

Estratégias de RSA Utilizando Split Spectrum e o algoritmo MSCL em EONs

Clayton J. N. Lira, R.C. Almeida Jr e Daniel A. R. Chaves

Resumo—As Redes Ópticas Elásticas têm sido o alvo de estudos recentes devido à sua habilidade de transmitir informação em diferentes larguras de banda, adaptadas à demanda. Ao se apresentar como uma opção de rede bastante promissora, técnicas e heurísticas foram então apresentadas para explorar seus benefícios e encontrar soluções para seus problemas, incluindo o problema de roteamento e alocação de espectro. Este trabalho aborda a utilização da técnica *Split Spectrum* (SS) aplicada no processo de roteamento e principalmente combinada com o algoritmo de atribuição de espectro denominado *Min Slot-Continuity Capacity Loss* (MSCL). É mostrado que, combinando diferentes formas de divisão do espectro com a alocação de espectro que gera a menor perda de capacidade, pode-se encontrar uma técnica eficiente que pode ser aplicada às EONs e que fornece melhores resultados do que a atribuição de espectro tradicional e a forma clássica de divisão do espectro.

Palavras-Chave—*Split Spectrum*, MSCL, Otimização

Abstract—Elastic optical networks (EONs) have been target of recent studies because of their ability to transmit data with different bandwidths, adapted to the demand. As a promising approach to implement optical network, techniques and heuristics have been presented for EON in order to explore their benefits and find solutions for their problems, including the Routing and Spectrum Assignment problem. In this work we propose the utilization of the Split Spectrum (SS) technique applied in the routing process, combined with the spectrum assignment algorithm named Min Slot-Continuity Capacity Loss (MSCL). It is shown that by combining different forms of spectrum division with the spectrum assignment that generates the least capacity loss, we can find an efficient technique that may be applied to EONs and provides better results than traditional spectrum assignment and the classic form of spectrum division.

Keywords—Split Spectrum, MSCL, Optimization

I. INTRODUÇÃO

A utilização de aplicações avançadas e atuais em comunicações, como serviços de armazenamento em nuvem, videoconferência e serviços de streaming entre outros, fizeram com que o tráfego crescesse exponencialmente. Para acompanhar esse crescimento e complexidade, é necessário aumentar a capacidade de transporte das redes ópticas atuais. As redes ópticas elásticas (EON, do inglês *Elastic Optical Networks*) se tornaram uma alternativa eficiente, fornecendo soluções para atender às demandas com altas taxas de transmissão e tráfegos cada vez mais heterogêneos. Nas EONs, o espectro pode ser usado de forma adaptada para atender aos diferentes requisitos de largura de banda da rede, o que permite gerar canais de largura variável e adaptados ao fluxo de sinal [1].

Clayton J. N. Lira, Departamento de Eletrônica e Sistemas (DES), UFPE; R.C. Almeida Jr, Departamento de Eletrônica e Sistemas (DES), UFPE; Daniel A. R. Chaves, Escola Politécnica de Pernambuco, UPE.

Trabalhos recentes apresentaram propostas para aumentar o desempenho das redes ópticas. Formatos de modulação e heurísticas mais eficientes foram utilizados para resolver o problema de roteamento e atribuição de espectro (RSA, do inglês, *Routing and Spectrum Assignment*) em EONs.

O RSA em EONs determina uma rota possível entre um determinado par origem/destino, depois disso, aloca o espectro necessário para a conexão ao longo da rota selecionada. O processo de estabelecer conexões dinamicamente cria fragmentação no espectro na rede, resultando portanto na fragmentação da largura de banda e em seu desperdício [2]. Para resolver esse problema vários algoritmos foram propostos a fim de reduzir a probabilidade de bloqueio e controlar a fragmentação.

Alguns autores propõem mecanismos para melhor organizar a fragmentação do espectro em EON. Entre esses mecanismos, podem-se mencionar algoritmos de desfragmentação do espectro [2], conversão de comprimento de onda [3], Multiplexagem Inversa [4], [5] e *Split Spectrum* (SS), também denominada concatenação virtual por alguns autores [6], [7], [9], [8]. Neste artigo, a técnica de SS será aplicada em diferentes cenários para comparar os benefícios obtidos com a combinação de SS e alguns algoritmos de alocação de espectro (SA, do inglês *Spectrum Assignment*). Principalmente, é proposto analisar o desempenho do SS quando aplicado em conjunto com o algoritmo MSCL [10], que é projetado para analisar, para cada requisição, o estado da rede de caminhos ópticos interferentes, a fim de encontrar a porção do espectro na rede que leva à menor perda de capacidade de alocação.

II. ALGORITMO MSCL

O MSCL é um algoritmo de SA usado em EONs [10]. É baseado na escolha do conjunto de slots disponíveis que leva à menor perda de capacidade de alocação da rede. Para uma determinada solicitação, a perda é calculada considerando possíveis conexões futuras em rotas que interferem na rota escolhida para atender à solicitação em questão. A perda de capacidade para alocar uma demanda por slots de n é calculada por:

$$C^{<r>}(n) = \sum_{p \in I_r} S^{<p>}(\psi, n) - S^{<p>}(\psi', n), \quad (1)$$

São definidos, respectivamente, os estados ψ e ψ' como os estados da rede imediatamente antes e após uma possível alocação de espectro de uma requisição recebida com n slots. A capacidade $S^{<p>}(\psi, n)$ é definida como o número de formas para se estabelecer requisições de tamanho n nos slots

disponíveis (ou seja, livres) de uma rota p com estado da rede ψ . O somatório é realizado para todas as rotas do conjunto I_r , formadas pela rota em análise e todas as rotas que com ela interferem (possuem algum link em comum), uma vez que essas são as rotas que podem perder capacidade no espectro. A perda total de capacidade na rede deve ser calculada em todo o conjunto de possíveis demandas de tráfego de largura de banda heterogênea, fornecidas por:

$$C^{<r>} = \sum_n C^{<r>}(n), \quad (2)$$

em que $C(n)$ representa a perda de capacidade para cada possível requisição de tamanho de n slots. Este cálculo é feito para cada possibilidade de alocação de espectro, sendo escolhido aquele que apresenta a menor perda total de capacidade.

III. SPLIT SPECTRUM

A técnica de *Split Spectrum* tem recebido interesse na literatura, pois permite o aumento nas possibilidades de alocação. Isso é obtido dividindo o número de slots exigidos em mais de um conjunto de slots contíguos. Essa técnica utiliza como princípio os conceitos de Multiplexação Inversa (MI) e Concatenação Virtual (VCAT) em um roteamento de ponta a ponta.

O SS tem algumas vantagens imediatas em seu uso, entre elas, pode-se citar o uso de taxas mais baixas do que a demanda original (resultante do processo de particionamento, que transforma uma solicitação grande em várias menores). Este procedimento facilita a acomodação dos pedidos na rede, pois pode permitir o uso de buracos menores (são chamados de buracos o conjunto de slots disponíveis e contíguos) [6]. Quando comparada com a técnica de Multiplexação Inversa, que permite a divisão da solicitação nos nós intermediários [4], o uso do SS pode proporcionar maior eficiência energética, uma vez que o particionamento da solicitação ocorre apenas nos nós de origem, com a vantagem de fornecer uma solução completa para a camada óptica, reduzindo a complexidade dos nós intermediários, graças à transparência nos protocolos e taxas de dados [6]. O uso do SS, no entanto, promove a inserção de custos e requisitos adicionais na rede, principalmente nos elementos físicos que fornecem a divisão da solicitação e no plano de controle da rede. O SS ocasionalmente causa pequenos atrasos adicionais no estabelecimento do caminho óptico e pode exigir um armazenamento prévio do tráfego recebido para um acondicionamento de requisição [7]. Em geral, pode-se ilustrar o uso da técnica SS na alocação de espectro em uma única rota, observando a Figura 1.

A Figura 1 mostra o esquema de chegada de uma solicitação com uma largura de quatro slots, em amarelo, em uma rota cujo espectro tem um total de 10 slots por link. Os slots em vermelho representam os que já estão em uso na rede, nos quais a solicitação não pode ser inserida. Observa-se que o espectro da rota não possui um conjunto de quatro slots disponíveis contíguos (buraco com tamanho 4) para alocar a solicitação e, portanto, deve ser bloqueada (Figura 1 (I)). No entanto, com o uso da técnica SS, a largura de banda da requisição pode ser dividida em mais de uma faixa de

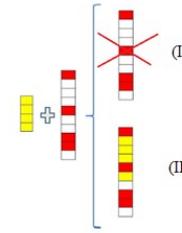


Fig. 1. Inserção de uma requisição no espectro de uma rota. Em (I) o SS não é usado e a solicitação não pode ser inserida na rota. Em (II), a solicitação é dividida e encontra slots disponíveis para sua alocação.

espectro, para que seja possível encontrar buracos disponíveis na rede nos quais seja possível acomodar a demanda (Figura 1 (II)). No exemplo apresentado, a requisição foi dividida em duas outras, com larguras de um e três slots, respectivamente. Dessa maneira, a solicitação pode ser atendida sendo dividida e colocada em buracos vazios disponíveis no espectro da rede.

Considerando o roteamento, as partes resultantes do processo de divisão podem ser roteadas usando um caminho único (*Single Path Approach*, SPA) ou caminhos diferentes (*Multi Path Approach*, MPA) [9]. O uso do SPA tem a vantagem de obter um processo de roteamento simplificado, com menores diferenças de atraso na recepção de sinais. O uso do MPA é capaz de obter melhores resultados com relação ao bloqueio de requisição, mas culmina em roteamento e processamento de sinal mais complexos.

A. SBVT: Sliceable Bandwidth Variable Transponders

No procedimento de *Split Spectrum* são utilizados transponders conhecidos como SBVT (do inglês, *Sliceable Bandwidth Variable Transponders*). Esses transponders são capazes de formar subportadoras internas independentes. A colocação dos SBVTs na rede pode acontecer através do uso de duas tecnologias principais. A primeira utiliza vários lasers para transmissão em um transponder, conhecido como *Multi Laser Sliceable Bandwidth Variable Transponder* (ML-SBVT). A segunda tecnologia trabalha com vários comprimentos de onda transmitindo em um único laser, conhecido como *Multi Wavelength Sliceable Bandwidth Variable Transponders* (MW-SBVT) [11], [12]. Para ambos os tipos de transponders, cada dispositivo pode ser separado internamente em vários subtransponders e cada um deles pode estabelecer um caminho entre um par de nós de origem e de destino, desde que o espectro usado por eles não se sobreponha. Essa capacidade é conhecida como *sliceability*.

Considerando as abordagens SPA ou MPA, uma vantagem de se utilizar o ML-SBVT é a liberdade de escolha entre as subportadoras, uma vez que cada uma delas utiliza um laser diferente. No caso da utilização do MW-SBVT, o uso de um único laser cria a restrição adicional de que as subportadoras alocadas devem ser contíguas ou próximas umas das outras (o espaçamento entre as subportadoras é limitado a no máximo 50 GHz) [11]. No entanto, essa técnica apresenta a possibilidade de formar supercanais capazes de economizar mais largura de banda quando utilizados, em comparação com o ML-SBVT.

No MPA, uma limitação a ser considerada é o atraso de chegada entre as partes da solicitação transmitida.

Este trabalho considera a transmissão utilizando o ML-SBVT, que oferece maior liberdade para alocar requisições no espectro da rede, uma vez que as partes do processo de SS podem ser alocadas em qualquer faixa de espectro dentro das rotas, exceto nos slots que possuem o mesmo índice dentro das rotas consideradas como alternativas, com o custo de usar vários lasers para a formação das sub-bandas.

Considerando a camada de rede, o ML-SBVT é o tipo de transponder mais recomendado para uso na MPA, sendo o mais comumente usado em trabalhos que utilizam a técnica de *Split Spectrum* [12], [16], [17].

1) *Considerando a abordagem SPA*: Os autores em [14] consideraram a aplicação da técnica de SS para alocação de espectro, juntamente com o MSCL no roteamento por uma única rota. Nesse caso, pode-se reduzir o impacto da restrição imposta pelo atraso, uma vez que as partes do processo de divisão trafegam pela mesma rota [15], [16].

Considerando a abordagem SPA e o aumento das possibilidades de alocação fornecidas pela técnica SS, pode-se ver o exemplo mostrado na Figura 2. A rota ilustrada possui 10 slots e seu vetor de disponibilidade de slots, com buracos de tamanhos 3, 2 e 1, é mostrado na Figura 2 (a). Na Figura 2 (b) uma única requisição, em amarelo, que após o procedimento de modulação exigia quatro slots na rede, deve ser inserida. Observa-se que a requisição pode ser inserida com tamanhos diferentes, assumindo as combinações 4 + 0, 3 + 1 e 2 + 2.

Para o espectro mostrado na Figura 2(a), a requisição com quatro slots contíguos não pode ser inserida na rota. A solução seria dividir a requisição original. A melhor maneira de se dividir o buraco, como também a posição do slot no buraco, são definidas calculando-se a perda de capacidade total na rede através do algoritmo MSCL. Os resultados obtidos em [14] mostram que o aumento das possibilidades de alocação para as solicitações quando a técnica de SS é considerada fornece reduções significativas na probabilidade de bloqueio de requisições de caminho em relação ao uso dos algoritmos de SA convencionais.

2) *Considerando a abordagem MPA*: Para o algoritmo considerando MPA, foi considerada para cada requisição a escolha das duas rotas mais curtas entre os pares de nós, sendo que a rota alternativa não pode ter mais de um hop de diferença para a rota principal. Essa limitação é imposta para minimizar os efeitos do atraso no recebimento dos sinais transmitidos por diferentes rotas.

IV. UTILIZANDO MSCL COM A TÉCNICA DE SPLIT SPECTRUM

Considerando-se a possibilidade de usar SS na rede, o próximo passo é determinar a melhor maneira de dividir a solicitação e qual é a melhor opção para alocá-la, considerando o espectro disponível. Utiliza-se o algoritmo MSCL para analisar o estado atual da rede com os cálculos da perda de capacidade.

O uso do SS permite um aumento nas possibilidades de alocação das chamadas, uma vez que uma certa demanda

pode ser subdividida de várias formas e diferentes posições do espectro podem ser escolhidas. Neste artigo adapta-se o MSCL de forma que seja possível escolher a menor perda de capacidade explorando os seguintes aspectos: a) a escolha da melhor forma de dividir uma solicitação; b) a escolha dos buracos nos quais as partes solicitadas serão inseridas; e c) o grupo de slots usados dentro de cada buraco. Para cada parte da requisição dividida, a perda de capacidade é calculada testando-se suas alocações nos possíveis slots de um vetor de disponibilidade de slots. A perda de capacidade combinada é obtida somando-se as perdas individuais de cada parte dividida. A possibilidade que retorna a menor perda de capacidade é, então, escolhida. A Figura 2 ilustra o processo.

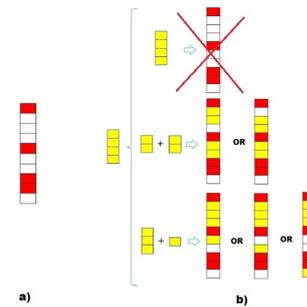


Fig. 2. Esquema da aplicação do SS. a) O espectro da rota utilizada. Slots já ocupados em vermelho b) a requisição (em amarelo) com cinco possibilidades de inserção na rota escolhida.

É claro no exemplo da Figura 2 que o processo de SS ajuda a melhorar o uso do espectro, já que algumas conexões ainda podem ser estabelecidas mesmo quando não há espectro vazio contíguo maior ou igual à largura espectral solicitada pela conexão em voga. Além disso, no espectro mostrado na Figura 2, considerando que o tráfego na rede não fornece demandas por slots com tamanho menor que 2 slots, o último slot do espectro mostrado na Figura 2, com tamanho de 1 slot, não pode ser usado. Esse slot é conhecido como *deadslot* [13]. Utilizando a técnica de *Split Spectrum*, uma sub-demanda com o tamanho do *deadslot* pode então ser alocada na rede.

A seguir são apresentadas heurísticas utilizando a técnica de *Split Spectrum* associada com o MSCL na aplicação MPA:

1) *Priorizando a rota principal (Primary route first, PRF)*: O esquema de roteamento e alocação segue as etapas abaixo:

- Tenta-se alocar a requisição na rota principal sem ser particionada. Se não for possível, tenta-se a rota alternativa também sem particionar a requisição.
- Se a etapa 1 não for suficiente, a técnica de SS será utilizada e a requisição será particionada, considerando apenas a rota principal como opção.
- Considerando agora que a requisição será dividida, tenta-se todas as possibilidades de divisão, alocando-se primeiro a fração da requisição que fornece a menor perda de capacidade na rota principal. A parte restante da requisição dividida é transmitida pela rota secundária, na faixa do espectro que também irá fornecer a menor perda de capacidade para essa rota.

O pseudocódigo desse algoritmo é mostrado no algoritmo 1.

Algorithm 1: Algoritmo PRF MSCL

```

while  $r \leq RotasCandidatas$  do
  MSCL( $r, n$ );
  if existe  $ls \geq |n|$  then
    | Alocar ( $r, s, n$ );
  else
    |  $r++$ ;
  end
end
SplitSpectrum ( $n$ );
for ( $|n_1| = 1, |n_1| < |n/2|, |n_1| ++$ ) do
   $n_2 = n - n_1$ ;
  MSCL( $r_1, n_1, n_2$ )
  if existe ( $|s_1| \geq |n_1|$ ) & ( $|s_2| \geq |n_2|$ ) then
    | Alocar ( $r_1, s_1, s_2, n_1, n_2$ );
  else
    | MSCL( $r_1, n_2$ );
    | MSCL( $r_2, n_1$ );
  end
end
end

```

São usados alguns símbolos/variáveis no algoritmo 1, a saber :

- r é uma rota, r_1 é a rota primária ou principal e r_2 é a rota alternativa ou secundária,
- n é a requisição em questão,
- n_1 e n_2 são partes da requisição após o processo de SS,
- s é um buraco e s_1 e s_2 são buracos para se alocar a requisição particionada,
- $|n|$ é o tamanho da requisição n ,
- MSCL é o algoritmo de alocação, responsável por encontrar a posição no espectro que proporciona a menor perda de capacidade.

A heurística da PRF foi proposta para evitar que o aumento da complexidade computacional fosse muito elevado, uma vez que o objetivo é priorizar a alocação na rota principal, encontrando a forma que proporcione menor perda de capacidade para essa rota. Como as rotas consideradas como opções de roteamento têm diferentes capacidades e estados de fragmentação, podem haver situações em que priorizar a rota principal não seja a melhor alternativa.

2) *Perda de capacidade reduzida (Reduced capacity loss, RCL)*: Outra estratégia adotada é a de dar ao MSCL total liberdade para escolher a melhor forma de alocação entre todas as possibilidades, considerando a alocação da requisição em qualquer parte do espectro na rota principal ou alternativa. Dessa forma, todas as possibilidades de dividir a requisição devem ser testadas, escolhendo-se aquela que permitir a menor perda total de capacidade. O algoritmo 2 descreve o procedimento. Observa-se que o uso da técnica MPA facilita a inserção da solicitação na rede pois existe mais de uma opção para escolha da rota de transmissão. Assim, a probabilidade de bloqueio de solicitações é drasticamente reduzida.

Algorithm 2: Algoritmo RCL MSCL

```

while  $r \leq RotasCandidatas$  do
  for ( $|n_1| = 0, |n_1| < |n|, |n_1| ++$ ) do
    SplitSpectrum( $n$ );
     $|n_2| = |n - n_1|$ ;
    MSCL( $r_1, r_2, n_1, n_2$ );
    Alocar ( $r_1, r_2, s_1, s_2, n_1, n_2$ );
  end
end
end

```

As variáveis usadas são as mesmas usadas no algoritmo 1.

V. RESULTADOS

Para avaliar o desempenho das heurísticas apresentadas, foram realizadas simulações e os resultados foram comparados para heurísticas com e sem SS. Os testes foram feitos com o algoritmo de alocação MSCL. A Topologia NSFNet com 14 nós e 42 links foi utilizada. Para cada simulação, foram realizadas 10^6 requisições, com o processo de chamada poissoniano e a duração das requisições distribuídas exponencialmente. Foi considerado um tráfego com solicitações assumindo larguras de banda variando uniformemente entre 2 e 6 slots por requisição e os pares de nós de origem e de destino foram escolhidos aleatoriamente com igual probabilidade. A figura 3 mostra os resultados obtidos.

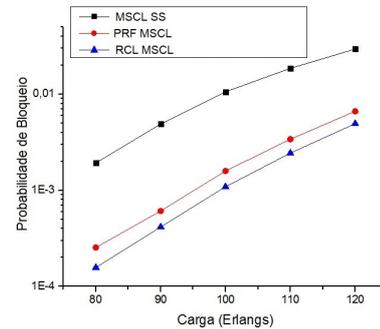


Fig. 3. Simulação mostrando o algoritmo MSCL com SS e roteamento fixo (preto), MSCL com SS e a heurística PRF (vermelho) e o MSCL com SS e a heurística RCL (azul).

A figura 3 mostra os resultados da comparação entre as heurísticas utilizadas. A curva MSCL SS (em preto), representa a heurística MSCL original com a utilização da técnica de SS, porém sem a considerar-se rotas alternativas, fazendo que a técnica de SS seja utilizada apenas dentro da rota primária obtida através do processo de roteamento. As curvas PRF MSCL (em vermelho) e RCL MSCL (em azul), representam as heurísticas PRF e RCL, respectivamente.

Observa-se que, apesar de as duas curvas que utilizam o SS superarem o MSCL tradicional, a curva em azul que representa o algoritmo que dá total liberdade para o MSCL escolher a rota, a forma de divisão e os slots usados para a alocação de espectro (RCL), obtém melhores resultados em relação à probabilidade de bloqueio quando comparado ao PRF, que prioriza a alocação na rota principal. Dessa forma, temos a possibilidade de escolher entre um algoritmo que obtenha uma redução considerável na probabilidade de bloqueio com menor

TABELA I
ESTATÍSTICAS PARA TOPOLOGIA NSFNET

Heurística	Split Spectrum	Sucesso do SS
PRF MSCL	5,20%	87,2%
RCL MSCL	5,51%	91,05%

TABELA II
ESTATÍSTICAS DE ROTEAMENTO PARA TOPOLOGIA NSFNET

Heurística	roteamento r_1	roteamento r_2	r_1 & r_2
PRF MSCL	55,3%	31%	13,7%
RCL MSCL	49,3%	32,06%	18,64%

custo computacional ou um algoritmo que reduz ainda mais a PB, mas com maior complexidade computacional.

A tabela I mostra a frequência com que a técnica de SS é utilizada pelas heurísticas propostas, bem como a taxa de sucesso obtida em cada uma das versões. Pode-se ver que a versão RCL MSCL usa a técnica SS com mais frequência do que a versão PRF MSCL, alcançando uma melhor utilização da técnica (sendo bem sucedida em 91,05% das tentativas). Embora a versão RCL MSCL use a técnica SS com mais frequência, a porcentagem de vezes usada não é muito maior (5,51 % contra 5,2 %). Assim, pode-se dizer que a maior redução na probabilidade de bloqueio das requisições obtida pela versão RCL MSCL supera o custo de se utilizar a técnica de SS algumas vezes a mais, quando comparada com a versão PRF MSCL. A tabela II mostra a distribuição do tráfego entre as rotas r_1 e r_2 . As colunas *roteamento r_1* e *roteamento r_2* mostram a porcentagem de solicitações que usam apenas a rota r_1 e a rota r_2 no processo de roteamento, respectivamente, com ou sem a técnica SS. A coluna r_1 & r_2 mostra a porcentagem das solicitações que usam as rotas r_1 e r_2 , ambos os casos são considerados com e sem a técnica de SS. Pode-se ver que a versão heurística RCL MSCL equilibra melhor o uso da rota, distribuindo o tráfego entre r_1 e r_2 e aumentando o número de vezes que ambas as rotas são usadas ao mesmo tempo. Pode-se concluir que esta versão heurística encontra soluções com menos perda de capacidade para solicitações futuras, que não são consideradas na versão PRF MSCL, atingindo valores mais baixos para a probabilidade de bloqueio.

VI. CONCLUSÕES

O uso combinado de *Split Spectrum* e o algoritmo MSCL fornece uma grande redução na probabilidade de bloqueio quando comparado com a versão sem *Split Spectrum*. O algoritmo MSCL é escolhido por causa dessa capacidade de análise de estado do espectro, fornecendo várias formas de alocação para estabelecer as requisições.

Os resultados mostrados para a topologia NSFNet mostram que a técnica SS, combinada com a capacidade de análise de estado da rede do MSCL, fornece uma grande redução na probabilidade de bloqueio das requisições, especialmente quando a versão RCL MSCL é usada. Essa heurística usa o SS com mais frequência do que a versão PRF MSCL. No entanto, é mais eficiente em seu uso e obtém uma maior redução na probabilidade de bloqueio das requisições. Em trabalhos futuros pretende-se analisar o desempenho de outros algoritmos de otimização, como algoritmos genéticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio institucional da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e Universidade de Pernambuco (UPE) e o apoio financeiro da Capes e FACEPE.

REFERÊNCIAS

- [1] Gerstel, O., Jinno, M., Lord, A., and Yoo, S.J.B.: "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?,"IEEE Commun. Mag., 2012, 50, pp. 12-20.
- [2] M. Zhang, W. Shi, L. Gong, W. Lu, and Z. Zhu, "Bandwidth Defragmentation in Dynamic Elastic Optical Networks with Minimum Traffic Disruptions,"IEEE International Conference on Communication (ICC), Jun. 2013.
- [3] X. Wang, M. Brandt-Pearce, and S. Subramaniam, "Impact of Wavelength and Modulation Conversion on Translucent Elastic Optical Networks Using MILP,"J. Opt. Commun. Netw. 7, 644-655 (2015).
- [4] Y. Xu, J. Li, P. Zhu, B. Guo, Y. Chen, Y. Zhong, Y. Wang, Z. Chen, and Y. He, "Demonstration of All-optical Inverse Multiplexing in Elastic Optical Networks,"in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper Th1E.6.
- [5] Bingli Guo, Yingying Xu, Paikun Zhu, Yucheng Zhong, Yuanxiang Chen, Juhao Li, Zhangyuan Chen, and Yongqi He, "Multicasting based optical inverse multiplexing in elastic optical network,"Opt. Express 22, 15133-15142 (2014).
- [6] Ming Xia, R. Proietti, Stefan Dahlfors, and S. J. B. Yoo, "Split spectrum: a multi-channel approach to elastic optical networking,"Opt. Express 20, 29143-29148 (2012).
- [7] S. Dahlfors, M. Xia, R. Proietti, and S. J. B. Yoo, "Split Spectrum Approach to Elastic Optical Networking,"in European Conference and Exhibition on Optical Communication, ECOC 2012.
- [8] Y. Zhang, Y. Zhang, S. K. Bose and G. Shen, "Migration From Fixed to Flexible Grid Optical Networks With Sub-Band Virtual Concatenation,"in Journal of Lightwave Technology, vol. 35, no. 10, pp. 1752-1765, 15 May15, 2017.
- [9] Albert Pagès, Jordi Perelló, Salvatore Spadaro, and Jaume Comellas, "Optimal Route, Spectrum, and Modulation Level Assignment in Split-Spectrum-Enabled Dynamic Elastic Optical Networks,"J. Opt. Commun. Netw. 6, 114-126 (2014).
- [10] R.C Almeida Jr., A.F. Santos, K.D.R. Assis, J.F. Martins-Filho, and H. Waldman, "Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks". Electronics Letters, v. 49, p. 359-361, 2013.
- [11] M. Dallaglio, A. Giorgetti, N. Sambo, L. Velasco e P. Castoldi, "Routing, Spectrum, and Transponder Assignment in Elastic Optical Networks,"Journal of Lightwave Technology, vol. 33, n. 22, pp. 4648 - 4658, 2015.
- [12] N. Sambo, G. Meloni, F. Paolucci, M. Imran, F. Fresi, F. Cugini, P. Castoldi e L. Poti, "First demonstration of SDN-controlled SBVT based on multi-wavelength source with programmable and asymmetric channel spacing,"em The European Conference on Optical Communication (ECOC), Cannes, France, 2014.
- [13] H. Waldman, R. C. Almeida, R. C. Bortoletto and K. D. R. Assis, "Deadlock avoidance under incremental traffic in the elastic single link,"2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, 2014, pp. 1-4.
- [14] C. J. N. de Lira, R. C. Almeida and J. F. Martins-Filho, "On combining Split Spectrum technique with a Slot-Continuity Capacity Loss heuristic in Elastic Optical Networks,"2017 IEEE 18th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR), Campinas, 2017, pp. 1-6.
- [15] J. T. C. W. S. d. S. Weiyi Zhang, "Reliable Adaptive Multipath Provisioning with Bandwidth and Differential Delay Constraints,"em IEEE INFOCOM 2010, 2010.
- [16] X. Wang, G. Shen, Z. Zhu e X. Fu, "Benefits of Sub-band Virtual Concatenation for Enhancing Availability of Elastic Optical Networks,"JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 34, n. 4, 2016.
- [17] X. Yuan e G. Shen, "How Much Can Sub-band Virtual Concatenation (VCAT) Help Static Routing and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks?,"em IEEE International Conference on Communication Systems, 2014.