

Aplicação do Algoritmo de Roteamento por Série de Potências em Redes Ópticas Elásticas Multibandas

Felipe César Maia e Silva, Danilo de Oliveira Melo, José Roberto do Nascimento Arcanjo e Helder Alves Pereira

Resumo—Neste artigo, propõe-se a aplicação do algoritmo de roteamento por série de potências (PSR – *Power Series Routing*) no cenário de redes ópticas elásticas multibandas. Para isso, considera-se o ruído de emissão espontânea amplificada, gerado pelos amplificadores ópticos presentes ao longo dos nós e dos enlaces ópticos, como penalidade física e três bandas de transmissão (S, C e L). Em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, foi obtida uma redução de 85,33% quando o PSR proposto foi comparado com o algoritmo de roteamento que considera a menor distância física como função custo.

Palavras-Chave—Algoritmo de Roteamento, Penalidade Física, Rede Óptica Elástica Multibanda, Relação Sinal-Ruído Óptica.

Abstract—In this paper, we propose the application of the power series routing algorithm (PSR) in the scenario of multi-band elastic optical networks. For this, the amplified spontaneous emission noise, generated by the optical amplifiers present along the nodes and optical links, is considered as a physical penalty and three transmission bands (S, C and L). In terms of calls blocking probability, a reduction of around 85.33% was obtained when the proposed PSR was compared with the routing algorithm that considers the shortest physical distance as a cost function.

Keywords—Multiband Elastic Optical Network, Optical Signal-to-Noise Ratio, Physical Penalty, Routing Algorithm.

I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas que utilizam multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) abordam os recursos espectrais como porções fixas do espectro, independente da taxa de transmissão de bit solicitada e do formato de modulação utilizado no estabelecimento das chamadas. Enquanto isso, as redes ópticas elásticas (EON – *Elastic Optical Network*) levam em consideração esses fatores para a ocupação do espectro transmitido, tornando o processo de alocação espectral dinâmico para cada chamada estabelecida na rede [1].

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 [2]. Além disso, a utilização

de múltiplas bandas de transmissão (MB – *Multiband*) vem ganhando espaço na literatura. Isso porque essa tecnologia permite o aumento da disponibilidade de recursos, utilizando as fibras ópticas já instaladas, sem a necessidade de retirada e instalação de novos tipos de fibras ópticas [3].

Nesse contexto, um dos principais desafios considerados para as redes ópticas multibandas consiste em alocar de forma eficiente as chamadas solicitadas, considerando aspectos de seleção de rota, alocação de banda, de espectro e de formato de modulação (RBMSA – *Routing, Band, Modulation and Spectrum Asssignment*) [4]. Dessa forma, é importante também avaliar a qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) do sinal óptico recebido de modo a verificar a viabilidade da admissão das chamadas na rede [3].

Neste artigo, propõe-se a utilização do algoritmo de roteamento por série de potências (PSR – *Power Series Routing*) no cenário de redes ópticas elásticas multibandas (MB-EON). 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 S, C e L e avalia-se o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, da distribuição dos formatos de modulação e das chamadas aceitas pela rede entre as bandas disponíveis. O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresentam-se os algoritmos de roteamento utilizados para comparação com o algoritmo PSR proposto. Na Seção III, descreve-se o cenário de simulação. Na Seção IV, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos e, por fim, as conclusões na Seção V.

II. ROTEAMENTO EM REDES ÓPTICAS MULTIBANDAS

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 (uma rota) e de Yen (k rotas) [4]–[12]. Além disso, alguns trabalhos apresentam a utilização de inteligência artificial como aprendizagem de máquina e aprendizagem por reforço [13]–[16] para resolver esse tipo de problema.

Neste artigo, propõe-se a utilização do algoritmo PSR para roteamento, considerando uma rota entre cada par fonte-destino, no cenário MB-EON. Para isso, considerou-se a adaptação dos seguintes algoritmos de roteamento, utilizados em EONs, para o cenário de múltiplas bandas como forma de comparação com os resultados obtidos: (1) de menor distância física (SP – *Shortest Path*) [17] e (2) distância e disponibilidade [17] adaptado para contiguidade de fatias do espectro (*slots*) (LOR_C – *Length and Contiguity Routing*) [18]. Basicamente, o algoritmo de Dijkstra foi modificado, em

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.

Danilo de Oliveira Melo, José Roberto do Nascimento Arcanjo 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: {danilo.melo, jose.arcanjo}@ee.ufcg.edu.br e helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

termos de sua função custo, para cada um dos algoritmos mencionados (SP e LOR_C), conforme descrito na Tabela I, em que $d_{i,j}$ representa a distância física do enlace entre os nós i e j , D a maior distância física de um 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 [18].

TABELA I: Funções custo dos algoritmos SP e LOR_C utilizados como comparação neste artigo.

Algoritmo	Função Custo ($f(i,j)$)
SP	$d_{i,j}$
LOR _C	$1 + \frac{d_{i,j}}{D} + \frac{1}{sr_{i,j} + 1}$

A. Algoritmo de Roteamento por Série de Potências

O algoritmo PSR tem duas fases [19]: (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 clássico (PSR-C) pode ser expressa da seguinte forma [19]:

$$c_{\text{enl}} = \sum_{i_1=0}^N \sum_{i_2=0}^N \cdots \sum_{i_P=0}^N a_{i_1 i_2 \cdots i_P} x_1^{i_1} x_2^{i_2} \cdots x_P^{i_P}, \quad (1)$$

em que $(N + 1)$ representa o número de termos da série, P o número de dimensões, ou custos considerados, x_i os custos específicos relacionados a aspectos da topologia física, ou a parâmetros que reflitam os recursos da rede de forma dinâmica, e $a_{i_1 i_2 \cdots i_P}$ os coeficientes que serão otimizados pela técnica bio-inspirada e que servirão para quantificar a importância de cada custo. Em [20], foi proposta a seguinte modificação na função custo do enlace:

$$c_{\text{enl}} = \prod_{k=1}^P \left(\sum_{i=0}^N a_i x_k^i \right). \quad (2)$$

Com isso, o número de coeficientes para se otimizar, utilizando Eq. (1), é de $(N + 1)^P$, enquanto que, utilizando Eq. (2), é de $(N + 1) \cdot P$. Neste artigo, denomina-se o PSR, utilizando a função custo descrita em Eq. (2) como PSR-O.

1) *Estado da Arte do PSR*: Em [21], Chaves 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 WDM. 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 seja 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 chamadas e (4) a técnica de otimização por enxame de partículas.

Em [19], [22]–[24], Chaves *et al.* apresentaram o PSR em sua forma clássica na literatura. Em [25], foi utilizado para determinação de k rotas (NrPSR). Em [26], no cenário de redes ópticas WDM opacas, translúcidas e transparentes. Em [27], no cenário de restauração de rotas. Em [28], Bastos-Filho *et al.* utilizaram o NrPSR para selecionar uma rota, tomando por base o valor máximo da OSNR ou o valor mais próximo da OSNR com relação a um respectivo limiar. Em [29], o NrPSR foi aplicado no cenário de EONs, considerando apenas a variável correspondente ao número normalizado de encaixes de *slots*. Em [30], Cavalcante *et al.* propuseram duas variantes do PSR para EONs. Na primeira, consideraram distância física normalizada e disponibilidade normalizada de *slots* e, na segunda, distância física normalizada e número normalizado de encaixes. Em [20], foi proposta uma modificação na função custo, de modo a tornar a fase de planejamento do algoritmo PSR mais eficiente, em termos de obtenção dos coeficientes otimizados. Xavier *et al.* [31] propuseram a utilização do PSR no cenário de proteção dedicada em redes ópticas WDM. Em [32], o PSR foi analisado em termos de diferentes tipos de parâmetros e quantidade de variáveis presentes na função custo. Em [33], Lira *et al.* aplicaram a metodologia proposta por Chaves [21] para o problema de alocação espectral em EONs. Em [34], Leite *et al.* analisaram o desempenho do PSR em EONs, considerando três tipos de PSO. Em [35], Lira *et al.* propuseram uma metodologia baseada em [21] para problemas de alocação de espectro em EONs.

Neste artigo, considera-se a implementação do PSR-C e do PSR-O com duas variáveis: (1) $x_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{D}$ e (2) $y_{i,j} = \frac{1}{sr_{i,j} + 1}$. A implementação dessas duas variáveis no PSR corresponde ao algoritmo PSR_{NDC} proposto por Cavalcante *et al.* [30]. Os parâmetros utilizados pelo PSO na etapa de planejamento são os mesmos descritos por Chaves *et al.* [22].

III. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Neste artigo, considerou-se uma arquitetura de nó baseada na de comutação espectral [1] e adaptada para redes MB-EONs [36]. Essa arquitetura de nó, em conjunto com a 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 ($OSNR_{\text{th}}$), utilizado como parâmetro de avaliação da QoT no nó receptor, pode ser obtido conhecendo-se a taxa de transmissão de bit, o formato de modulação e a relação sinal-ruído por bit (snr_b) [1]. 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, respectivamente [1]. Considerou-se que os ganhos dos amplificadores ópticos compensam exatamente as perdas dos nós e dos enlaces ópticos. Além disso, 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 [37]:

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

em que P_{in} representa a potência óptica do sinal na saída do transmissor, N_{in} a potência de ruído gerada no transmissor e $N_{AMP-TOTAL}$ a potência total de ruído ASE, sendo dada por [37]:

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

em que N_{AMP-AP} representa a parcela da potência de ruído ASE total gerada pela presença dos amplificadores ópticos de potência, N_{AMP-AL} a parcela referente à presença dos amplificadores ópticos de linha e N_{AMP-PA} a que se refere à presença dos pré-amplificadores ao longo da rota analisada. N_{AMP-AP} , N_{AMP-AL} e N_{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* [37].

Para realizar as simulações e o comparativo entre os algoritmos de roteamento no cenário MB-EON, utilizou-se um simulador em Python (SONDA [38]). O princípio de funcionamento desse simulador consiste em verificar quatro condições básicas para que uma chamada 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 foi o do primeiro encaixe (*First Fit*). Para cada solicitação de chamada, a alocação do formato de modulação seguiu a ordem do mais eficiente ao menos eficiente em termos espectrais. Considerou-se a topologia NSFNet e que todos os enlaces utilizam fibra óptica do tipo G652.D [36]. 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 dos *slots* 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 (7) taxa de transmissão de bit de 100 a 500 Gbps com distribuição uniforme.

A metodologia para se determinar a potência óptica de entrada por *slot* (P_{in}) para cada banda de transmissão tomou como base a análise da viabilidade da maior rota, dentre as mais curtas encontradas pelo algoritmo de Dijkstra, utilizando a distância física como função custo do enlace. Assumiu-se que a solicitação de chamada que utilizasse essa maior rota deveria ter QoT igual ou acima do limiar correspondente ($OSNR_{out} \geq OSNR_{th}$), quando considerados: a maior taxa de transmissão de bit (500 Gbps) e o formato de modulação menos eficiente (4-QAM). Além disso, o menor valor de carga simulado (2500 Erlangs) foi obtido considerando: (1) 1000 bloqueios e (2) um valor de probabilidade de bloqueio de chamadas igual, ou próximo, a 10^{-2} . Os parâmetros referentes às bandas S, C e L se encontram descritos na Tabela II.

IV. RESULTADOS

Fig. 1 ilustra a probabilidade de bloqueio de chamadas em função do número de iterações, considerando as bandas S, C e

TABELA II: Parâmetros referentes às bandas S, C e L.

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	5,5	6
Coefficiente de atenuação (dB/km)	0,220	0,191	0,200
Potência óptica de entrada (dBm)	-0,38	-3,66	-2,78

L, para as estratégias PSR-C e PSR-O. Percebe-se que o PSR-C converge em uma iteração menor (137) quando comparado ao PSR-O (352). No entanto, o PSR-O ($PB \approx 2,1 \times 10^{-3}$) obtém uma redução no valor da probabilidade de bloqueio de chamadas de aproximadamente 47,50%, em comparação com o PSR-C ($PB \approx 4,0 \times 10^{-3}$). Com isso, observa-se que a modificação na função custo do PSR-C traz melhorias no processo de otimização da técnica de computação evolutiva utilizada (PSO), no aspecto do desempenho da rede.

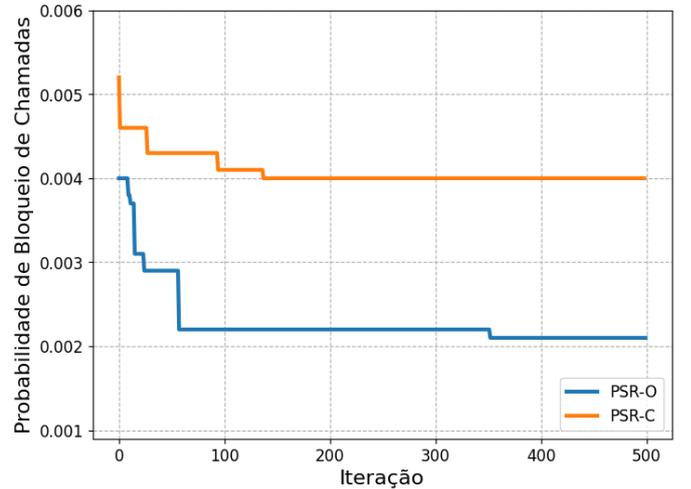


Fig. 1: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função do número de iterações, considerando o PSR-C e o PSR-O.

Fig. 2 ilustra a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga na rede, considerando os algoritmos de roteamento: (a) SP; (b) LOR_C; (c) PSR-C e (d) PSR-O. Pode-se perceber que o PSR-O possui melhor desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, para todo o intervalo analisado de carga na rede, em comparação com os demais algoritmos de roteamento. Isso reflete a característica da função custo otimizada em considerar a penalidade física, por meio da distância física normalizada, e o estado da rede, por meio do número de encaixes de *slots* disponíveis no espectro analisado. No valor de carga igual a 2500 Erlangs, considerando o SP como referência ($PB \approx 7,5 \times 10^{-3}$), o LOR_C apresenta uma redução de probabilidade de bloqueio de chamadas de aproximadamente 50,67% ($PB \approx 3,7 \times 10^{-3}$), o PSR-C de 52,00% ($PB \approx 3,6 \times 10^{-3}$) e o PSR-O de 85,33% ($PB \approx 1,1 \times 10^{-3}$).

Fig. 3 ilustra a distribuição das chamadas aceitas entre os formatos de modulação, considerando os algoritmos de roteamento: (a) SP; (b) LOR_C; (c) PSR-C e (d) PSR-O. É

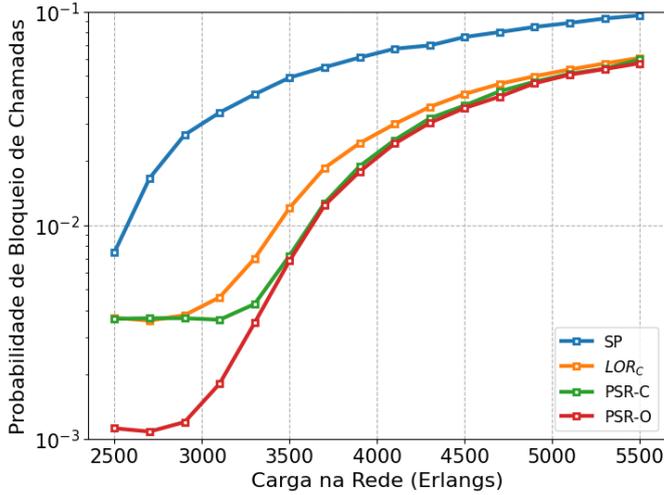


Fig. 2: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga na rede, considerando os algoritmos de roteamento: (a) SP; (b) LOR_C; (c) PSR-C e (d) PSR-O.

interessante notar que a ordem de utilização dos formatos de modulação é praticamente a mesma (16-QAM → 32-QAM → 64-QAM → 8-QAM → 4-QAM), independente do algoritmo de roteamento. As porcentagens descritas em Fig. 3 (Fig. 4) se referem às porções do número de chamadas aceitas, considerando o total obtido pela estratégia PSR-O como referência, entre os formatos de modulação (as bandas de transmissão) para 2500 Erlangs.

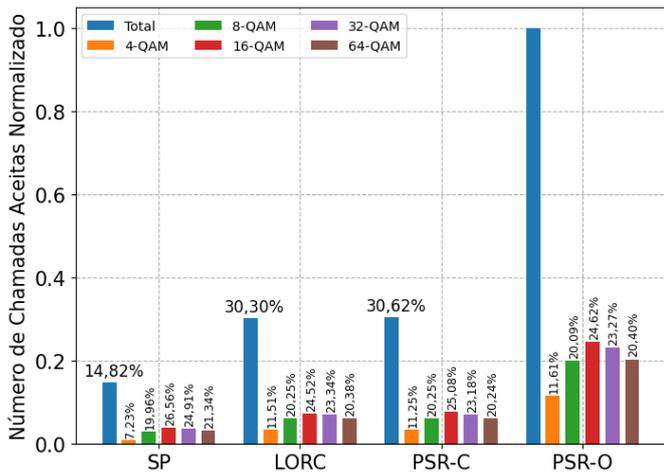


Fig. 3: Distribuição das chamadas aceitas entre os formatos de modulação, considerando os algoritmos de roteamento: (a) SP; (b) LOR_C; (c) PSR-C e (d) PSR-O.

Fig. 4 ilustra a distribuição das chamadas aceitas entre as bandas de transmissão, considerando os algoritmos de roteamento: (a) SP; (b) LOR_C; (c) PSR-C e (d) PSR-O. Observa-se que grande parte das chamadas aceitas são alocadas na banda C para todos os algoritmos de roteamento analisados. Em seguida, as chamadas são alocadas na banda L e depois na banda S. Essa sequência, de certa forma, reflete a quantidade de ruído adicionada pelos amplificadores ópticos, de modo que

a próxima banda de transmissão é selecionada para admissão das chamadas quando a anterior já se encontra com o espectro de frequência preenchido. Pelo fato do SP encontrar a mesma rota, devido à sua função custo ser estática, o número de chamadas aceitas na banda C se torna menor quando comparado com os algoritmos que consideram o aspecto dinâmico da rede (LOR_C, PSR-C e PSR-O). Os algoritmos PSRs (PSR-C e PSR-O) apresentam melhor desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, sendo que o PSR-C possui mais chamadas admitidas devido à sua função custo possuir menos parâmetros e tornar o processo de otimização mais eficiente.

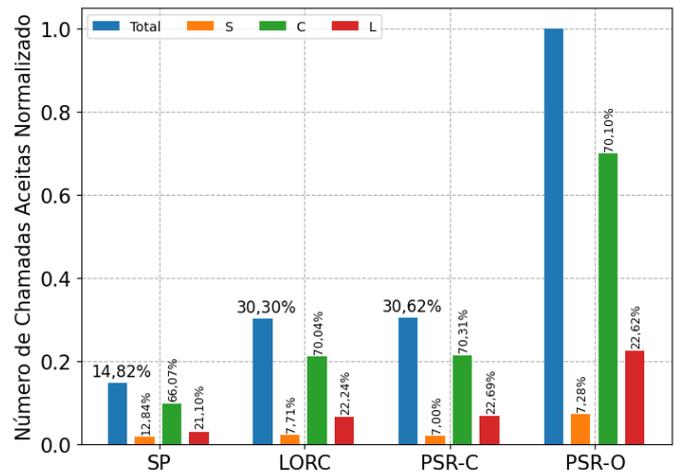


Fig. 4: Distribuição das chamadas aceitas entre as bandas de transmissão, considerando os algoritmos de roteamento: (a) SP; (b) LOR_C; (c) PSR-C e (d) PSR-O.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi implementado o algoritmo PSR no cenário de redes ópticas elásticas multibandas. Para isso, considerou-se o ruído ASE, gerado pelos amplificadores ópticos presentes ao longo dos nós e enlaces ópticos, como penalidade física e três bandas de transmissão (S, C e L).

O PSR com sua função custo original (PSR-C) foi comparado com o que possui a função custo modificada (PSR-O), considerando as variáveis de distância física normalizada e o número de possibilidades de como se encaixar o conjunto de *slots* solicitados na grade de *slots* disponíveis. Esses PSRs foram comparados com os algoritmos de roteamento: SP e LOR_C, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas.

O PSR-O obteve melhor desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, para todo o intervalo analisado de carga na rede, em comparação com os demais algoritmos de roteamento. No valor de carga igual a 2500 Erlangs, considerando o SP como referência, o LOR_C apresentou uma redução de probabilidade de bloqueio de chamadas de aproximadamente 50,67%, o PSR-C de 52,00% e o PSR-O de 85,33%. Com relação à distribuição dos formatos de modulação entre as chamadas aceitas, todos os algoritmos de roteamento obtiveram a mesma ordem de preferência na admissão de chamadas (16-QAM → 32-QAM → 64-QAM → 8-QAM → 4-QAM). Com relação à distribuição

das chamadas entre as bandas de transmissão disponíveis, a sequência $C \rightarrow L \rightarrow S$ foi observada por todos os algoritmos de roteamento, em que o PSR-O superou todos os demais em termos de chamadas aceitas.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] R. Sadeghi *et al.*, "Transparent vs translucent multi-band optical networking: capacity and energy analyses," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 11, pp. 3486–3498, 2022.
- [3] N. Sambo *et al.*, "Provisioning in multi-band optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 9, pp. 2598–2605, 2020.
- [4] Q. Yao *et al.*, "Snr re-verification-based routing, band, modulation, and spectrum assignment in hybrid c+c+1 optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 11, pp. 3456–3469, 2022.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Y. Zhang *et al.*, "Survivable rnsa 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.
- [9] Z. Yang, R. Gu, and Y. Ji, "Virtual network embedding over multi-band elastic optical network based on cross-matching mechanism and hyper-graph theory," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 20, no. 4, pp. 4681–4697, 2023.
- [10] 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.
- [11] S. Hosseini *et al.*, "An ilp formulation for partially upgrading elastic optical networks to multi-band," in *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. IEEE, 2023, pp. 1–5.
- [12] —, "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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] D. A. R. Chaves, D. O. Aguiar, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, "A methodology to design the link cost functions for impairment aware routing algorithms in optical networks," *Photonic Networking Communications*, vol. 22, pp. 133 – 150, 2011.
- [18] R. Almeida-Júnior *et al.*, "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, Fevereiro 2013.
- [19] 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*, 2008, pp. 158 – 161.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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 (SBTr)*. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2008, pp. 1–6.
- [23] —, "Novel adaptive routing algorithm for all-optical networks based on power series and particle swarm optimization," in *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, vol. 1, 2009, pp. 1–5.
- [24] —, "A methodology to design the link cost functions for impairment aware routing algorithms in optical networks," *Photonic Network Communications*, vol. 22, pp. 133–150, 2011.
- [25] A. V. S. Xavier, R. C. L. Silva, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, and D. A. R. Chaves, "An adaptive-alternative routing algorithm for all-optical networks," in *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. IEEE, 2011, pp. 719–723.
- [26] J. F. Martins-Filho *et al.*, "Assessment of the power series routing algorithm in translucent, transparent and opaque optical networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 941–944, 2012.
- [27] C. J. A. Bastos-Filho *et al.*, "An adaptive path restoration algorithm based on power series routing for all-optical networks," in *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2013, pp. 1–4.
- [28] —, "Comparing osnr based policies for an adaptive-alternative iarwa algorithm applied to all-optical networks," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 12, pp. 694–706, 2013.
- [29] A. V. S. Xavier *et al.*, "The nrpsr-elastic routing algorithm for flexible grid optical networks," in *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2013, pp. 1–5.
- [30] M. A. Cavalcante *et al.*, "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.
- [31] A. V. S. Xavier *et al.*, "Power series-based algorithm for dedicated protection in wdm optical networks," *Photonic Network Communications*, vol. 32, pp. 40–53, 2016.
- [32] M. A. Cavalcante *et al.*, "Optimizing the cost function of power series routing algorithm for transparent elastic optical networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 29, pp. 57–64, 2018.
- [33] C. N. Lira *et al.*, "Meta-heuristic procedure for enhanced spectrum fragmentation assessment in elastic optical networks," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 333–337, 2020.
- [34] J. J. Rêgo Leite *et al.*, "Análise do impacto da utilização de variações do pso no algoritmo de roteamento por série de potências em um cenário de rede óptica elástica," in *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBTr)*. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2022, pp. 1–2.
- [35] C. J. N. Lira *et al.*, "Spectrum allocation using multiparameter optimization in elastic optical networks," *Computer Networks*, vol. 220, p. 109478, 2023.
- [36] A. A. Santos-Júnior *et al.*, "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.
- [37] E. B. Sarmento *et al.*, "Análise de desempenho de arquiteturas de nó e de enlace em redes ópticas multibandas," in *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBTr)*. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2023, pp. 1–5.
- [38] —, "SONDA: Simulador em python para redes óticas," in *X Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM)*. IECOM, 2020, pp. 1–2.