro de Massa) [Pappis and Siettos 2005]. A Equação 3 apresenta o cálculo do Centroide para se encontrar o valor V:

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

na qual S representa a distribuição dos valores de classificação da rota após a Defuzzyficação (eixo x da Fig. 8), e D(S) apresenta o valor obtido para essa classificação, após o processo de inferência. Supondo que, após a aplicação do processo de Inferência, o resultado é 0.51 para a variável linguística excelente, 0.23 para a variável linguística excelente e 0.0 para a variável excelente e excelen

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

Tabela 1. CONJUNTO DE REGRAS DE CONTROLE DO SISTEMA FUZZY.

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

Para os três critérios avaliados, utilizou-se funções de pertinência da forma gaussiana. Experimentos foram realizados com diferentes formatos de função de pertinência, mas para o algoritmo proposto a forma Gaussiana apresentou melhor resultado. Já para o processo de *Defuzzyficação*, utiliza-se uma função de pertinência *triangular*, de menor complexidade, a fim de reduzir o tempo computacional do processo de *Defuzzyficação*.

A aplicação do Sistema Fuzzy viabiliza a avaliação, com maior sensibilidade, das características da rota, pois a aplicação das regras de base permite lidar com a não linearidade, consequência natural da avaliação considerando mais de um fator simultaneamente. Portanto, a justificativa da aplicação do Sistema Fuzzy está relacionada com a possibilidade de moldar as regras de base, permitindo aplicação mais direta de conhecimentos obtidos em estudos prévios.Na seção seguinte, será feita a avaliação de desempenho do algoritmo proposto, analisado comparativamente com DJK, MMRDS e a implementação *Fuzzy* [Ribeiro 2014].

4. Avaliação de Desempenho

A Figura 10 apresenta as topologias USA e NSFNet, utilizadas para realização das simulações. As características e parâmetros utilizados em cada topologia são apresentados na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta as parametrizações comuns as duas topologias.

Para realização das simulações foi utilizada a ferramenta SNetS (*Slice Network Simulator*) [de Sousa Santos 2015]. O SNetS permite a avaliação de desempenho em Redes Ópticas Elásticas sob um amplo conjunto de métricas. A simulação de uma topologia se dá em sua fase operacional e considera o comportamento dinâmico de cenários reais. Além disso, a ferramenta fornece meios para a implementação de novas técnicas de roteamento e alocação de espectro, facilitando o processo de elaboração de novas heurísticas. Informações sobre validação podem ser encontradas em [de Sousa Santos 2015].

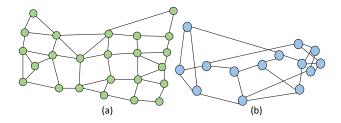


Figura 10. Topologias utilizadas para avaliação: USA(a) e NSFNet(b).

Tabela 2. PARÂMETROS DE TOPOLOGIAS UTILIZADAS NO ESTUDO.

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

Tabela 3. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.

	3 -		
Parâmetros			
Número de Requisições	100,000		
Quantidade de Replicações	10		
Pontos de Carga	7		
Slots por Enlace	400		
Intervalo de Frequência (slot)	12.5 GHz		
Largura de Banda das Requisições	10, 20, 40, 80, 160, 320 Gbps		

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

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

A Figura 11 apresenta os resultados gráficos de Probabilidade de Bloqueio de Circuito para as topologias (a) USA e (b) NSFNet. O algoritmo proposto apresenta melhora de desempenho devido à sua capacidade de escolher rotas menos congestionadas

e com o espectro menos fragmentado. Assim, ao longo da fase operacional da rede, o espectro encontra-se mais organizado durante um maior período de tempo, permitindo o estabelecimento de mais circuitos. Os outros algoritmos não operam de forma ciente de Fragmentação, e apresentam desempenho inferior, alcançando taxas de bloqueio maiores (uma média de 2.76 vezes maior para o Dijkstra, 2.31 para a proposta *Fuzzy* [Ribeiro 2014] e 1.56 para o MMRDS na topologia USA, 31.82 para o Dijkstra, 6.12 para a outra proposta *Fuzzy* [Ribeiro 2014] e 4.04 para o MMRDS na topologia NSFNet, calculada a partir da média encontrada para cada ponto de carga do gráfico).

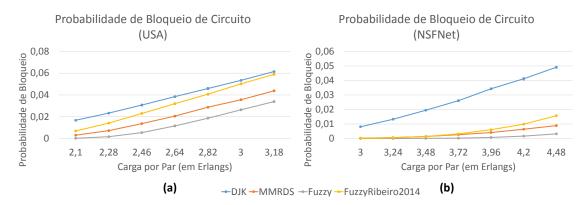


Figura 11. Probabilidade de Bloqueio de Circuito para as topologias: (a) USA e (b) NSFNet.

Durante as simulações também foram avaliadas as taxas de bloqueio para os diferentes tipos de requisição, referente à necessidade de largura de banda de cada uma delas. Para o experimento, foram implementadas requisições que necessitavam de taxas de transmissão iguais a 10, 20, 40, 80, 160 e 320 Gbps, com distribuição uniforme. Por necessitar de grande quantidade de slots, requisições com maiores taxas tem maior probabilidade de sofrer bloqueio. Como consequência, foi observada uma diferença notável entre a Probabilidade de Bloqueio das taxas de maior e menor necessidade de largura de banda. A Figura 12 apresenta a Probabilidade de Bloqueio de Banda para as topologias (a) USA e (b) NSFNet. Os gráficos foram criados a partir do valor de probabilidade de bloqueio por banda observado no último ponto de carga do gráfico da Fig. 11. As taxas de 10 Gbps e 20 Gbps apresentavam valores de bloqueio extremamente baixo em relação aos outros, e foram removidos para proporcionar melhor visualização.

Os valores de Probabilidade de Bloqueio por Banda são componentes da Probabilidade de Bloqueio de Circuito, e pode-se observar o reflexo do comportamento encontrado nos gráficos da Figura 11 quando comparados aos gráficos da Figura 12. Para a topologia NSFNet, observa-se para Probabilidade de Bloqueio de Circuito uma maior proximidade do MMRDS com o *Fuzzy* proposto neste trabalho. Essa mesma proximidade também é observada na probabilidade de Bloqueio por Banda.

Para as topologias USA e NSFNet, a implementação *Fuzzy* proposta apresentou valores de Probabilidade de Bloqueio por Banda inferior aos valores encontrados por DJK, MMRDS e por *Fuzzy* [Ribeiro 2014], considerando as diferentes taxas de larguras de banda avaliadas. Para a topologia USA, a técnica proposta apresenta bloqueio 30,43% inferior ao DJK, 20,87% inferior à proposta *Fuzzy* [Ribeiro 2014] e 13,24% inferior ao MMRDS. Para a topologia NSFNet uma maior variação é observada: a técnica

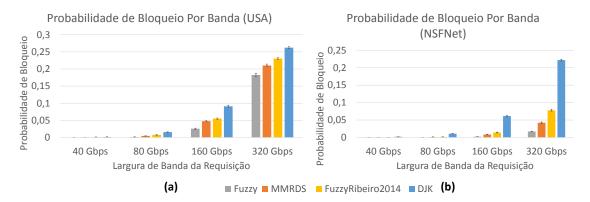


Figura 12. Probabilidade de Bloqueio por Banda para as topologias: (a) USA e (b) NSFNet.

Fuzzy apresenta bloqueio 95,45% inferior ao DJK, 78,03% inferior à proposta Fuzzy [Ribeiro 2014] e 63,81% inferior ao MMRDS. Estes valores foram encontrados para as taxas de bloqueio das requisições de largura de banda iguais a 320 Gbps.

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

5. Conclusões

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

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

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

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

Referências

- Alferness, R. (2012). The evolution of configurable wavelength multiplexed optical networks x2014; a historical perspective. *Proceedings of the IEEE*, 100(5):1023–1034.
- Bhanja, U. and Mishra, D. (2015). Dynamic routing and wavelength assignment using fuzzy logic controller in wdm optical networks. In *Signal Processing and Communication (ICSC)*, 2015 International Conference on, pages 380–385.
- Cai, J.-X., Davidson, C., Lucero, A., Zhang, H., Foursa, D., Sinkin, O., Patterson, W., Pilipetskii, A., Mohs, G., and Bergano, N. S. (2012). 20 tbit/s transmission over 6860 km with sub-nyquist channel spacing. *Lightwave Technology, Journal of*, 30(4):651–657.
- Cugini, F., Paolucci, F., Meloni, G., Berrettini, G., Secondini, M., Fresi, F., Sambo, N., Poti, L., and Castoldi, P. (2013). Push-pull defragmentation without traffic disruption in flexible grid optical networks. *Lightwave Technology, Journal of*, 31(1):125–133.
- de Sousa Santos, I. G. (2015). Alocação de recursos para o estabelecimento de circuitos em redes ópticas wdm e ofdm. *Universidade Federal do Piauí*.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1):269–271.
- dos Reis, J., Raddo, T., Sanches, A., and Borges, B.-H. (2015). Fuzzy logic control for the mitigation of environmental temperature variations in ocdma networks. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, 7(5):480–488.
- Gerstel, O., Jinno, M., Lord, A., and Yoo, S. (2012). Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? *Communications Magazine, IEEE*, 50(2):s12–s20.
- Horota, A. K., Figueiredo, G. B., and da Fonseca, N. L. S. (2014). 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, 32:895–908.

- Iancu, I. (2012). A Mamdani type fuzzy logic controller. INTECH Open Access Publisher.
- Kavian, Y., Rejeb, R., and Strobel, O. (2010). Fuzzy linear programming for capacity planning in optical networks. In *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2010 12th International Conference on, pages 1–4.
- Kretsis, A., Christodoulopoulos, K., Kokkinos, P., and Varvarigos, E. (2014). Planning and operating flexible optical networks: Algorithmic issues and tools. *Communications Magazine*, *IEEE*, 52(1):61–69.
- Moura, P., Da Fonseca, N., and Scaraficci, R. (2014). Fragmentation aware routing and spectrum assignment algorithm. In *Communications (ICC)*, 2014 IEEE International Conference on, pages 1137–1142.
- Pappis, C. P. and Siettos, C. I. (2005). Fuzzy reasoning. In *Search Methodologies*, pages 437–474. Springer.
- Ribeiro, S. R. L. (2014). Roteamento multicritério em redes ópticas elásticas dinâmicas. *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba*.
- Santos, I. G. S., Duraes, G., Giozza, W., Soares, A., and Catu, B. (2012). Um novo algoritmo de roteamento para a escolha da melhor entre as menores rotas. In *SBRC Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*.
- Shakya, S. and Cao, X. (2013). Spectral defragmentation in elastic optical path networks using independent sets. In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, 2013, pages 1–3.
- Tomkos, I., Mukherjee, B., Korotky, S. K., Tucker, R., and Lunardi, L. (2012). The evolution of optical networking [scanning the issue]. *Proceedings of the IEEE*, 100(5):1017–1022.
- Wan, X., Hua, N., and Zheng, X. (2012). Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, 4(8):603–613.
- Wang, R. and Mukherjee, B. (2012). Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks. In *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2012 IEEE, pages 2907–2911.
- Wang, R. and Mukherjee, B. (2014). Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, 11, Part A:83 91.
- Wright, P., Parker, M., and Lord, A. (2015). Minimum- and maximum-entropy routing and spectrum assignment for flexgrid elastic optical networking [invited]. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, 7(1):A66–A72.
- Yin, Y., Zhang, H., Zhang, M., Xia, M., Zhu, Z., Dahlfort, S., and Yoo, S. (2013). Spectral and spatial 2d fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks [invited]. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, 5(10):A100–A106.