

Metaheurística para ordenamento do Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas Elásticas

Henrique A. Dinarte, Bruno Correia, Daniel A. R. Chaves e Raul C. Almeida Jr.

Resumo— Em redes ópticas elásticas de tráfego dinâmico, o roteamento e a alocação de espectro (RSA) são, normalmente, executados separadamente e duas estratégias são possíveis para a ordem de execução do RSA: o roteamento é executado primeiramente e então é procurada uma porção de espectro disponível na rota definida; ou uma porção de espectro é definida e então é procurada uma rota que atenda tal faixa de espectro. Este artigo propõe uma metaheurística híbrida baseada em algoritmo genético que decide a melhor ordem do RSA para cada par origem-destino, que resulta na menor probabilidade de bloqueio de chamada da rede.

Palavras-Chave— redes ópticas elásticas, ordenamento do RSA, estratégia híbrida, algoritmo genético.

Abstract— In elastic optical networks under dynamic traffic, the routing and spectrum allocation (RSA) are usually executed sequentially in two steps: by solving the routing firstly and then the spectrum assignment for this selected route or prioritizing some spectrum ranges and then searching for a route that meets such SA requirement. This paper proposes a hybrid resource-allocation ordering approach to decide between either strategy. An efficient metaheuristic based on genetic algorithm is proposed to return the best RSA ordering choice for each source-destination pair, which provides the lowest network path-request blocking probability.

Keywords— elastic optical networks, RSA Orderin, hybrid strategy, genetic algorithm.

I. INTRODUÇÃO

Alocação de recursos é uma questão importante em redes ópticas. Em redes WDM, ela é executada no processo de definição dos caminhos ópticos e normalmente resolve dois principais subproblemas: roteamento e atribuição de comprimento de onda. Em redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks* – EON), que utilizam canais de largura de banda variáveis, a alocação de recursos é tratada pelo problema de roteamento e alocação de espectro (*Routing and Spectrum Allocation* – RSA) [1], [2].

Executar o roteamento e a alocação de espectro simultaneamente é um trabalho complexo, especialmente para redes de tráfego dinâmico. Assim, uma vez que uma conexão é solicitada, o roteamento e a alocação de espectro são realizadas separadamente. Existem duas formas possíveis para isto. Na primeira, o roteamento é executado antes da alocação espectral (*Spectrum Allocation* - SA). Uma rota é definida e então é

procurado um conjunto de *slots* disponíveis nesta rota que atenda a largura de banda demandada. Nesse caso, a alocação de espectro é feita em função da rota, ou seja, o roteamento é priorizado. Essa ordem de execução do RSA é chamada, neste artigo, como ordem R-SA e é a mais abordada na literatura [3], [4], [5], [6]. Na segunda forma, a busca pela fatia de espectro é executada antes do roteamento, selecionando uma faixa de espectro para a requisição e em seguida é procurada uma rota adequada que tenha tal faixa de espectro disponível [7]. Neste artigo, refere-se a essa ordem como SA-R, sendo uma estratégia menos utilizada na literatura que a estratégia R-SA.

As ordens R-SA ou SA-R oferecem benefícios específicos para a rede. Como a estratégia R-SA prioriza o roteamento, a redução da ocupação dos enlaces da rede e da distância de saltos das conexões, são promovidas, uma vez que geralmente os algoritmos de roteamento tentam estabelecer as conexões primeiramente nas rotas mais curtas. Esses benefícios impactam diretamente na redução da probabilidade de bloqueio de chamada (PB). Por outro lado, a estratégia SA-R prioriza a alocação de espectro, permitindo o algoritmos de alocação espectral promover a organização do espectro (geralmente a compactação). Como as rotas são definidas em função das definições do algoritmo de alocação de espectro, elas tendem a ser escolhidas o mais diferente possível para cada conexão, promovendo assim uma maior distribuição de carga na rede.

Um grande número de artigos na literatura mostram a execução do roteamento e da alocação de espectro separadamente, utilizando a estratégia R-SA ou SA-R para o execução do RSA e o estabelecimento de todas as conexões requisitadas. Entretanto, pode-se comutar entre as duas ordens de execução do RSA a fim de se obter os maiores benefícios de ambas as estratégias de ordenamento no processo de estabelecimento das conexões. Dado que alguns pares de nós podem disponibilizar rotas com características de prover com maior ou menor intensidade a ocupação dos enlaces ou a distribuição de carga na rede, este artigo propõe uma abordagem híbrida para a definição da estratégia de RSA (ordem R-SA ou SA-R) mais adequada para cada par origem-destino da rede. Para isso, foi desenvolvida uma metaheurística baseada em algoritmo genético para decidir o tipo do RSA (R-SA ou SA-R) que deve ser executado para cada requisição de caminho óptico numa rede de tráfego dinâmico, cuja função objetivo é reduzir a probabilidade de bloqueio de chamada. Considerando pesquisas nas principais bases de dados, a estratégia híbrida para ordem de RSA é pouco apresentada na literatura.

Henrique A. Dinarte, Raul C. Almeida Jr., Departamento de Engenharia Eletrônica e de Sistema, UFPE, Recife-PE, e-mail: {henrique.dinarte, raul.almeidajunior}@ufpe.br; Daniel A. R. Chaves, Escola Politécnica de Pernambuco, UPE, Recife-PE, e-mail: darc@ecomp.poli.br. A contribuição de Bruno Correia para este trabalho se deu no período de sua filiação à UFPE. Atualmente encontra-se filiado ao programa de pós-graduação (doutorado) na Politecnico di Torino, Turim, Itália, e-mail: bruno.dearaujo@polito.it

II. ORDEM DE RSA E METAHEURÍSTICA PROPOSTA

As soluções de RSA geralmente buscam otimizar três aspectos que contribuem positivamente para o desempenho da rede:

- 1) redução da fragmentação [8], [9], geralmente é alcançada com a utilização de algoritmos de alocação de espectro que promovam a compactação espectral, tais como *First-fit*, *Best-Last-fit* [10] ou MSCL [11], [12] os quais promovem a compactação de espectro;
- 2) balanceamento de carga entre os enlaces da rede [6], [13], [14], geralmente é conseguido utilizando um algoritmo que atribui um baixo custo aos enlaces com poucos *slots* utilizados e em seguida executando um algoritmo de roteamento por mínimo custo, como o Dijkstra;
- 3) uso de distância mínima de saltos [15], [16] para os caminhos ópticos, obtida por uma algoritmo de roteamento por caminho mais curto.

Neste artigo, são utilizados o algoritmo YEN [17] para o roteamento fixo-alternativo de k caminhos mais curtos e o algoritmo *First-Fit* para a alocação de espectro. O objetivo é promover a distância mínima de saltos para os caminhos ópticos ou a compactação de espectro promovida pelo *First-Fit* a depender da estratégia de ordenação do RSA (R-SA ou SA-R) executada.

Na estratégia de ordenação R-SA, há uma priorização de uso dos caminhos. Isso porque rotas com menores números de saltos são escolhidas antes, e rotas secundárias, com um número de saltos um pouco maior, só são escolhidas se a rota principal não dispuser de espectro suficiente para atender à demanda da requisição. Assim, em média, ao se usar a estratégia R-SA, um menor número de enlaces são usados nas rotas resultantes. Isso reduz a ocupação dos enlaces e, conseqüentemente, a carga da rede. Na ordem R-SA, o algoritmo de alocação de espectro busca atender à demanda de espectro (*slots*) da requisição numa rota previamente definida, que sempre corresponde à mais curta disponível, por isso a compactação de espectro e o balanceamento de carga são sacrificados em detrimento da redução do comprimento das rotas em termos de número de saltos.

Sempre que uma requisição de conexão é processada, a estratégia SA-R propõe a priorização do algoritmo de alocação de espectro. Assim, o *First-fit*, primeiramente, define o conjunto de *slots* contíguos disponíveis de índices mais baixos possíveis que atenda a demanda da requisição. Em seguida, o algoritmo de roteamento procura uma rota que tenha a disponibilidade dos *slots* previamente definidos. Quando uma requisição posterior é recebida, o novo conjunto de *slots* de índices mais baixos definido pelo algoritmo de SA certamente estará disponível em uma rota diferente da rota definida para requisição anterior. Isto aumenta a probabilidade de rotas bastante diferentes serem utilizadas a cada caminho óptico estabelecido, o que promove o balanceamento de carga na rede. Além disso, a compactação espectral e, conseqüentemente, a desfragmentação da rede também é promovida. Pode-se afirmar que, neste caso, o roteamento é executado em função do SA.

A. Estratégia Híbrida de ordenação do RSA

Ordenação do RSA é um conceito novo e pode ser aplicado a redes de tráfego estático ou dinâmico. Este artigo assume o tráfego dinâmico. São consideradas três formas de processamento de um conjunto de requisições de caminhos ópticos de entrada: 1) todas as requisições são estabelecidas utilizando a ordem R-SA, 2) todas as requisições são processadas utilizando a ordem SA-R, ou 3) algumas requisições são estabelecidas utilizando a ordem R-SA e outras a ordem SA-R visando à obtenção do melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio (estratégia híbrida). A estratégia híbrida propõe a aplicação das estratégias de ordenação (R-SA ou SA-R) em cada par origem-destino de forma independente. Esta independência provê uma maior flexibilidade para os algoritmos de RSA encontrarem um conjunto de ordenações que melhorem o desempenho da rede. A escolha de qual das duas estratégias é mais adequada e deve ser aplicada a cada par origem-destino a fim de obter-se a menor probabilidade de bloqueio é feita por meio de uma metaheurística baseada em algoritmo genético, conforme descrita na secção II-B.

B. Algoritmo Genético aplicado à Ordem do RSA

O algoritmo evolucionário utilizado para decidir a melhor estratégia de ordenação de RSA para cada par origem destino é baseado no algoritmo genético (*Genetic Algorithm - GA*) proposto em [18], utilizando uma população de indivíduos, também referenciados na literatura como cromossomos [19], para determinar a melhor solução para o problema. O algoritmo genético propõe uma recombinação destes indivíduos inspirada na mutação e cruzamento genético, os quais são realizados com base na avaliação de resultados de uma função objetivo para cada indivíduo da população. Cada indivíduo possui um conjunto de genes que representam a solução para o problema em questão. No algoritmo genético proposto, cada indivíduo é correspondente a uma lista que representa todos os pares origem-destino da rede, cujos genes correspondem à informação de escolha entre as estratégias R-SA ou SA-R de cada par origem-destino dessa lista. Estes indivíduos são representados no código por meio de um vetor binário de tamanho V , em que V corresponde ao número de pares origem-destino (genes) e os valores binários 1 ou 0 representam a escolha da estratégia R-SA ou SA-R, respectivamente, a ser utilizada para cada par de nó.

O pseudocódigo que resume o funcionamento do algoritmo genético é mostrado em Alg. 1. A primeira parte do algoritmo consiste na criação e inicialização da população inicial, mostrado entre as linhas 3 e 8 do Alg. 1, em que são criados N indivíduos com valores aleatórios, 0 (SA-R) ou 1 (R-SA), de seus V genes. Após a criação da população inicial o processo de evolução (entre as linhas 10 e 21) é iniciado, com um número fixo G de geração (iterações). A cada iteração do processo evolutivo são aplicados 3 funções na população de indivíduos. A função de cruzamento (linha 11) cria uma nova população Q_g com o dobro do tamanho da população anterior, em que cada par de indivíduos de P_g gera dois novos indivíduos, com probabilidade p_c determinando de qual indivíduo original o novo herdará cada gene. Então, é aplicada

mutação com uma probabilidade fixa (p_m) de mudança de genes, apenas aos novos indivíduos gerados (linha 12). Na última etapa de cada geração (linha 17), são selecionados N indivíduos para compor a próxima geração ($g + 1$). Dos N indivíduos da geração ($g + 1$), 80% correspondem aos melhores indivíduos, os que apresentam os melhores valores de probabilidade de bloqueio (função objetivo), e os 20% restantes são selecionados aleatoriamente da população g . Ao fim de G gerações, o melhor indivíduo obtido (19) representa a solução que contém a estratégia mas adequada (R-SA ou SA-R) para cada par origem-destino de forma a se obter a menor probabilidade de bloqueio de chamada.

Algoritmo 1 Algoritmo genético para estratégia híbrida de ordenação do RSA.

Entrada: N : Tamanho da população; V : Número de pares de nós da topologia; G : Número de gerações; p_c : Probabilidade de cruzamento; p_m : Probabilidade de mutação;

Saída: I_{final} : Melhor indivíduo da última geração;

```

1:  $P_1 \leftarrow \emptyset$ 
2: {inicialização da população  $P_1$  de tamanho  $N$ , em que cada indivíduo possui um total de  $V$  genes}
3: para  $n = 1$  até  $N$  faça
4:   para  $v = 1$  até  $V$  faça
5:      $I_n^v \leftarrow \text{ALEATÓRIO}(0, 1)$ ;
6:   fim para
7:    $P_1 \leftarrow P_1 \cup I_n$ ;
8: fim para
9: {gerações}
10: para  $g = 1$  até  $G$  faça
11:    $Q_g \leftarrow \text{CRUZAMENTO}(P_g, p_c)$ ;
12:    $Q_g \leftarrow \text{MUTAÇÃO}(Q_g, p_m)$ ;
13:   para Todos  $I_n \in Q_g$  faça
14:     Use a ordem proposta para o indivíduo atual  $I_n$ , sob análise, como a estratégia de RSA no simulador de rede e encontre a probabilidade de bloqueio retornada;
15:     Atribua a PB encontrada ao  $I_n$  (a PB é o fitness de  $I_n$ );
16:   fim para
17:    $P_{g+1} \leftarrow \text{SELEÇÃO}(Q_g)$ ;
18:   se  $g = G$  então
19:      $I_{final} \leftarrow$  Melhor indivíduo de  $P_{g+1}$ 
20:   fim se
21: fim para
    
```

III. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Um simulador de eventos discretos foi implementado para simular a execução do RSA em diversas topologias usando a ordem R-SA, SA-R ou a estratégia híbrida definida pela metaheurística. A Fig.1 apresenta a topologia NSFNET composta por 14 nós e 21 enlaces bidirecionais, a topologia EON-RT composta por 28 nós e 34 enlaces bidirecionais e a topologia anel composta por 11 nós e 11 enlaces bidirecionais, as quais foram utilizadas nas simulações. As simulações foram configuradas para 128 *slots* por enlace, 10^7 requisições, tráfego

dinâmico com distribuição exponencial para a duração das chamadas, taxas de bit das requisições de conexões de 100, 200 e 400 Gbps uniformemente distribuídas. Os pontos de carga mínimo e máximo foram definidos de modo a obter-se a probabilidade de bloqueio de chamadas aproximadamente entre 10^{-5} e 10^{-2} .

Os parâmetros utilizados para o algoritmo genético foram: número total de gerações $G = 300$, tamanho de população para cada geração $N = 50$, probabilidade de cruzamento $p_c = 0.5$ e probabilidade de mutação $p_m = 0.01$.

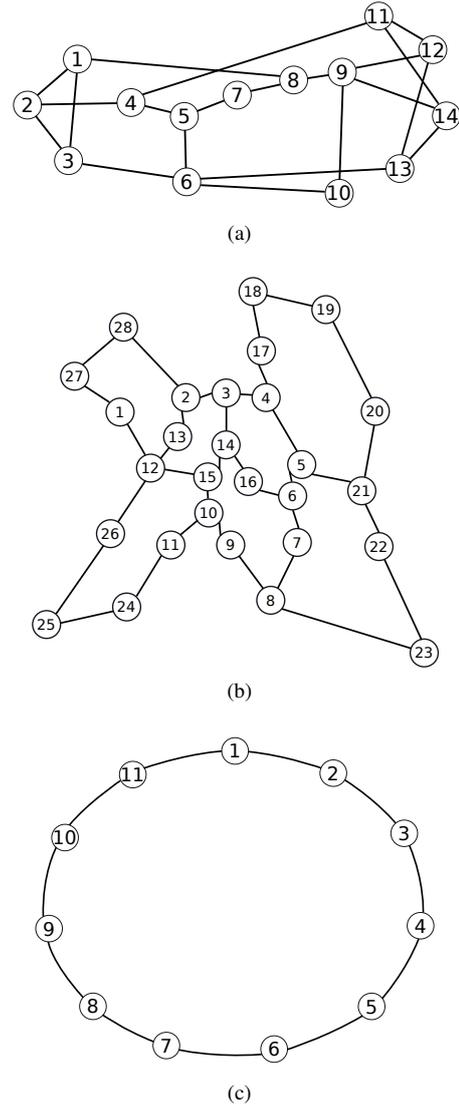


Fig. 1: topologias analisadas: (a) NSFNET, (b) EON-RT e (c) Anel

A Fig 2 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio de chamada para cada estratégia utilizada considerando $k = 2$, onde k é o número de rotas alternativas definidas pelo algoritmo de roteamento fixo-alternativo. É possível observar que os resultados de probabilidade de bloqueio são diferentes para o uso de cada estratégia de ordem de RSA num mesmo cenário e topologia. Isto prova que a ordem de execução do RSA tem influência no desempenho da rede.

Considerando o aspecto rota, duas características têm relação direta na escolha da melhor estratégia de ordenação do RSA. A primeira é quando rotas entre um par origem-destino apresentam distâncias de saltos similares, caso em que a ordem R-SA não é a mais adequada, pois seu principal benefício, a distância mínima de saltos não é relevante. Nesse caso a ordem SA-R é mais adequada a ser aplicada pois busca prover o balanceamento de carga e a compactação de espectro. Por outro lado, se rotas entre um par origem-destino apresentam distâncias de salto muito diferentes, a ordem R-SA é mais adequada.

As topologias do tipo *Mesh* apresentam as duas características, porém a predominância é a primeira, por isso, na topologia NSFNET, a ordem SA-R alcançou melhores resultados de PB em relação à R-SA, conforme mostrado na Fig. 2a. Embora a topologia NSFNET apresente predominância da primeira característica, a segunda é encontrada para alguns pares de nós que apresentam um conjunto de rotas com número de saltos muito diferentes entre si. Assim, a aplicação da ordem RSA nestes pares específicos resulta em redução adicional na probabilidade de bloqueio. Analisando os resultados da topologia EON-RT, que apresenta um maior número de nós e enlaces que a topologia NSFNET, percebe-se um comportamento semelhante ao apresentado na topologia NSFNET, no qual a estratégia híbrida também alcançou melhores resultados de PB, conforme mostrados na Fig. 2b. Portanto, o uso da estratégia híbrida, que decide qual estratégia deve ser usada para cada par de nós individualmente pode obter menores valores de PB que os obtidos pelo uso de uma das estratégias isoladas.

A topologia Anel é um caso particular entre as topologias regulares. Ela apresenta apenas duas rotas entre qualquer par origem-destino. Com a exceção dos nós antípodas, tais rotas são sempre diferentes em número de saltos. Isso contribuiu para que a ordem R-SA apresente melhores resultados de PB em relação à ordem SA-R nessa topologia. A Fig. 2c mostra que a estratégia híbrida apresentou apenas uma discreta melhora em relação à estratégia R-SA, ou seja, praticamente não há pares origem-destino em que a maior compactação de espectro e distribuição de carga se sobressaia à redução de carga na rede.

A Fig. 3 mostra os resultados das estratégias de ordenação para a topologia NSFNET, considerando $k = 3$ rotas alternativas. Comparando-se estes resultados com os obtidos utilizando $k = 2$ (Fig. 2a), é possível observar uma melhoria ainda mais expressiva no desempenho da ordem SA-R em relação à ordem R-SA e também da estratégia híbrida em relação à ordem SA-R. Isto mostra que um pequeno aumento do k acarreta mais rotas alternativas disponíveis para atender à demanda de *slots* definidas na o algoritmo de SA, tendendo a beneficiar a estratégia SA-R. Como a estratégia híbrida otimiza o desempenho utilizando as duas estratégias individualmente, este aumento do k também influencia positivamente no desempenho alcançado pelo algoritmo híbrida que otimiza a escolha da ordem de execução do RSA por meio algoritmo genético.

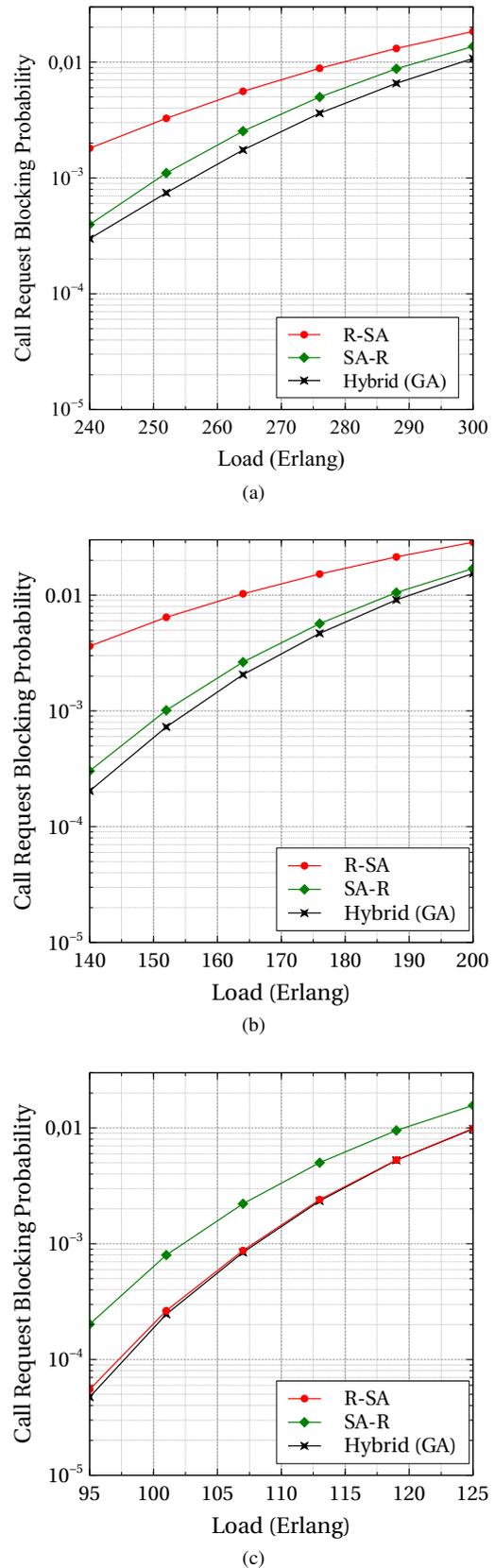


Fig. 2: Probabilidade de bloqueio de chamada em função da carga da rede para as topologias: (a) NSFNET, (b) EON-RT e (c) Anel, considerando o valor de $(k = 2)$.

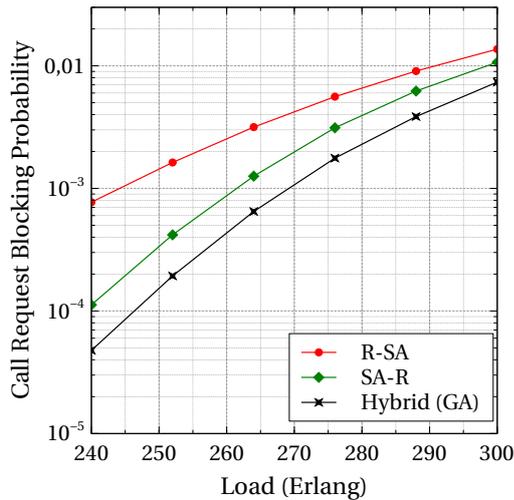


Fig. 3: Probabilidade de bloqueio de chamada em função da carga da rede para a topologia NSFNET considerando ($k = 3$)

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo, as principais características das duas estratégias de ordenação de execução do RSA são apresentadas e discutidas. Uma nova estratégia, híbrida das estratégias R-SA e SA-R, foi apresentada. A nova estratégia de ordenação da execução do RSA utiliza algoritmo genético para decidir a ordem de execução (R-SA ou SA-R) mais adequada para cada par origem-destino individualmente, de modo a prover melhor desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio. Considerando os resultados obtidos nas simulações, foi provado que a ordem de execução do RSA influencia diretamente no desempenho da rede e que, a depender de suas características, a aplicação da estratégia R-SA ou SA-R pode prover melhor desempenho para a rede. Por isso, a proposta híbrida que aplica uma das duas estratégias individualmente a cada par origem-destino, de forma otimizada pela metaheurística, alcançou desempenho de probabilidade de bloqueio até 35% melhor que o resultado da melhor estratégia isolada, para a topologia NSFNET.

AGRADECIMENTOS

Ao departamento de Eletrônica e Sistemas (DES) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), ambos da Universidade Federal de Pernambuco, pela disponibilização da infraestrutura necessária à pesquisa e às simulações. À Universidade de Pernambuco (UPE) pela parceria de seus pesquisadores que rendeu contribuições efetivas para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] X. Wan, L. Wang, N. Hua, H. Zhang, and X. Zheng, "Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks," in *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*. IEEE, 2011, pp. 1–3.
- [2] M. Klinkowski and K. Walkowiak, "Offline rsa algorithms for elastic optical networks with dedicated path protection consideration," in *2012 IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*. IEEE, 2012, pp. 670–676.
- [3] B. V. Correia, R. C. Almeida Jr, H. A. Pereira *et al.*, "Superchannel multicasting module placement algorithm applied to elastic optical networks," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 131–140, 2019.
- [4] L. Mesquita, K. Assis, A. Santos, M. Alencar, and R. Almeida, "A routing and spectrum assignment heuristic for elastic optical networks under incremental traffic," in *2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*. IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [5] A. Alyatama, I. Alrashed, and A. Alhusaini, "Adaptive routing and spectrum allocation in elastic optical networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 24, pp. 12–20, 2017.
- [6] L. Bonani, J. Queiroz, M. Abbade, and F. Callegati, "Load balancing in fixed-routing optical networks with weighted ordering heuristics," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 3, pp. 26–38, 2019.
- [7] R. Wang and B. Mukherjee, "Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 11, pp. 83–91, 2014.
- [8] Y. Yin, H. Zhang, M. Zhang, M. Xia, Z. Zhu, S. Dahlfort, and S. B. Yoo, "Spectral and spatial 2d fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 10, pp. A100–A106, 2013.
- [9] X. Chen, J. Li, P. Zhu, R. Tang, Z. Chen, and Y. He, "Fragmentation-aware routing and spectrum allocation scheme based on distribution of traffic bandwidth in elastic optical networks," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 11, pp. 1064–1074, 2015.
- [10] W. Fadini and E. Oki, "A subcarrier-slot partition scheme for wavelength assignment in elastic optical networks," in *2014 IEEE 15th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, July 2014, pp. 7–12.
- [11] R. C. Almeida, A. F. Santos, K. D. R. Assis, H. Waldman, and J. F. Martins-Filho, "Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks," *Electronics Letters*, vol. 49, no. 5, pp. 359–361, February 2013.
- [12] 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," in *2017 IEEE 18th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, June 2017, pp. 1–6.
- [13] A. F. Santos, R. Almeida, K. Assis, G. M. Durães, A. Soares, and W. F. Giozza, "Adaptação do algoritmo bsr para redes ópticas slice," *31º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2013.
- [14] P. J. Souza, A. F. Santos, R. C. Almeida, K. D. Assis, and M. R. Sena, "A proposed bsr heuristic considering physical layer awareness," in *2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*. IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [15] B. Yan, Y. Zhao, X. Yu, W. Wang, Y. Wu, Y. Wang, and J. Zhang, "Tidal-traffic-aware routing and spectrum allocation in elastic optical networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 11, pp. 832–842, 2018.
- [16] G. M. Durães, A. Soares, J. R. Amazonas, and W. Giozza, "The choice of the best among the shortest routes in transparent optical networks," *Computer Networks*, vol. 54, no. 14, pp. 2400–2409, 2010.
- [17] A. Santos, R. Almeida Jr, and K. Assis, "Yen-bsr: A new approach for the choice of routes in wdm networks," *Journal of Optical Communications*, vol. 35, 12 2014.
- [18] P. Lechowicz and K. Walkowiak, "Genetic algorithm for routing and spectrum allocation in elastic optical networks," in *2016 Third European Network Intelligence Conference (ENIC)*. IEEE, 2016, pp. 273–280.
- [19] C. R. Reeves, *Handbook of Metaheuristics – Genetic Algorithms*, 2nd ed. Springer, 2010, vol. 146, ch. 5, pp. 109–139.