

NOVO ALGORITMO BASEADO NO USO DOS SLOTS PARA DEFINIÇÃO DE ROTEAMENTO NAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Enio L.V. Barbosa,¹ Italo B. Brasileiro,¹ Hallison P. Melo,² Raimundo N. Cunha,² Ricardo A. L. Rabelo,¹ Andre C. B. Soares,¹ José V. dos R. Junior¹

¹Universidade Federal do Piauí

²Estácio de Sá – CEUT, Teresina, Piauí
enioluciano@gmail.com

Abstract: In this paper proposed a new algorithm to improve the performance of routing in optical networks. The algorithm seeks the route that uses a metric for the choice of the minor routes paths, using a number of slots and the slots on the links for the choice of the route. The proposed algorithm is compared with the Best algorithm between the Smaller Routes with Decision by Similarity (MMRDS) that chooses the route with more links in common and the algorithm that uses the System Fuzzy that infers a level of relevance of the quality of the route. The proposed algorithm has introduced a fee lower circuit block 4.02% and 8.2% and 73.40% and 39.42%, compared to MMRDS algorithms and fuzzy system [9] for the NSFNET topologies and USES, respectively. In addition, we analyzed other metrics as the probability of blocking by band and spectrum utilization.

Keywords: Elastic Optical Network; Routing Spectrum Assigment - RSA.

Resumo: Neste artigo é proposto um novo algoritmo para melhorar o desempenho do roteamento nas redes ópticas elásticas. O algoritmo busca a rota que utiliza uma métrica para a escolha das rotas de menores caminhos, utilizando a quantidade de slots ocupados e o total de slots nos enlaces para a escolha da rota. O algoritmo aqui proposto é comparado com o algoritmo Melhor entre as Menores Rotas com Decisão por Similaridade (MMRDS) que escolhe a rota com mais enlaces em comum e ao algoritmo que utiliza o Sistema Fuzzy que infere um grau de pertinência na qualidade da rota. O algoritmo proposto apresentou uma taxa de bloqueio de circuito inferior de 4.02% e 8.2% e, 73.40% e 39.42%, comparados aos algoritmos MMRDS e ao sistema fuzzy [9] para as topologias NSFNET e USA, respectivamente. Além disso, foram analisadas outras métricas como a probabilidade de bloqueio por banda e utilização do espectro.

Palavras-chaves: Redes Ópticas Elásticas; Roteamento e Alocação de Espectro.

I. INTRODUÇÃO

Para atender a necessidade de grandes volumes de transmissões de dados, as redes ópticas têm se mostrado uma tecnologia promissora para o futuro das comunicações ópticas de alta velocidade [1]. Nos últimos anos, as soluções de redes ópticas de transporte de dados estudadas e implementadas utilizavam a tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) [2]. Nas redes WDM o espectro é dividido em comprimentos de ondas de tamanho fixo [1] [3], no qual cada requisição pode requerer diferentes larguras de banda, porém devido à utilização de comprimentos de onda de tamanho fixo,

as redes WDM provocam o desperdício do espectro óptico. Para mitigar este problema, a tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) divide o espectro em intervalos de frequência (12.5 GHz) denominados de *slots*, que podem agregar circuitos ópticos de acordo com os requisitos de largura de banda [4][5]. Devido às redes WDM causar subutilização no espectro óptico, as redes OFDM surgiram para mitigar o desperdício do espectro. A Figura 1 apresenta o espectro de uma rede WDM e OFDM.

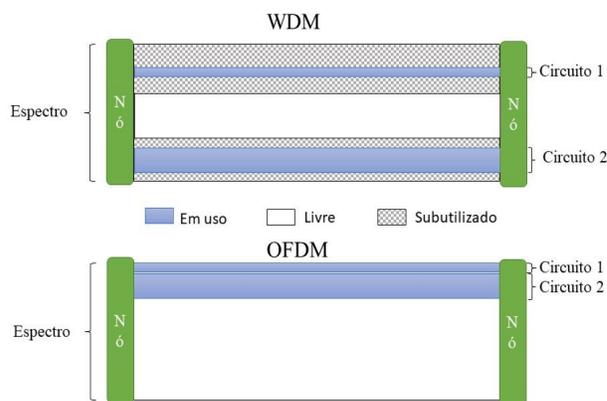


Fig. 1. Espectro de uma rede WDM e OFDM.

Como apresentado na Figura 1, os circuitos são representados por larguras de bandas distintas: o circuito 1 largura de banda de 10 Gbps e o circuito 2 de 80 Gbps. Portanto, a utilização de uma rede OFDM apresenta uma flexibilidade para alocação de largura de banda, em consequência disso, deu-se origem a uma nova geração de redes ópticas de transporte, denominado de redes ópticas elásticas.

Em uma EON os circuitos ópticos podem ter parâmetros de transmissão ajustáveis, como a largura de banda, formato da modulação e espaçamento entre os circuitos [1]. Para estabelecer o circuito é necessário solucionar o problema de Roteamento e Alocação de Espectro (*Routing and Spectrum Assignment -RSA*) [6], no qual escolhe uma rota e a faixa espectral livres, para uma melhor utilização dos recursos da rede.

Para preservar a transmissão das informações nos enlaces é importante atender alguns requisitos do meio óptico denominados de restrições de continuidade e contiguidade espectral [7]. Na restrição de continuidade os slots escolhidos

para alocação devem estar livres em todos os enlaces da rota e para a restrição de contiguidade, os slots devem estar adjacentes para serem alocados em requisições que necessitem mais de dois para serem atendidas. A Figura 2 apresenta exemplos das restrições de continuidade e contiguidade no espectro óptico.

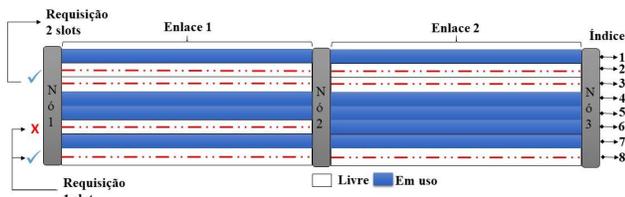


Fig. 2. Restrição de continuidade e contiguidade no espectro óptico.

Ainda da Figura 2, verifica-se que o nó origem e destino são representados pelo nó 1 e 3. A requisição de 1 slot é estabelecida no índice 8, por atender a restrição de continuidade devido o índice 8 do enlace 1 e 2 estarem livres. Porém a requisição de 1 slot no "índice 6" foi bloqueada por não atender a restrição de continuidade. Para a requisição de 2 slots foi estabelecido no índice 2 e 3, por atender as restrições de continuidade e contiguidade. Os índices 2 e 3 estão adjacentes, portanto, podem atender requisições que necessitem de 2 slots, aumentando a largura de banda.

Devido ao dinamismo de alocação e desalocação de circuitos, pequenos intervalos de slots livres surgem entre circuitos ativos na rede. Assim surge outro problema nas redes ópticas elástica, denominado de problema da fragmentação [4]. A Figura 3 ilustra o problema da fragmentação no espectro.

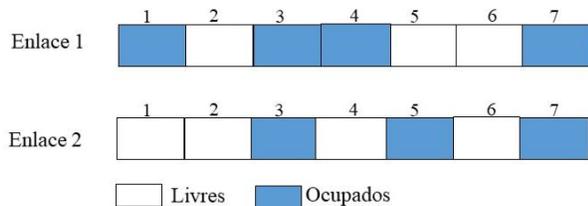


Fig. 3. Problema da Fragmentação do espectro.

Observa-se na Figura 3 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[4], conforme apresentado na Equação (1):

$$Fr(r) = r * ReqSimultaneas(r) / Total \quad (1)$$

onde r representa a quantidade de slots da requisição para ser atendida, $ReqSimultaneas(r)$ é o número de requisições simultâneas de tamanho r que podem ser satisfeitas e $Total$ 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.

Dois importantes componentes das EONs são o *Bandwidth Variable Transponder* (BVT) e o *Vandwidth Variable Cross-connect* (BV-WXC). Os BVTs são utilizados para ajustar a largura de banda através dos ajustes da taxa de bits da transmissão ou formato de modulação [8], além disso utilizam formatos de modulações mais eficientes espectralmente, como por exemplo o formato de modulação 64 - *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) para circuitos ópticos de pequenas distâncias. Para distâncias maiores, são utilizados formatos de modulações mais robustos, porém menos eficientes em termos de alocação espectral, bem como os formatos de modulação *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) ou *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) [1].

Portanto, este trabalho tem como objetivo propor um novo algoritmo a fim de obter um melhor roteamento, comparando-o com um algoritmo MMRDS e o algoritmo que utiliza o Sistema *Fuzzy* [9] para a escolha da melhor rota, evitando bloqueio de requisições.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 é apresentada uma breve introdução das redes ópticas elásticas; a Seção 3 é apresentado os trabalhos relacionados; a Seção 4 é apresentada o algoritmo que utiliza o sistema *Fuzzy*; a Seção 5 é apresentada os formatos de modulações nas EONs; a Seção 6 é apontado a modelagem do novo algoritmo de roteamento; a Seção 7 apresenta os resultados; seguido da conclusão.

II. REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

A principal tecnologia que está sendo adotado para compor o núcleo da infraestrutura da rede são as redes ópticas elásticas, devido a sua alta capacidade de transmissão de dados e imunidade a interferências eletromagnéticas [10][11]. Esse tipo de rede necessita converter em cada nó da rede, os pacotes de dados do domínio óptico para o domínio eletrônico, logo em seguida a informação era processada e novamente convertida para o domínio óptico para ser conduzida, mais conhecida como conversão Óptica-Eletrônica-Óptica (O-E-O).

Os transponders são responsáveis por fazer essa conversão, no qual tem a função de regenerar o sinal óptico [12]. Estas redes são caracterizadas de redes ópticas opacas [13] por fazer essa conversão O-E-O. A qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) nas redes ópticas opacas são sempre altas, porém os custos de implantação e manutenção dessas redes são altos. Devido ao alto custo e a necessidade de

diminuir o atraso dessas conversões, surgem as redes ópticas transparentes.

Nesta rede, o sinal é transmitido completamente no domínio óptico, de um nó origem ao nó destino, sem sofrer nenhuma conversão O-E-O. Isso foi possível devido aos dispositivos ópticos como os amplificadores ópticos à fibra dopada com érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier* – EDFA), multiplexadores/demultiplexadores ópticos e comutadores ópticos (*Optical Cross-Connect* - OXC) [14], no qual permitiram uma redução no custo de implantação e manutenção comparado com as redes ópticas opacas. Para combinação das redes ópticas opacas e transparentes, surgiram as redes translúcidas, no qual permite fazer conversão em alguns nós da rede de forma estratégica. Neste contexto, para o seguinte trabalho, foi utilizada a rede óptica transparente, no qual não há conversão de O-E-O e nem regeneração do sinal óptico.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

Com o grande crescimento na demanda por largura de banda, o sistema de comunicação utiliza fibra óptica como meio de transmissão de dados, pois é capaz de oferecer uma escalabilidade para atender a necessidade de altas taxas de transmissões [15].

A utilização eficiente do espectro tem sido estudada para solucionar o problema RSA nas redes ópticas elásticas assim, se faz necessário investigar métodos eficientes para a resolução do problema de roteamento e alocação de espectro principalmente para grandes redes, afim de aumentar a flexibilidade e eficiência espectral.

A grande maioria dos trabalhos na literatura utilizam algoritmos de menor caminho para o roteamento, como o algoritmo Dijkstra [16]. Porém, entre cada par origem destino de uma topologia pode existir várias rotas de menores caminhos. Neste contexto o problema da escolha da Melhor Combinação entre as M Combinações de Menores Caminhos (3MC) visa à escolha da combinação de rotas de menor caminho que minimize a probabilidade de bloqueio em uma determinada topologia. O algoritmo Melhor Entre as Menores Rotas com Decisão por Similaridade (MMRDS) para redes ópticas transparentes tem como objetivo solucionar o problema 3MC [17].

Os algoritmos que investem para solução do problema RSA podem ser classificados em dois tipos: *integrados e sequenciais*. Os algoritmos sequenciais são subdivididos em duas categorias: algoritmos de roteamento [18] ou algoritmos de alocação de espectro [19]. Os algoritmos integrados buscam resolver o problema RSA em uma única etapa, realizando a escolha da rota e alocação espectral simultaneamente para o estabelecimento do circuito [20]. O algoritmo proposto neste trabalho para o problema RSA é classificado como algoritmo sequencial.

Nas EON é observado outro problema caracterizado como problema de Fragmentação [21]. Ao estabelecer circuitos com diferentes larguras de banda, surgem pequenas lacunas de slots livres entre os slots alocados, no qual pode evoluir de forma

que deixe de atender as requisições. Os autores Cugini, F., et al em [22] apresentaram uma técnica de desfragmentação no qual ocorre o desligamento de circuitos por alguns segundos, para a realocação dos mesmos no espectro óptico.

Os autores Brasileiro, Italo B., et al em [9] utilizaram a lógica Fuzzy para solucionar problemas das Redes Ópticas, onde foi proposto um novo algoritmo baseado em Sistemas Fuzzy para solucionar o problema de roteamento em Redes Ópticas Elásticas. O algoritmo infere um grau de pertinência na qualidade da rota, adotando como métricas a fragmentação relativa que verifica o quanto estar fragmentado o espectro óptico; a quantidade de slots ocupados que certifica a quantidade de slots que estão sendo utilizados no espectro óptico e o índice de slots que examina o slot mais próximo do início do espectro óptico, a fim de buscar a melhor rota para o estabelecimento de circuitos. Os mesmos autores concluíram que a utilização do sistema Fuzzy é eficaz para solucionar o problema RSA.

Em [23] foi utilizado um Sistema Fuzzy para a definição de uma técnica de roteamento que avaliou a qualidade de slots ocupados e o tamanho dos enlaces, concluindo que na abordagem Fuzzy, tem um impacto na eficiência do algoritmo. Portanto, neste trabalho busca solucionar o problema de roteamento nas EON a fim de melhorar a qualidade de transmissão da rede. O algoritmo aqui proposto é comparado com a proposta desenvolvida em [9], utilizando os mesmos parâmetros de simulação para ser comparado.

IV. ALGORITMO UTILIZANDO O SISTEMA FUZZY

Para comparar o algoritmo aqui proposto neste trabalho, foi utilizado um algoritmo que utiliza um Sistema Fuzzy para escolher a melhor rota para atender a requisição [9]. 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 que possui mais recursos da rede para o estabelecimento o circuito óptico.

Neste contexto, 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 [24]. A Figura 4 apresenta o 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 que representa a decisão a ser tomada, quanto mais informações do domínio, mais preciso será o resultado.

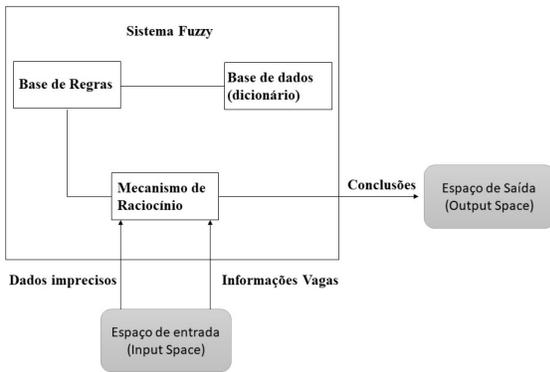


Fig. 4. Componentes de um Sistema Fuzzy.

Para obter o grau de pertinência das variáveis de 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 algoritmo proposto em [9] adotando o Sistema Fuzzy utiliza três métricas para a escolha da rota: a fragmentação relativa e quantidade de slots ocupados e o índice do primeiro slot. 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. A Figura 5 apresenta um fluxograma da execução do algoritmo utilizando o Sistema Fuzzy.

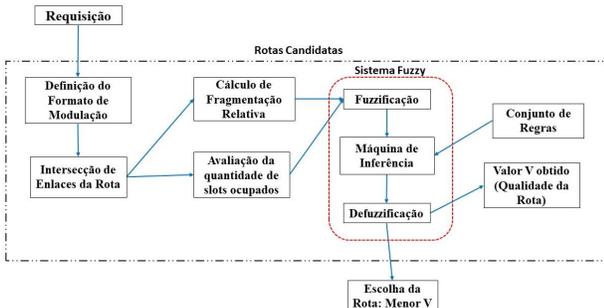


Fig. 5. Funcionamento do algoritmo utilizando o Sistema Fuzzy.

As requisições chegam de forma dinâmica entre todos os pares de nós de origem e destino da rede e as rotas candidatas (rotas de menores caminhos) são avaliadas para todos os pares de

nós origem e destino da rede. Após isso, as rotas de menores caminhos passam pelo Sistema Fuzzy a fim de encontrar um valor V , no qual é encontrado quando passa pelo processo de fuzzificação, máquina de inferência e defuzzificação, no qual será abordado mais adiante. O sistema Fuzzy infere um grau de pertinência nas variáveis de entrada que são atribuídos para os termos linguísticos para serem utilizados na base de regras, no qual é realizado a modelagem da informação das variáveis de entrada com os conjuntos Fuzzy, em que se empregam os termos linguísticos.

Para a modelagem dos termos linguísticos, é realizado a classificação de cada variável encontrada, é feito o processo de defuzzificação para obter uma saída numérica (valor V), modificando o estado da variável de saída Fuzzy para um valor numérico.

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 6 representa a função de pertinência da fragmentação relativa.

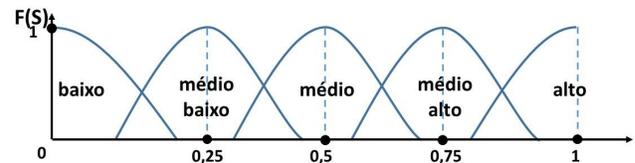


Fig. 6. Função de pertinência para a primeira entrada do Sistema Fuzzy na fuzzificação.

O segundo critério para a escolha da melhor rota foi a quantidade de slots ocupados, considerando 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 7 representa a função de pertinência da quantidade de slots ocupados no processo de fuzzificação.

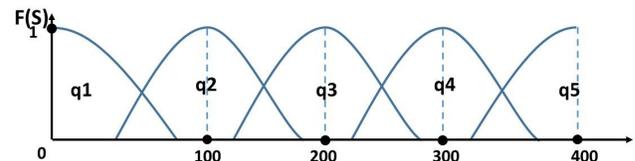


Fig. 7. Função de pertinência para a segunda entrada do Sistema Fuzzy da quantidade de slots ocupados.

O terceiro critério que os autores em [9] utilizaram foi o índice do slot inicial do primeiro intervalo espectral que possa ser alocável. Esse critério beneficia a escolha da rota mais próxima do início espectral, resultando em melhor organização no espectro. A Figura 8 representa a função de pertinência do índice do primeiro slot.

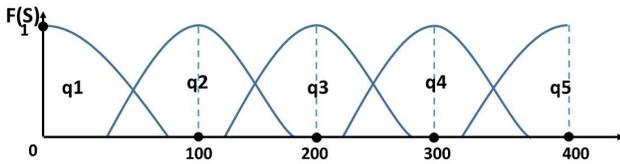


Fig. 8. Função de pertinência para a terceira entrada do Sistema Fuzzy do índice do slot inicial.

No processo de defuzzificação os autores Brasileiro, I. B. et al., em[9] adotaram três termos linguísticos, descritos como: excelente, razoável 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 9 apresenta a função de pertinência triangular para o processo de defuzzificação.

Para isso, os autores utilizaram a política de alocação *firstfit*, no qual os circuitos são alocados no índice mais próximo do início do espectro, ou seja, ordena os slots de frequência e conserva uma lista com os slots disponíveis, no qual ao estabelecer um circuito óptico, busca escolher os *slots* com o menor os menores índices presentes na lista. Para esses três critérios, formou-se a base de regras viabilizando, com maior percepção, das características da rota, afim de escolher a rota que possui uma melhor qualidade para estabelecimento do circuito óptico.

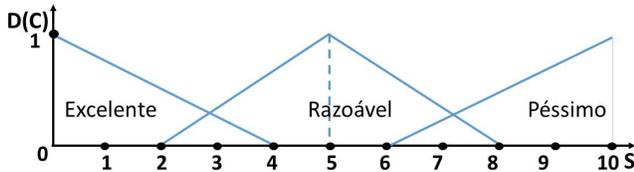


Fig. 9. Função de pertinência para a saída do Sistema Fuzzy.

Para compor a base de regras, foram utilizadas informações resultantes de diversas simulações de rede ao considerar os valores da probabilidade de bloqueio por circuito em relação as métricas fragmentação relativa, quantidade de slots ocupados e indicie do slot inicial. A Figura 10 apresenta a base de regras que os autores em [9] utilizaram.

A quantidade de regras da base de regras se dá por possuir 3 variáveis de entrada, nos quais são as métricas: fragmentação relativa, quantidade de slots ocupados e indicie do slot inicial e por possuir 5 termos linguísticos no processo de fuzzificação, resultando em 125 regras.

Já o algoritmo aqui proposto neste trabalho, no qual será detalhado mais adiante, diferencia no quesito de escolher a rota por se basear no uso de *slots*, sem utilizar outras métricas para a escolha da rota [9].

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 alto & q1	excelente	excelente	excelente	razoável	razoável
médio alto & q2	excelente	excelente	razoável	razoável	razoável
médio alto & q3	excelente	razoável	razoável	razoável	razoável
médio alto & q4	razoável	razoável	razoável	razoável	péssimo
médio alto & 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	razoável	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

Fig. 10. Base de Regras do sistema Fuzzy utilizado.

V. FORMATO DE MODULAÇÃO

O formato de modulação do sinal óptico pode ser modificado através da manipulação da amplitude e da fase da onda portadora. O ajustamento de diferentes características aplicadas ao sinal óptico torna viável a transmissão de maior quantidade de informação [25]. É importante mencionar que os formatos de modulação com elevado desempenho (altas taxas de bits por símbolo apresentam sinal óptico de maior complexidade, por transmitir mais bits por símbolo). Neste contexto, os níveis de modulação com altas taxas de bits por símbolo são mais propensos a falhas provenientes do meio físico na medida em que se aumenta a distância da rota.

Portanto, para a escolha do formato de modulação a ser utilizado para o estabelecimento de um circuito, depende da distância da rota escolhida. Cada formato de modulação pode transmitir uma quantidade de bits por símbolo respeitando a qualidade do sinal óptico solicitada pela rede, além de sofrer impacto na definição da quantidade de slots requeridos pela requisição [26]. A modulação é uma forma de codificar as informais digitais em sinais que representam os bits, utilizando a fase, amplitude ou frequência de onda [27]. As redes ópticas elásticas possibilitam diferentes formatos de modulações que sejam utilizados por cada circuito.

De acordo com o formato de modulação selecionado, a rede poderá transmitir pouco ou muito bit por símbolo. A modulação que transmite menos bits por símbolos possui uma distância de propagação maior do que as que transmitem mais bits por símbolos. A Figura 10 apresenta alguns formatos de modulações.

Como apresentado na Figura 11(a), apresenta os formatos de modulações: Binary Physical (BPSK), Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK), 8-Quadrature Amplitude Modulation

QAM e 16-QAM com uma representação da quantidade de bits por símbolo de cada modulação.

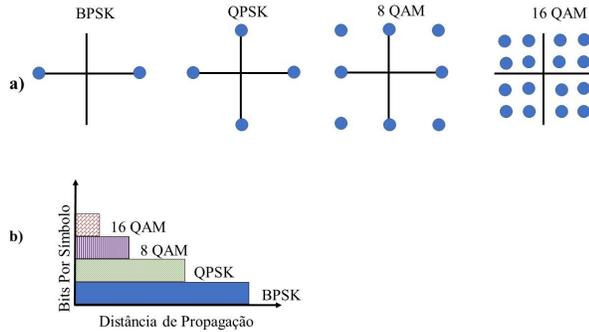


Fig. 11. Formatos de Modulação : (a) Representação de bits por símbolo e (b) Distância de propagação de cada formato de modulação.

Já na Figura 11(b) apresenta os formatos de modulação com suas respectivas distâncias de propagação, no qual quanto mais símbolos transmitidos por bits, menor será a distância de propagação do formato de modulação, sendo assim inversamente proporcionais. Os formatos de modulações que transmitem mais bits por símbolo tendem a serem mais complexos e os formatos mais robustos, tendem a serem os que transmitem menos bits por símbolo.

VI. NOVO ALGORITMO DE ROTEAMENTO

O algoritmo proposto ataca o problema RSA a fim de escolher a rota com mais recursos disponíveis para o estabelecimento do circuito. Neste contexto, o algoritmo funciona da seguinte forma: calcula as rotas de menores caminhos (rotas candidatas) para todos os pares de nós da rede. Quando surgir uma requisição, a escolha da rota é feita por meio da avaliação das rotas candidatas que possuem mais de um menor caminho.

Após a escolha da rota é definido o formato da modulação e verifica se a rota possui a quantidade de slots necessários para atender a requisição. Na Figura 12 é apresentado o fluxograma da execução do algoritmo proposto.

Para a escolha da rota, é feito um cálculo baseado no uso dos slots para verificar dentre as rotas candidatas a que possui o menor valor (M_v), conforme a Equação (2).

A variável $QtdOcupados(RotaAtual)$ é definida como a quantidade de slots ocupados na rota atual e o $Total$ apresenta a quantidade total de slots no espectro óptico.

$$M_v = QtdOcupados(RotaAtual) / total \quad (2)$$

Conforme ilustrado na Figura 12, ao definir o nó origem/destino representado pelos números 1 e 4, são escolhidas as rotas candidatas, ou seja, as que possuem

menores caminhos (Rota 1, Rota 2). Para cada rota dentre as rotas candidatas é feito o cálculo utilizando a Equação (1) e para escolha da rota é considerado o valor M_v de cada uma e a que possui o menor valor M_v será a rota estabelecida. No caso da Figura 4, a rota 1 é escolhida por possuir $M_v = 0.0182$. O algoritmo proposto recebe como parâmetros as rotas do par e a requisição. A Figura 13 apresenta o pseudocódigo do algoritmo.

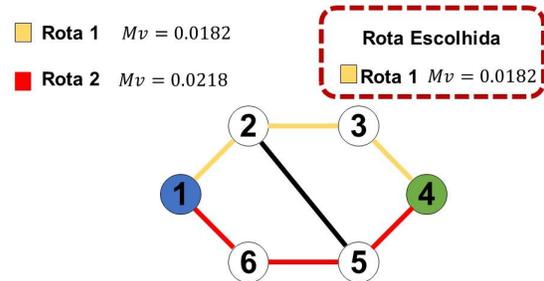


Fig. 12. Restrição de continuidade e contiguidade no espectro óptico.

```

1 Algoritmo (RotasPar r, Requisição request)
2   Var = 1.0;           // Define o valor máximo para a variável
3   Para cada rota candidata {
4     mod = SeleccionaModulação // verifica o formato de modulação
5     Mv = quantidadeSlotsOcupados(RotaAtual) / Total;
6     Se (Var > Mv) { // Verifica se o Mv é menor que Var;
7       Var = Mv;
8       rotaEscolhida = rotaAtual;
9     }
10  }
11  retorna rotaEscolhida;

```

Fig. 13. Pseudocódigo do algoritmo proposto.

O algoritmo funciona da seguinte forma: ao receber as requisições de forma dinâmica, são definidos as rotas do par (o,d), no qual "o" representa origem e "d" destino. Na linha 2 é criada uma variável para armazenar um valor, no qual inicialmente é 1.

Esta variável irá guardar o valor do M_v anterior e compara-lo com o M_v atual. No laço (linhas 3 a 8), verifica as rotas candidatas (rotas de menores caminhos), seleciona o formato de modulação adequado, buscando sempre aquele formato mais complexo (mais bits transmitidos por símbolo), verifica a quantidade de slots ocupados na rota atual e divide pelo total de slots no espectro óptico, Eq.(1), para encontrar o valor de M_v . Após o cálculo do M_v , é verificado se M_v (atual) é menor do que o M_v (anterior), caso seja verdade, a variável "var" (linha 7) recebe o valor de M_v e escolhe a rota escolhida e se torna a rota atual. (linha 8). Após verificar todos os conjuntos das rotas candidatas, retorna a rota escolhida (linha 11) para o estabelecimento do circuito. (1) (1)

VII. RESULTADOS

As simulações foram feitas utilizando a ferramenta SnetS (*Slice Network Simulator*) [28]. Foram utilizadas as topologias NSFNET e USA, conforme a Figura 14.

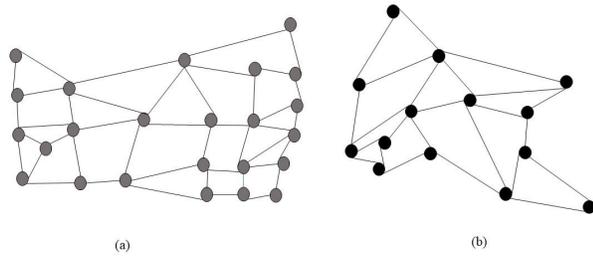


Fig. 14. Topologias utilizadas: (a) USA e (b) NSFNET.

Para a realização das simulações foram utilizados alguns parâmetros, como especificados nas Tabelas 1 e 2, a fim de comparar o algoritmo proposto no mesmo cenário da proposta Fuzzy apresentando em [9].

O algoritmo proposto utiliza a quantidade de slots ocupados e a quantidade total de slots no espectro com o propósito de escolher a melhor rota para atender uma determinada requisição, além disso utiliza a política de alocação espectral *first fit*, no qual tenta alocar os slots mais perto do início do espectro.

TABELA I. PARÂMETROS DA TOPOLOGIA

Parâmetros da Topologia		
Parâmetros	USA	NSFNET
Número de Nós	24	14
Número de enlaces	43	22
Carga inicial por nó (Erlangs)	2.1	3.0
Incremento da carga (Erlangs)	0.36	0.24

TABELA II. Parâmetros utilizados na simulação

Parâmetros para a simulação	
Parâmetros	USA
Número de Requisições	100,000
Quantidade de Replicações	10
CargPontos de carga	7
Quantidade de slot	400
Intervalo de Frequência	12.5 GHz
Larguras de Banda	10, 20, 40, 80, 160, 320 Gbps

Portanto, o algoritmo apresenta uma melhora de desempenho na escolha da rota para estabelecer mais circuitos. Durante as simulações foram avaliadas as taxas de bloqueios

dos algoritmos MMRDS, algoritmo que utiliza o Sistema Fuzzy [9] e do algoritmo aqui proposto para as topologias NSFNET e USA. A Figura 15 apresenta os resultados da probabilidade de bloqueio comparados o desempenho destes três algoritmos para as topologias NSFNET.

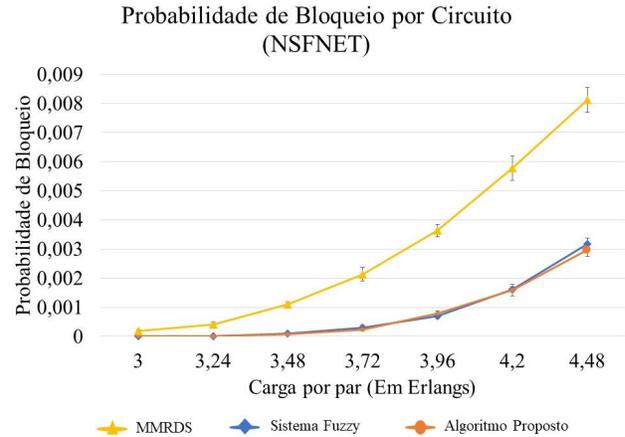


Fig.15. Probabilidade de bloqueio por circuito na topologia NSFNET.

O algoritmo proposto apresentou um bloqueio inferior quando comparado ao Sistema Fuzzy [9] e MMRDS. Foram feitos os cálculos da média dos sete pontos de carga, a fim de analisar o desempenho do algoritmo proposto. Neste contexto, observa-se que o algoritmo proposto obteve uma taxa de bloqueio inferior de 4,02% e 73,40% quando comparado ao sistema fuzzy [9] e o algoritmo MMRDS, respectivamente.

Já na Figura 16, observa-se que o algoritmo aqui proposto apresentou um bloqueio inferior comparado ao Sistema Fuzzy [9] e MMRDS. O algoritmo aqui proposto obteve uma taxa de bloqueio de 8,2% quando comparado ao sistema fuzzy [9] e 39,42% quando comparado ao algoritmo MMRDS, resultando em uma menor quantidade de requisições bloqueadas, evidentemente um desempenho superior para a topologia USA.

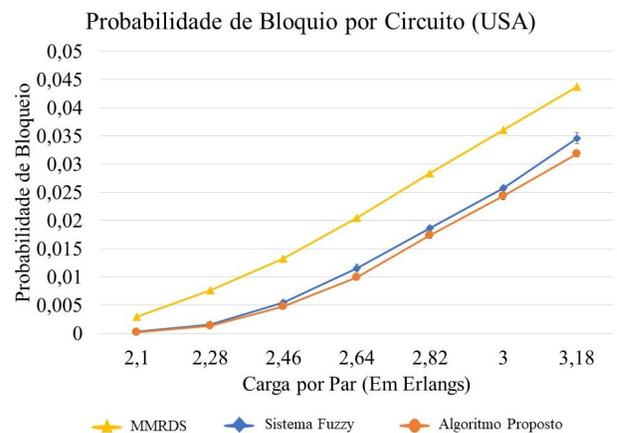


Fig. 16. Probabilidade de Bloqueio na topologia USA.

Além disso, utilizou-se outra métrica para avaliação de desempenho do algoritmo proposto, caracterizada como

probabilidade de bloqueio por largura de banda, no qual representa a quantidade de dados que são bloqueados por largura de banda. Na Figura 16, apresenta a probabilidade de bloqueio por banda para a topologia NSFNET.

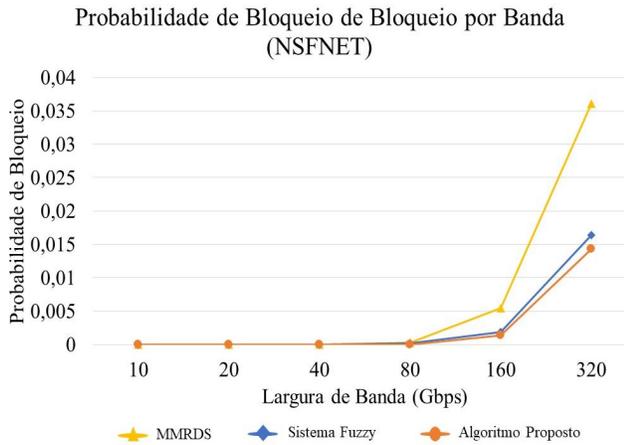


Fig. 17. Probabilidade de bloqueio por banda na topologia NSFNET.

Observa-se da Figura 16 que o algoritmo proposto apresentou um bloqueio de banda inferior quando comparado ao sistema fuzzy e o algoritmo MMRDS, no qual atende mais requisições por largura de banda do que os outros algoritmos. O algoritmo aqui proposto apresentou uma taxa de bloqueio por banda inferior de 15.06% e 67.63% quando comparado ao sistema fuzzy e o algoritmo MMRDS, respectivamente.

Já na Figura 17 é apresentada a taxa de bloqueio por banda para a topologia USA. O algoritmo proposto apresenta uma taxa de bloqueio inferior por banda de 9.36% inferior quando comparado ao sistema Fuzzy [9] e 27.79% inferior ao algoritmo MMRDS, resultando em um desempenho superior a esses dois algoritmos da literatura.

Outra métrica utilizada para avaliação foi utilização do espectro óptico, no qual utilizou-se ambas topologias já mencionadas neste trabalho. A Figura 18 apresenta a utilização do espectro para a topologia NSFNET.

Como observado na Figura 19, a métrica de utilização do espectro óptico verifica o quanto de espectro é utilizado, ou seja, aproveitando o máximo dos recursos da rede, portanto o algoritmo proposto apresentou um maior proveito quando comparado aos algoritmos avaliados.

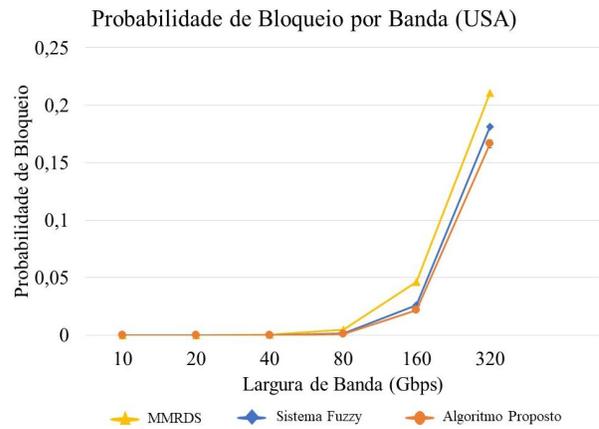


Fig.18. Probabilidade de Bloqueio na topologia USA.

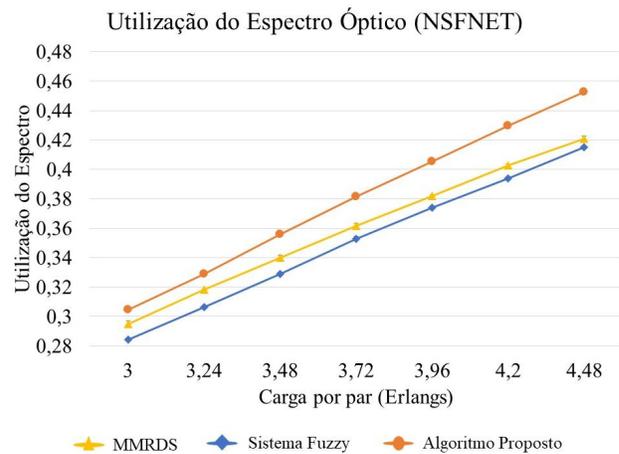


Fig. 19. Utilização do Espectro para a topologia NSFNET.

Portanto, ao alocar mais recursos, permitindo uma maior quantidade de circuitos estabelecidos, o algoritmo apresenta uma maior utilização do espectro, em termos quantitativos o algoritmo proposto apresenta uma utilização do espectro óptico superior de 5.49% e 8.26% quando comparado aos algoritmos MMRDS e Fuzzy [9], respectivamente.

A Figura 20 apresenta a utilização do espectro óptico para a topologia USA. Com a mudança da topologia, aumentando a quantidade de enlaces e nós na rede, o algoritmo ainda assim apresentou uma maior utilização do espectro óptico. Como pode ser observado nas métricas de probabilidade de bloqueio por circuito e por banda, o algoritmo mostrou uma taxa de bloqueio inferior em ambas as métricas, acarretando em maior quantidade de circuitos estabelecidos e evidentemente um maior proveito do espectro óptico. Neste contexto, o algoritmo proposto apresentou uma utilização do espectro superior de 3.11% e 1.29% para os algoritmos MMRDS e Fuzzy [9].

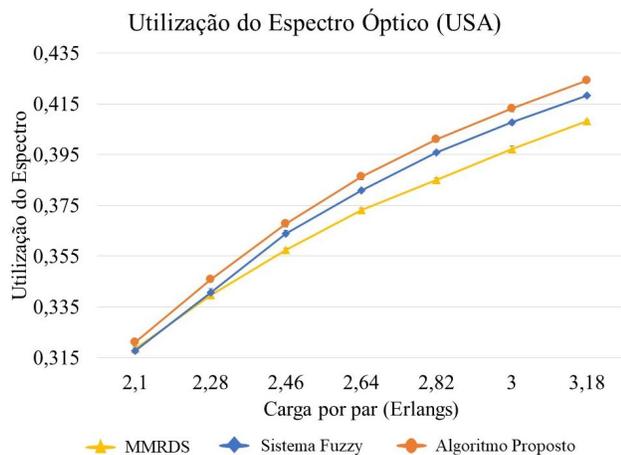


Fig. 20. Utilização do Espectro para a topologia NSFNET.

VIII. CONCLUSÃO

Devido a crescente demanda por banda, é necessária uma rede que tenha uma estrutura que possa suportar a esse crescente tráfego. Assim, destacam-se as redes ópticas elásticas que utilizam a luz como meio de transmissão de dados por meio de diferentes intervalos de frequência, denominados slots. Esses slots podem ser agregados para atender a diferentes larguras de banda.

Para o estabelecimento de circuitos é necessário atender as restrições de continuidade e contiguidade, no qual essas restrições resultam em um problema nas redes ópticas elásticas, denominado de problema da fragmentação. Este problema consiste em pequenos intervalos livres no espectro óptico, de forma que requisições com maiores larguras de banda não sejam atendidas, resultando em bloqueios.

Com o objetivo de reduzir o bloqueio das requisições por circuito e por banda, o algoritmo de roteamento proposto neste trabalho considera a quantidade de slots ocupados e a quantidade total de slots como métrica, no qual a escolha da rota é feita com o menor valor (Mv) dentre as rotas candidatas. Além disso foi adotado uma outra métrica afim de avaliar o quanto de espectro óptico o algoritmo aproveita.

As simulações realizadas avaliaram o desempenho do algoritmo proposto comparado aos algoritmos MMRDS e Sistema Fuzzy [9] no qual foi possível observar que o algoritmo proposto apresentou um melhor desempenho por apresentar uma taxa de bloqueio inferior na topologia NSFNET de 4.02% e 73,40% para o Fuzzy [9] e MMRDS, respectivamente. Já para a topologia USA, apresentou uma taxa de bloqueio inferior de 8.2% e 39.42% para o Sistema Fuzzy [9] e MMRDS, resultando em mais circuitos estabelecidos. Além disso, apresentou uma maior utilização do espectro óptico e uma taxa de bloqueio por banda inferior de 15.06% e 67.63% do Sistema Fuzzy [9] e MMRDS para a topologia NSFNET, enquanto que na topologia USA apresentou uma taxa de bloqueio por banda inferior de 9.36% quando comparado ao sistema Fuzzy [9] e uma taxa inferior de 27.79% comparando-o com o algoritmo MMRDS. Constatou-se que o algoritmo proposto apresenta ter um melhor

desempenho na rede assegurando o estabelecimento de maior número de circuitos e usufruindo mais o espectro óptico.

Portanto, o algoritmo aqui proposto se torna eficiente para solucionar o problema de roteamento e alocação de espectro no cenário das redes ópticas elásticas no qual se torna viável para utilizar para aplicação em cenários reais.

REFERÊNCIAS

- [1] Chatterjee, Bijoy Chand, Nityananda Sarma, and Eiji Oki. "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17.3 (2015): 1776-1800.
- [2] Nath, Ira, Monish Chatterjee, and Uma Bhattacharya. "A survey on regenerator placement problem in translucent optical network." *Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA), 2014 International Conference on.* IEEE, 2014.
- [3] Rahbar, Akbar Ghaffarpour. "Review of Dynamic Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment Techniques in All-Optical Wavelength-Routed Networks." *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 14.4 (2012): 1065-1089.
- [4] Horota, Andre, Gustavo B. Figueiredo, and Nelson da Fonseca. "Routing and spectrum assignment algorithm with fragmentation minimization in elastic optical networks." *Computer Networks and Distributed Systems (SBRC), 2014 Brazilian Symposium on.* IEEE, 2014.
- [5] Moura, Pedro Mesquita. "Roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas." (2015), in Campinas, SP.
- [6] Talebi, Sahar, et al. "Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey." *Optical Switching and Networking* 13 (2014): 34-48.
- [7] Wang, Rui, and Biswanath Mukherjee. "Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks." *Optical Switching and Networking* 11 (2014): 83-91.
- [8] Fontinele, Alexandre, et al. "Um Novo Algoritmo RSA Ciente de Imperfeições de Camada Física para Redes Ópticas Elásticas." *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (2016).
- [9] Brasileiro, Ítalo Barbosa, José Valdemir dos Reis Júnior, and André Castelo Branco Soares. "Nova Solução para o Problema de Roteamento em Redes Ópticas Elásticas utilizando Algoritmo Ciente de Fragmentação Baseado em Sistemas Fuzzy."
- [10] Giozza, W.; Conforti, E.; Waldman, H. *Fibras Ópticas – Tecnologia e Projeto de Sistemas*. 1. Ed. [S.l.]: Makron, McGraw-Hill, 1991. Citado na página 5.
- [11] Amazonas, J. R. de A. *Projeto de Sistemas de Comunicações Ópticas*. 1 ed. [S.l.]: Manole, 2005. Citado na página 5.
- [12] Shen, Gangxiang, and Rodney S. Tucker. "Translucent optical networks: the way forward [Topics in Optical Communications]." *IEEE Communications Magazine* 45.2 (2007): 48-54.
- [13] Soares, A. *Uma Metodologia para Planejamento de Redes de Circuitos Ópticos Transparentes com QoS no Nível do Usuário*. Tese (Doutorado) – Cin-UFPE, 2009.
- [14] Ramaswami, R.; Sivarajan, K.; Sasaki, G. *Optical networks: a practical perspective*. 3rd. Ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009. ISBN 978-0-12-374092-2.
- [15] Gerstel, Ori, et al. "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?." *IEEE Communications Magazine* 50.2 (2012).
- [16] Dijkstra, Edsger W. "A note on two problems in connexion with graphs." *Numerische mathematik* 1.1 (1959): 269-271.
- [17] Santos, Iallen Gábio S., et al. "Um novo Algoritmo de Roteamento para a Escolha da Melhor Entre as Menores Rotas." *31º Simpósio Bras. Redes Comput. e Sist. Distrib.-SBRC 2013* (2013): 121-134.
- [18] Wan, Xin, Nan Hua, and Xiaoping Zheng. "Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks." *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 4.8 (2012): 603-613.

- [19] Wright, Paul, Michael C. Parker, and Andrew Lord. "Minimum-and maximum-entropy routing and spectrum assignment for flexgrid elastic optical networking." *Journal of Optical Communications and Networking* 7.1 (2015): A66-A72.
- [20] Wang, Rui, and Biswanath Mukherjee. "Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks." *Optical Switching and Networking* 11 (2014): 83-91.
- [21] Shakya, Sunny, and Xiaojun Cao. "Spectral defragmentation in elastic optical path networks using independent sets." *National Fiber Optic Engineers Conference*. Optical Society of America, 2013.
- [22] Cugini, F., et al. "Push-pull defragmentation without traffic disruption in flexible grid optical networks." *Journal of Lightwave Technology* 31.1 (2013): 125-133.
- [23] Ribeiro, Sérgio Ricardo Lima. *Roteamento Multicritério em Redes Ópticas Elásticas Dinâmicas*. MS thesis, Instituto Federal da Paraíba. 2014.
- [24] Marro, Alessandro Assi, et al. "Lógica fuzzy: conceitos e aplicações." Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) (2010).
- [25] Yang, Yitong, Weigang Hou, and Lei Guo. "Spectrum and energy-efficient routing algorithm in survivable and elastic optical network." *Optical Internet 2014 (COIN)*, 2014 12th International Conference on. IEEE, 2014.
- [26] Lacerda Jr., Jurandir Cavalcante I. "Sobrevivência em Redes Ópticas Elásticas Considerando Imperfeições de Camda Física." Universidade Federal do Piauí, Teresina (2017).
- [27] Tanenbaum, A. S.; Wetherall, D. J. *Redes de Computadores*. 5th. Ed. [S.l.]: Pearson Education – Br,2011. Citado na página 7.
- [28] Santos, I. "Alocação de Recursos para o Estabelecimento de Circuitos em Redes Ópticas WDM e OFDM." Universidade Federal do Piauí, Teresina(2015).