

Aplicação do Algoritmo de Roteamento por Série de Potências em uma Rede Óptica Elástica Multibanda no Cenário Adaptativo-Alternativo

Felipe César Maia e Silva, José Roberto do Nascimento Arcanjo, Raphael Lins Di Pace e Helder Alves Pereira

Resumo— Neste artigo, propõe-se a aplicação do algoritmo de roteamento por série de potências (PSR), utilizando rotas alternativas, no cenário de redes ópticas elásticas multibandas. Para isso, considerou-se o ruído de emissão espontânea amplificada, a utilização das bandas de transmissão C, S e L e avaliou-se o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio de conexões (PBC) e disponibilidade normalizada de encaixes de blocos de slots. Os resultados mostram que com o PSR foi possível obter uma redução de até 86,33%, em termos de PBC, quando se comparou com resultados obtidos por outros algoritmos disponíveis na literatura.

Palavras-Chave— Emissão Espontânea Amplificada, Multibanda, Relação Sinal-Ruído Óptica, Roteamento.

Abstract— In this paper, we propose the application of the power series routing (PSR) algorithm, using alternative routes, in the scenario of multiband elastic optical networks. For this purpose, we considered the amplified spontaneous emission noise, the use of the C, S and L transmission bands and evaluated the network performance in terms of connection blocking probability (CBP) and normalized slot block fit availability. The results show that with the PSR it was possible to obtain a reduction of up to 86.33%, in terms of CBP, when compared with results obtained by other algorithms available in the literature.

Keywords— Amplified Spontaneous Emission, Multiband, Optical Signal-to-Noise Ratio, Routing.

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda nos últimos anos por taxas de transmissão de bit cada vez mais elevadas, tecnologias têm sido desenvolvidas para atender diversos serviços de telecomunicações. Uma delas é a tecnologia de multiplexação por divisão espacial (SDM – *Spatial Division Multiplexing*), que disponibiliza um aumento na capacidade dos sistemas ópticos por meio do uso de múltiplas fibras ópticas, de fibras ópticas com múltiplos núcleos ou ainda de fibras ópticas com múltiplos núcleos e modos [1].

Além disso, a utilização de múltiplas bandas de transmissão vem ganhando espaço na literatura. Isso porque essa tecnologia permite o aumento na disponibilidade de recursos, utilizando as fibras ópticas já instaladas, sem a necessidade de retirada e instalação de novos tipos de fibras ópticas [2]. Nesse contexto,

Felipe César Maia e Silva é estudante do curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, e-mail: felipe.maia@ee.ufcg.edu.br. José Roberto do Nascimento Arcanjo, Raphael Lins Di Pace e Helder Alves Pereira fazem parte da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, e-mails: {jose.arcanjo;raphael.pace}@ee.ufcg.edu.br e helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

um dos principais desafios considerados para as redes ópticas multibandas consiste em alocar de forma eficiente as conexões solicitadas, considerando aspectos de seleção de rota, alocação de banda, de espectro e de formato de modulação (RBMSA – *Routing, Band, Modulation and Spectrum Assignment*) [3].

Normalmente, em redes ópticas, o problema de se determinar uma rota e atribuir os recursos para que a conexão seja atendida é desacoplado. Nesse sentido, procura-se resolver cada problema separadamente [4]. Com isso, Zang *et al.* [4] apresentaram os seguintes tipos de roteamento: (1) fixo, (2) fixo-alternativo e (3) adaptativo. No primeiro, cada par fonte-destino da rede possui apenas uma única rota e essa independe do estado da rede. No segundo, cada par fonte-destino possui um conjunto de rotas, em que também não se considera o estado da rede e as rotas não são modificadas no decorrer de sua operação. No terceiro, existe algum parâmetro na operação de roteamento que considera o estado da rede e a rota, para qualquer par fonte-destino, pode ser modificada ao longo da operação da rede. Há ainda um quarto tipo de roteamento que considera tanto o aspecto adaptativo como o alternativo, sendo chamado de adaptativo-alternativo [5].

Neste artigo, propõe-se a aplicação do algoritmo de roteamento por série de potências (PSR – *Power Series Routing*) [6], utilizando rotas alternativas, no cenário de redes ópticas elásticas multibandas (MB-EON – *Multiband Elastic Optical Network*). Para isso, considera-se o ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*), gerado nos amplificadores ópticos presentes nos nós e enlaces, a utilização das bandas de transmissão C, S e L e avalia-se o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio de conexões (PBC) e disponibilidade normalizada de encaixe de blocos de slots (DNBES). O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresenta-se o estado da arte dos algoritmos de roteamento utilizados no cenário de redes ópticas multibandas. Na Seção III, descreve o algoritmo PSR e a contribuição deste artigo. Na Seção IV, apresenta-se o cenário de simulação, bem como os parâmetros e as métricas de avaliação. Na Seção V, descrevem-se e discutem-se os resultados obtidos e, por fim, na Seção VI, apresentam-se as conclusões.

II. ESTADO DA ARTE

Na literatura de MB-EONs, os trabalhos que envolvem a etapa de roteamento, considerando tráfego dinâmico, praticamente se restringem à utilização dos algoritmos de Dijkstra

e de Yen [3], [7]–[14]. Além da utilização desses algoritmos de roteamento, alguns trabalhos apresentam a utilização de inteligência artificial como aprendizagem de máquina (*machine learning*) e aprendizagem por reforço (*reinforcement learning*) [15]–[18] para resolver esse tipo de problema.

Com relação às contribuições envolvendo heurísticas, Arpanaei *et al.* [19] compararam três algoritmos RMSA baseados no cálculo do k -caminho mais curto que minimizava a frequência máxima, o número máximo de saltos ou maximizava o valor da relação sinal-ruído generalizada (GSNR – *Generalized Signal-to-Noise Ratio*) no nó destino. Em [20], Shen *et al.* propuseram um método de cálculo da função custo do enlace com algumas diferenças na função de ponderação. Em [21], Liu *et al.* propuseram um algoritmo RBMSA, considerando aspectos de sobrevivência. Em relação à etapa de roteamento, os autores utilizaram uma métrica que considerava a ponderação do caminho que levava em conta a fragmentação em um enlace na fase de seleção do caminho principal e outra na fase de seleção do caminho de reserva. Kumari *et al.* [22] propuseram um esquema de provisionamento que considerava diferentes parâmetros para a função custo do enlace, tais como: capacidade, comprimento, razão capacidade e comprimento, soma ponderada do comprimento normalizado do enlace e da capacidade normalizada, e quatro diferentes métricas de fragmentação, ou seja, fragmentação externa, entropia de Shannon, probabilidade de bloqueio de acesso e soma da raiz quadrada. Além disso, os autores realizaram a ordenação das três rotas mais bem avaliadas, dentre todas as possíveis para cada par origem-destino, utilizando os seguintes critérios: média, mínimo, máximo e soma.

Neste artigo, propomos o uso do algoritmo PSR [6] para roteamento, considerando k rotas entre cada par origem-destino, no cenário MB-EON. Para tanto, consideramos os algoritmos de roteamento propostos por Arpanaei *et al.* [19] e Shen *et al.* [20] como comparativo com o algoritmo PSR nesse cenário de avaliação. Além desses, consideramos também os algoritmos de menor número de enlaces (MH – *Minimum Hops*) e de menor distância física (SP – *Shortest Path*).

III. ROTEAMENTO POR SÉRIE DE POTÊNCIAS

Chaves [6] propôs uma metodologia para projeto de funções custo dos enlaces de uma determinada rede, considerando o problema de roteamento e o impacto de penalidades da camada física em redes ópticas multiplexadas por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*). Essa metodologia consistia em: (1) escolher as variáveis de entrada para a função custo; (2) expandir a função custo em termos de série de funções; (3) escolher o parâmetro de desempenho da rede que seria objeto de otimização e (4) determinar os coeficientes da série de funções, por meio de alguma técnica de otimização. Nesse contexto, o algoritmo PSR foi concebido considerando: (1) o comprimento normalizado do enlace e a disponibilidade normalizada de comprimentos de onda; (2) a série de Taylor; (3) a probabilidade de bloqueio de conexões e (4) a técnica de otimização por enxame de partículas.

O algoritmo PSR tem duas fases [23]: (1) planejamento e (2) operação. Na primeira, uma técnica bio-inspirada (PSO

— *Particle Swarm Optimization*) é utilizada para otimizar a função custo do enlace. Na segunda, a função custo otimizada é utilizada para realização da etapa de roteamento durante a operação da rede. Para um enlace entre os nós i e j , a função custo a ser otimizada pelo algoritmo PSR pode ser expressa da seguinte forma [24]:

$$c_{enl} = \prod_{k=1}^P \left(\sum_{i=0}^N a_i x_k^i \right), \quad (1)$$

em que $(N + 1)$ representa o número de termos da série, P o número de dimensões, ou custos considerados, x_k os custos específicos relacionados a aspectos da topologia física, ou a parâmetros que reflitam os recursos da rede de forma dinâmica, e $a_{i_1 i_2 \dots i_N}$ os coeficientes que serão otimizados pela técnica bio-inspirada e que servirão para quantificar a importância de cada custo.

Neste artigo, considera-se a implementação do PSR com duas variáveis: (1) $x_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{D}$ e (2) $y_{i,j} = \frac{1}{sr_{i,j} + 1}$, em que $d_{i,j}$ representa a distância física entre os nós i e j , D a distância física do maior enlace da rede e $sr_{i,j}$ o número de possibilidades de como se encaixar o conjunto de *slots* solicitados na grade de *slots* disponíveis. A implementação dessas duas variáveis no PSR corresponde ao algoritmo PSR_{NDC} proposto por Cavalcante *et al.* [25]. Os parâmetros utilizados pelo PSO na etapa de planejamento são os mesmos descritos por Chaves *et al.* [26].

IV. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Neste artigo, foi considerada uma arquitetura de nó baseada na de comutação espectral [13] e adaptada para redes MB-EONs [14]. Essa arquitetura de nó, em conjunto com a arquitetura de enlace, leva em conta os seguintes dispositivos em sequência, considerando um respectivo enlace óptico: transmissor, comutador, multiplexador, amplificador de potência, fibra óptica, em conjunto com amplificadores de linha, pré-amplificador, demultiplexador e receptor.

O valor de limiar para a relação sinal-ruído óptica ($OSNR_{th}$), utilizado como parâmetro de avaliação da qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) no nó receptor, pode ser obtido da seguinte forma [27]:

$$OSNR_{th} = \frac{1}{2} \frac{B}{B_{Ref}} snr_b, \quad (2)$$

em que B representa a taxa de transmissão de bit, B_{Ref} a largura de banda de referência e snr_b a relação sinal-ruído óptica por bit. Considerando uma taxa de erro por bit máxima tolerável de 10^{-3} e utilizando código corretor de erro (FEC – *Forward Error Correction*), para os formatos de modulação 64-QAM, 32-QAM, 16-QAM, 8-QAM e 4-QAM foram utilizados os seguintes valores de snr_b : 14.77 dB, 12.59 dB, 10.52 dB, 8.58 dB e 6.79 dB [28].

Considerou-se ainda que os ganhos dos amplificadores ópticos compensam exatamente as perdas do enlace óptico. O ruído ASE, gerado nos amplificadores ópticos, foi considerado como penalidade física. Dessa forma, a expressão da relação

sinal-ruído óptica no nó destino pode ser calculada do seguinte modo [27]:

$$\text{OSNR}_{\text{out}} = \frac{P_{\text{in}}}{N_{\text{in}} + N_{\text{AMP-TOTAL}}}, \quad (3)$$

em que N_{in} representa a potência de ruído gerada no transmissor e $N_{\text{AMP-TOTAL}}$ a potência total de ruído ASE, sendo dada por [27]:

$$N_{\text{AMP-TOTAL}} = N_{\text{AMP-AP}} + N_{\text{AMP-AL}} + N_{\text{AMP-PA}}, \quad (4)$$

em que $N_{\text{AMP-AP}}$ representa a parcela da potência de ruído ASE total gerada pela presença dos amplificadores ópticos de potência, $N_{\text{AMP-AL}}$ a parcela referente à presença dos amplificadores ópticos de linha e $N_{\text{AMP-PA}}$ a que se refere à presença dos pré-amplificadores ao longo da rota analisada. $N_{\text{AMP-AP}}$, $N_{\text{AMP-AL}}$ e $N_{\text{AMP-PA}}$ foram modeladas considerando a arquitetura de nó e de enlace denominada de AP, AL[s+1], PA e utilizando as equações (4) a (6) propostas por Sarmiento *et. al* [29].

Para realizar as simulações e o comparativo entre os algoritmos de roteamento no cenário MB-EON, utilizou-se um simulador, cujo princípio de funcionamento consiste em verificar quatro condições básicas para que uma conexão seja estabelecida, são elas: (1) banda disponível; (2) rota disponível; (3) *slots* contínuos e contíguos disponíveis e (4) QoT acima do limiar para o sinal óptico recebido. A alocação de banda foi considerada fixa, utilizando a seguinte sequência de atribuição: C→L→S. O algoritmo de atribuição espectral utilizado foi o do primeiro encaixe (*First Fit*). Para cada solicitação de conexão, a alocação do formato de modulação seguiu a ordem do mais eficiente ao menos eficiente em termos espectrais. Considerou-se a topologia NSFNet, ilustrada em Fig. 1, e que todos os enlaces utilizam fibra óptica do tipo G652.D [27]. Os parâmetros utilizados nas simulações foram os seguintes: (1) distância entre os amplificadores ópticos de linha de 50 km; (2) formatos de modulação: 4, 8, 16, 32 e 64-QAM; (3) largura de banda de referência de 12,5 GHz; (4) largura de banda do *slot* de 12,5 GHz; (5) perdas no multiplexador e no demultiplexador de 0 dB; (6) perda no comutador de 5 dB; (7) relação sinal-ruído óptica de entrada de 30 dB e (8) taxas de transmissão de bit de 100, 200, 300, 400 e 500 Gbps. Os parâmetros referentes às bandas de transmissão C, L e S se encontram descritos na Tabela I [30].

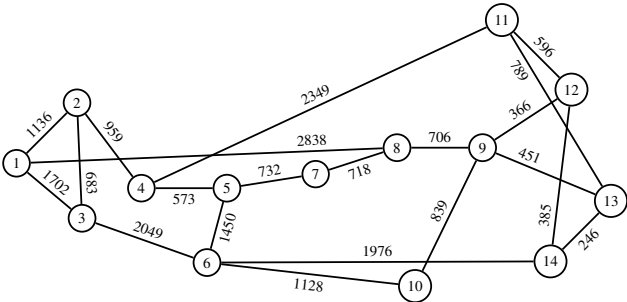


Fig. 1: Topologia NSFNet com as distâncias em quilômetros.

TABELA I: Parâmetros referentes às bandas de transmissão C, S e L [30].

Parâmetros	Banda S	Banda C	Banda L
Frequência inicial (THz)	197,22	191,60	185,83
Frequência final (THz)	205,30	195,90	190,90
Número de <i>slots</i>	647	344	406
Figura de ruído (dB)	7,0	5,5	6,0
Coeficiente de atenuação (dB/km)	0,220	0,191	0,200
Potência óptica de entrada (dBm)	-0,38	-3,66	-2,78

As métricas de avaliação utilizadas neste artigo envolvem a probabilidade de bloqueio de conexões (PBC) e a disponibilidade normalizada de encaixes de blocos de *slots* (DNEBS). A primeira métrica se refere à relação entre as conexões aceitas e as solicitadas pela rede, enquanto que a segunda pode ser obtida pela seguinte relação:

$$\delta = \frac{1}{Lc} \cdot \sum_{i=0}^{Lc-1} \frac{\sum_{k=0, T[k] \geq b_{i,j}}^{Bl'-1} \sum_{j=0}^{Bl-1} \max[0, (T[k] - b_{i,j} + 1)]}{\sum_{j=0}^{Bl-1} (St - b_{i,j} + 1)}, \quad (5)$$

em que Lc representa o número de enlaces da rede, St o número total de *slots* no espectro de frequência, Bl o número de possíveis blocos de *slots*, de acordo com as taxas de transmissão de bit e dos formatos de modulação utilizados, $b_{i,j}$ o j -ésimo tamanho do bloco de *slots* no i -ésimo enlace, Bl' o número de blocos de *slots* disponíveis no estado atual do i -ésimo enlace e T a lista de tamanhos de blocos de *slots* disponíveis no estado atual do i -ésimo enlace.

V. RESULTADOS

Fig. 2 ilustra a probabilidade de bloqueio de conexões em função do número de iterações, considerando as bandas de transmissão C, S e L, para o algoritmo PSR. Percebe-se que a convergência do algoritmo ocorre na iteração 352 com o valor da probabilidade de bloqueio de conexões de aproximadamente $2,10 \times 10^{-3}$. Dessa forma, essa melhor partícula vai ser utilizada no algoritmo de Yen, como função custo do enlace, para fornecer as k rotas necessárias para o esquema de provisionamento de conexões da rede.

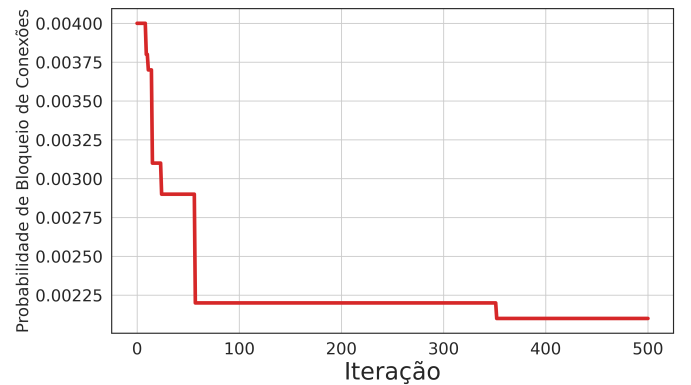


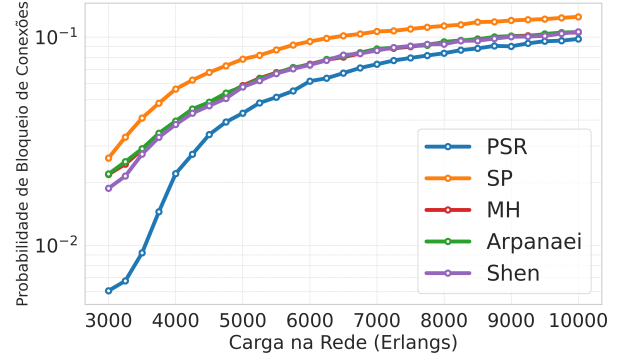
Fig. 2: Probabilidade de bloqueio de conexões em função do número de iterações, considerando as bandas de transmissão C, S e L, para a estratégia PSR.

Fig. 3 ilustra a probabilidade de bloqueio de conexões em função da carga na rede, considerando os algoritmos: MH, SP, PSR, Arpanaei [19] e Shen [20], para o cenário de roteamento alternativo com k variando de 1 a 3. Observa-se que, para todos os valores de k analisados, o PSR obteve a menor probabilidade de bloqueio de conexões dentre todos os algoritmos (MH, SP, Arpanaei [19] e Shen [20]). Para $k = 1$, o PSR ($PBC \approx 6,06 \times 10^{-3}$) obteve uma redução de 72,37% ($PBC \approx 21,92 \times 10^{-3}$), em relação ao MH, de 76,92% ($PBC \approx 26,25 \times 10^{-3}$), em relação ao SP, 72,49% ($PBC \approx 22,02 \times 10^{-3}$), em relação ao Arpanaei [19] e de 67,76% ($PBC \approx 18,79 \times 10^{-3}$), em relação ao Shen [20]. Para $k = 2$, o PSR ($PBC \approx 2,05 \times 10^{-3}$) obteve uma redução de 67,92% ($PBC \approx 6,39 \times 10^{-3}$), em relação ao MH, de 71,36% ($PBC \approx 7,15 \times 10^{-3}$), em relação ao SP, 69,69% ($PBC \approx 6,76 \times 10^{-3}$), em relação ao Arpanaei [19] e de 86,33% ($PBC \approx 14,98 \times 10^{-3}$), em relação ao Shen [20]. Para $k = 3$, o PSR ($PBC \approx 2,03 \times 10^{-3}$) obteve uma redução de 52,00% ($PBC \approx 4,32 \times 10^{-3}$), em relação ao MH, de 27,22% ($PBC \approx 2,79 \times 10^{-3}$), em relação ao SP, 60,47% ($PBC \approx 5,13 \times 10^{-3}$), em relação ao Arpanaei [19] e de 83,59% ($PBC \approx 12,37 \times 10^{-3}$), em relação ao Shen [20].

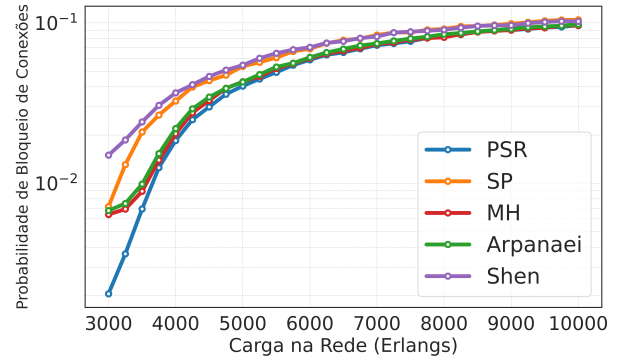
Fig. 4 ilustra a DNEBS em função da variação de k (1 a 3), considerando os algoritmos: MH, SP, PSR, Arpanaei [19] e Shen [20] para o valor de carga na rede igual a 3000 Erlangs. A métrica DNEBS verifica a capacidade da rede em alocar conjuntos de blocos de *slots* possíveis de serem solicitados, ou seja, quanto maior seu valor, maior a possibilidade de que a conexão seja alocada no espectro de frequência. Para $k = 1$, o maior valor dessa métrica é obtido com o algoritmo proposto por Arpanaei *et al.* [19] ($DNEBS \approx 0,4578$). Para o PSR, MH, SP e Shen [20], as reduções são de aproximadamente: 8,08% (0,4209), 2,19% (0,4478), 6,41% (0,4285) e 11,26% (0,4063), respectivamente. Mesmo apresentando uma redução em seu valor da DNEBS, comparado com o obtido por Arpanaei [19], o PSR seleciona rotas, de acordo com o estado da rede, obtendo uma redução de 72,49% na probabilidade de bloqueio de conexões com relação ao obtido por Arpanaei [19]. Isso mostra que a métrica é importante para verificar a capacidade da rede de alocar conexões mas não é suficiente para confirmar o estabelecimento da conexão como a métrica da probabilidade de bloqueio de conexões. Esse comportamento também é observado para outros valores de k , em que o PSR e MH possuem valores próximos de DNEBS ($k = 2$) ou até que o MH supera o valor obtido pelo PSR ($k = 3$) mas que não reflete esse comportamento na probabilidade de bloqueio de conexões, conforme observado em Fig. 3.

VI. CONCLUSÕES

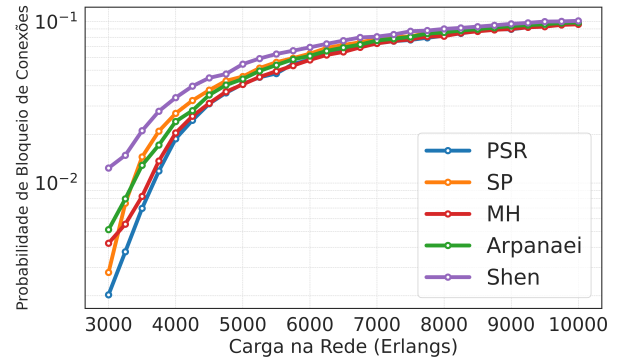
Neste artigo, propôs-se a aplicação do algoritmo de roteamento por série de potências, utilizando rotas alternativas, no cenário de redes ópticas elásticas multibandas. Para isso, considerou-se o ruído de emissão espontânea amplificada, gerado nos amplificadores ópticos presentes nos nós e enlaces, a utilização das bandas de transmissão C, S e L e avaliou-se o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio



(a) $k = 1$.



(b) $k = 2$.



(c) $k = 3$.

Fig. 3: Probabilidade de bloqueio de conexões em função da carga na rede, considerando os algoritmos: MH, SP, PSR, Arpanaei [19] e Shen [20] para o cenário de roteamento alternativo com k variando de 1 a 3.

de conexões e disponibilidade normalizada de encaixes de blocos de *slots*.

Observou-se que, para todos os valores de k analisados, o PSR obteve a menor probabilidade de bloqueio de conexões dentre todos os algoritmos comparados da literatura neste artigo. Com relação à métrica DNEBS, o PSR obteve maior valor apenas no cenário de $k = 2$. No entanto, nos outros valores de k analisados neste artigo ($k = 1$ e $k = 3$), o PSR obteve o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de conexões, de forma que essa métrica não se mostrou suficiente para determinar a capacidade de aceitação das conexões pelo plano de controle da rede.

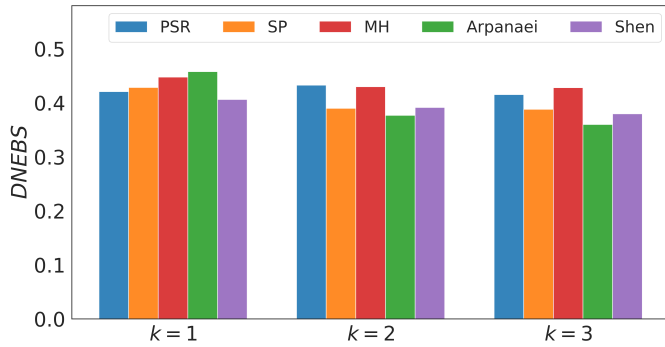


Fig. 4: $DNEBS$ em função da variação de k (1 a 3), considerando os algoritmos: MH, SP, PSR, Arpanaei [19] e Shen [20] para o valor de carga na rede de 3000 Erlangs.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à UFCG o apoio institucional e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ/PB – Termo de Outorga no 3067/2021) e à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) o apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Sadeghi, B. Correia, A. Souza, N. Costa, J. Pedro, A. Napoli, and V. Curri, “Transparent vs translucent multi-band optical networking: Capacity and energy analyses,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 11, pp. 3486–3498, 2022.
- [2] N. Sambo *et al.*, “Provisioning in multi-band optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 9, pp. 2598–2605, 2020.
- [3] Q. Yao *et al.*, “Snr re-verification-based routing, band, modulation, and spectrum assignment in hybrid c+1 optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 11, pp. 3456–3469, 2022.
- [4] H. Zang, J. P. Jue, B. Mukherjee *et al.*, “A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks,” *Optical networks magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 47–60, 2000.
- [5] B. Zhou and H. T. Mouftah, “Survivable alternate routing for wdm networks,” *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, pp. 543–544, 2002. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109204214>
- [6] D. A. R. Chaves, “Projeto de redes ópticas de alta capacidade utilizando técnicas de otimização bioinspiradas,” Ph.D. dissertation, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 2012.
- [7] M. Nakagawa, H. Kawahara, K. Masumoto, T. Matsuda, and K. Matsumura, “Performance evaluation of multi-band optical networks employing distance-adaptive resource allocation,” in *Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*. IEEE, 2020, pp. 1–3.
- [8] F. Calderón *et al.*, “Heuristic approaches for dynamic provisioning in multi-band elastic optical networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 2, pp. 379–383, 2021.
- [9] B. Bao *et al.*, “Lorb: link-oriented resource balancing scheme for hybrid c/c+1 band elastic optical networks,” *Optical Fiber Technology*, vol. 74, p. 103071, 2022.
- [10] Y. Zhang *et al.*, “Survivable rmsa combined with qot estimation and fault prediction in multi-band elastic optical networks,” in *International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP)*, vol. 12478. SPIE, 2022, pp. 359–362.
- [11] Z. Yang, R. Gu, and Y. Ji, “Virtual network embedding over multi-band elastic optical network based on cross-matching mechanism and hypergraph theory,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 20, no. 4, pp. 4681–4697, 2023.
- [12] A. Pagès, F. Agraz, and S. Spadaro, “Sdn-based band-adaptive quality assurance scheme in support of heterogeneous b5g services over sliceable multi-band optical networks,” *Optical Switching and Networking*, vol. 47, p. 100721, 2023.

- [13] S. Hosseini, I. de Miguel, R. J. D. Barroso, Ó. G. de Dios, N. Merayo, J. C. Aguado, E. Echeverry, P. Fernández, R. M. Lorenzo, and E. J. Abril, “An ilp formulation for partially upgrading elastic optical networks to multi-band,” in *2023 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. IEEE, 2023, pp. 1–5.
- [14] S. Hosseini, I. de Miguel, N. Merayo, J. C. Aguado, Ó. G. de Dios, and R. J. D. Barroso, “Migration of elastic optical networks to the c+1-bands subject to a partial upgrade of the number of erbium-doped fiber amplifiers,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 15, no. 11, pp. F22–F35, 2023.
- [15] A. B. Terki, J. Pedro, A. Eira, A. Napoli, and N. Sambo, “Routing and spectrum assignment assisted by reinforcement learning in multi-band optical networks,” in *European Conference and Exhibition on Optical Communication*. Optica Publishing Group, 2022, pp. Tu5–63.
- [16] L. Zhao, S. Yin, Y. Chai, Y. Jiao, and S. Huang, “A rsa policy with failure probability based on reinforcement learning in multi-band optical network,” in *International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. IEEE, 2022, pp. 1–3.
- [17] A. Beghelli, P. Morales, E. Viera, N. Jara, D. Bórquez-Paredes, A. Leiva, and G. Saavedra, “Approaches to dynamic provisioning in multi-band elastic optical networks,” in *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [18] J. L. Ravipudi and M. Brandt-Pearce, “Impairment-and fragmentation-aware dynamic routing, modulation and spectrum allocation in c+1 band elastic optical networks using q-learning,” *Optical Switching and Networking*, vol. 47, p. 100717, 2023.
- [19] F. Arpanaei, J. M. Rivas-Moscoso, M. R. Zefreh, J. A. Hernández, J. P. Fernández-Palacios, and D. Larrabeiti, “A comparative study on routing selection algorithms for dynamic planning of eons over c+1 bands,” in *Photonic Networks and Devices*. Optica Publishing Group, 2023, pp. NeM3B–4.
- [20] L. Shen, N. Feng, Y. Liu, D. Yan, J. Lv, J. Hu, D. Ren, and J. Zhao, “Isrs impact-reduced routing, modulation, band, and spectrum allocation algorithm in c+1-bands elastic optical networks,” *Optical Fiber Technology*, vol. 82, p. 103640, 2024.
- [21] Y. Liu, N. Feng, L. Shen, J. Lv, D. Yan, and J. Zhao, “Fragmentation and isrs-aware survivable routing, band, modulation, and spectrum allocation algorithm in multi-band elastic optical networks,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 11, p. 4755, 2024.
- [22] A. Kumari, S. Petale, S. Subramaniam, and Y. N. Singh, “Clear: A non-linear impairment-aware resource allocation algorithm for multiband elastic optical networks,” in *International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*. IEEE, 2024, pp. 1–6.
- [23] J. F. Martins-Filho, D. A. R. Chaves, C. J. A. Bastos-Filho, and D. O. Aguiar, “Intelligent and fast irwa algorithm based on power series and particle swarm optimization,” in *International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 3. IEEE, 2008, pp. 158–161.
- [24] M. A. Cavalcante *et al.*, “Nova proposta para otimização da função custo do algoritmo de roteamento por série de potências,” in *Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia (ENCOM)*. IECOM, 2016, pp. 1–2.
- [25] —, “Applying power series routing algorithm in transparent elastic optical networks,” in *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2015, pp. 1–5.
- [26] D. A. R. Chaves, D. O. Aguiar, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Impairment aware routing algorithm for all-optical network based on power series and particle swarm optimization,” in *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBtT)*. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2008, pp. 1–6.
- [27] A. A. dos Santos-Júnior, J. R. do Nascimento Arcanjo, H. A. Pereira, and R. C. de Andrade Almeida-Júnior, “Analysis of the impact of wavelength-dependent physical impairments considering a multiband elastic optical network,” *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 92–104, 2023.
- [28] B. C. Chatterjee, N. Sarma, and E. Oki, “Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776–1800, 2015.
- [29] E. B. Sarmento, J. R. do Nascimento Arcanjo, and H. A. Pereira, “Análise de desempenho de arquiteturas de nó e de enlace em redes ópticas multibandas,” *XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBtT)*. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, pp. 1–5, 2023.
- [30] A. Ferrari, E. Virgillito, and V. Curri, “Band-division vs. space-division multiplexing: a network performance statistical assessment,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1041–1049, 2020.