

Aplicação de Roteamento Multicaminho em uma Rede Óptica Elástica Multibanda

Gabrielly de Souza Lima, José Roberto do Nascimento Arcanjo, Helder Alves Pereira

Resumo—Neste artigo, propõe-se um esquema de provisionamento de conexões que considera roteamento multicaminho em redes ópticas elásticas multibandas. Considerou-se, como penalidade física, o ruído de emissão espontânea amplificada, gerada nos amplificadores ópticos dispostos ao longo dos nós e dos enlaces. Os resultados são avaliados por meio da probabilidade de bloqueio de conexões (PBC) e pela disponibilidade normalizada de encaixes de blocos de fatias do espectro de frequência. Observou-se que a estratégia proposta obteve melhor desempenho em toda variação de carga considerada, obtendo uma redução de até 58,82% na PBC quando comparada com o uso de uma heurística clássica utilizada na literatura.

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

Abstract—In this paper, we propose a connection provisioning scheme that considers multipath routing in multiband elastic optical networks. The amplified spontaneous emission noise generated in the optical amplifiers located along the nodes and links was considered as physical impairment. The results are evaluated using the calls blocking probability (CBP) and the normalized availability of slot block fittings. It was observed that the proposed strategy obtained better performance for all considered load variation, obtaining a reduction of up to 58.82% in CBP when compared to the use of a classical heuristic used in the literature.

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

I. INTRODUÇÃO

A demanda por tráfego de dados tem crescido bastante nos últimos anos. Aplicações como tecnologia móvel de quinta geração (5G), realidade aumentada e transmissão de vídeo (*streaming*) com alta definição devem passar a exigir evoluções ainda maiores nas tecnologias de informação e comunicação, demandando, desse modo, mais largura de banda [1]. As redes ópticas multibandas (MB) têm sido consideradas como uma solução promissora para satisfazer tais requisitos. Nessas redes, os sinais podem ser transmitidos utilizando fibras ópticas monomodo (SMF – *Single Mode Fiber*), abrangendo uma maior faixa de frequências, promovendo, assim, o aumento da capacidade do sistema óptico de transmissão [1].

As redes ópticas MB apresentam a vantagem de utilizar a infraestrutura das redes já existentes, diminuindo assim o custo

Gabrielly de Souza Lima faz parte da Unidade Acadêmica de Ciência da Computação, José Roberto do Nascimento Arcanjo e Helder Alves Pereira fazem parte da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, ambos do Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, e-mails: gabrielly.souza.lima@ccc.ufcg.edu.br; jose.arcanjo@ee.ufcg.edu.br e helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

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 ao CNPq o apoio financeiro.

de sua implementação nos sistemas ópticos de transmissão [2]. Todavia, nos sistemas que envolvem transmissão multibandas, os efeitos não lineares ocorridos nas fibras ópticas são ainda mais evidenciados, haja vista que esses dependem de fatores como largura de banda do sinal transmitido, por exemplo. Um dos principais efeitos não-lineares associados à tecnologia MB e capaz de influenciar o desempenho dos sistemas é o efeito Raman estimulado (SRS – *Stimulated Raman Scattering*) [3]. O ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) também ganha notoriedade nessas redes, tendo em conta a possibilidade de nelas estarem presentes amplificadores ópticos com valores diversos de figuras de ruído, por exemplo [4]. Isso posto, a análise da qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) em redes ópticas MB, considerando tais penalidades, é essencial para implementação de projetos de redes com arquiteturas mais eficientes [5].

Destarte, determinar rotas e atribuir recursos nessas redes de forma eficiente representam etapas importantes para admissão das conexões solicitadas pela rede. Quanto ao aspecto do roteamento, na literatura de redes ópticas, encontram-se estratégias que consideram, basicamente, uma única rota (*singlepath*), rotas alternativas (*alternate paths*) e múltiplos caminhos (*multipath*) entre qualquer par fonte-destino da rede. Essa última estratégia, diferente das outras duas, considera que o conjunto de fatias do espectro (*slot*), que compõem o sinal óptico, pode ser dividido e distribuído entre rotas diferentes, desde o nó fonte até o nó destino [6]–[11]. Com relação ao tema de roteamento multicaminho, encontram-se na literatura de redes ópticas alguns trabalhos interessantes [6]–[11]. No entanto, até o presente momento, não foi encontrado nenhum artigo que trate da aplicação dessa técnica para estabelecimento de rotas no cenário de redes ópticas elásticas multibandas (MB-EON – *Multiband Elastic Optical Network*).

Neste artigo, pela primeira vez na literatura, propõe-se um esquema de provisionamento de conexões que considera roteamento multicaminho para MB-EONs. Para avaliar o desempenho da estratégia proposta, foram consideradas as métricas de probabilidade de bloqueio de conexões (PBC) e a disponibilidade normalizada de encaixes de blocos de *slots* (DNEBS). Considerou-se, como penalidade física, apenas o ruído de emissão espontânea amplificada, gerada nos amplificadores ópticos de potência, de linha e pré-amplificadores, assumindo que a potência de entrada por banda de transmissão utilizada não é suficiente para que efeitos de não-linearidade e Raman estimulado sejam relevantes ao longo da transmissão dos sinais ópticos. Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresenta-se o conceito de roteamento

multicaminho utilizado na literatura, bem como descreve-se o esquema de provisionamento de conexões proposto para o cenário de MB-EONs. Na Seção III, descreve-se o cenário de simulação, bem como as métricas de avaliação utilizadas. Na Seção IV, apresentam-se os resultados e, por fim, na Seção V, as conclusões do artigo.

II. ROTEAMENTO MULTICAMINHO

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 [12]–[20]. 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*) [21]–[24] para resolver esse tipo de problema.

Diferente desses métodos utilizados na literatura de MB-EONs, o roteamento multicaminho permite que o conjunto de *slots* associados a uma determinada conexão seja dividido e encaminhado por múltiplas rotas simultaneamente, desde a origem até o destino. Essa abordagem tem como objetivo melhorar a taxa de aceitação de conexões e a utilização dos recursos ópticos disponíveis, sobretudo em contextos onde o espectro esteja fragmentado ou ocorra congestionamento em determinadas bandas de transmissão ou rotas [6]–[11]. Até o presente momento, não encontramos na literatura trabalhos que envolvam a aplicação de roteamento multicaminho no contexto de MB-EONs.

A. Esquema de Provisionamento de Conexões Proposto

O esquema de provisionamento de conexões proposto neste artigo considera que, para qualquer solicitação de conexão, deve-se estabelecê-la utilizando o conceito de algoritmo de roteamento multicaminho. Esse conceito toma por base a quebra uniforme do bloco de *slots* solicitados em $k + 1$ novos blocos de *slots*. Esses novos blocos de *slots* representam $k + 1$ subconexões que precisam ser atendidas para o mesmo par fonte-destino em análise. Fig. 1 ilustra o fluxograma do esquema de provisionamento de conexões.

Para cada conexão principal, tem-se o par origem-destino e a taxa de transmissão de bit solicitados. Com isso, utiliza-se o algoritmo de Dijkstra, considerando a distância física como função custo do enlace, para determinar a rota. Após determinar a rota, utiliza-se a atribuição de formato de modulação do mais eficiente ao menos eficiente, em termos espectrais. Para cada formato de modulação, calcula-se a quantidade de *slots* necessários para atender a conexão principal. Essa quantidade de *slots* é dividida em $k + 1$ blocos de *slots*, representando $k + 1$ solicitações de subconexões. Assim sendo, para cada solicitação de subconexão, verifica-se a possibilidade de aloca-la, caso haja recursos espectrais disponíveis, cujos *slots* sejam contínuos e contíguos, e QoT aceitável no nó destino. As solicitações das subconexões podem ser estabelecidas na mesma banda de transmissão ou até mesmo em outras bandas de transmissão, no entanto, a rota permanece a mesma da solicitação de conexão principal. Caso alguma solicitação de subconexão não possa ser estabelecida, ou devido à falta

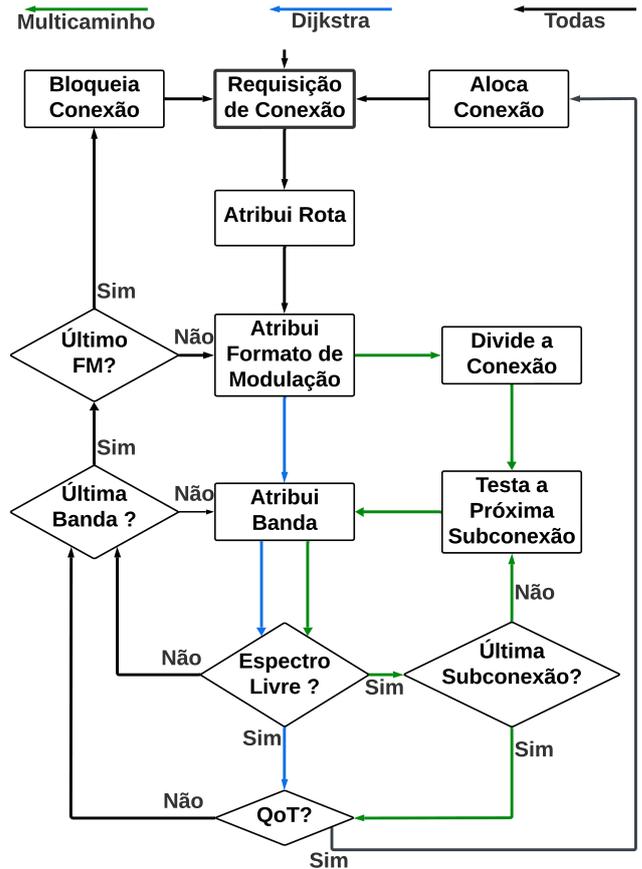


Fig. 1. Fluxograma do esquema de provisionamento de conexões proposto.

de recursos espectrais ou de QoT, a conexão principal é bloqueada. Caso contrário, cada subconexão é estabelecida na rede e o processo continua até que todas as solicitações de conexões principais sejam verificadas. A fase de atribuição de banda de transmissão segue a ordem fixa: $C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E \rightarrow U$, enquanto que a fase de atribuição espectral utiliza o algoritmo de primeiro encaixe (*First-Fit*). A complexidade do esquema de provisionamento proposto é $\mathcal{O}(M \cdot R \cdot K \cdot T \cdot P)$, em que M representa o número de conexões principais, R o número máximo de rotas por conexão principal, K o número máximo de quebras da conexão principal, T o número de bandas de transmissão e P o custo de verificação de *slots* ao longo da rota.

III. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Neste artigo, foi considerada uma arquitetura de nó baseada na de comutação espectral [19] e adaptada para redes MB-EONs [20]. 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 QoT no nó receptor, pode ser obtido da seguinte forma [25]:

$$\text{OSNR}_{\text{th}} = \frac{1}{2} \frac{B}{B_{\text{Ref}}} \text{snr}_b, \quad (1)$$

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^{-2} e utilizando código corretor de erro (FEC – *Forward Error Correction*), para o formato de modulação 4-QAM, tem-se que $\text{snr}_b = 4,32$ dB, 16-QAM, $\text{snr}_b = 7,88$ dB, e 64-QAM, $\text{snr}_b = 11,95$ dB [26].

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 [25]:

$$\text{OSNR}_{\text{out}} = \frac{P_{\text{in}}}{N_{\text{in}} + N_{\text{AMP-TOTAL}}}, \quad (2)$$

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 [25]:

$$N_{\text{AMP-TOTAL}} = N_{\text{AMP-AP}} + N_{\text{AMP-AL}} + N_{\text{AMP-PA}}, \quad (3)$$

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 BA+ILA[S+1]+PA (Subseção 3.1, ref [27]).

Para realizar as simulações, considerou-se a topologia US Backbone e que todos os enlaces utilizam fibra óptica do tipo G652.D [25]. Os parâmetros utilizados nas simulações foram os seguintes: (1) distância entre os amplificadores ópticos de linha de 50 km; (2) formatos de modulação: 4, 16 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 400, 600 e 800 Gbps.

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 equação:

$$\delta = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=0}^{L-1} \frac{\sum_{k=0, T[k] \geq b_{i,j}}^{Bl'-1} \sum_{j=0}^{Bl-1} \max[0, (T[k] - b_{i,j} + 1)]}{\sum_{j=0}^{Bl-1} (St - b_{i,j} + 1)}, \quad (4)$$

em que L 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.

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 conexão que utilizasse essa maior rota deveria ter QoT satisfatória ($\text{OSNR}_{\text{out}} \geq \text{OSNR}_{\text{th}}$), quando considerados: a maior taxa de transmissão de bit (800 Gbps) e o formato de modulação menos eficiente em termos espectrais (4-QAM). Além disso, o menor valor de carga simulado foi obtido considerando: (1) 10^5 conexões e (2) um valor de probabilidade de bloqueio de conexões igual, ou próximo, a 10^{-2} . Os parâmetros referentes às bandas E, S, C, L e U se encontram descritos na Tabela I [28].

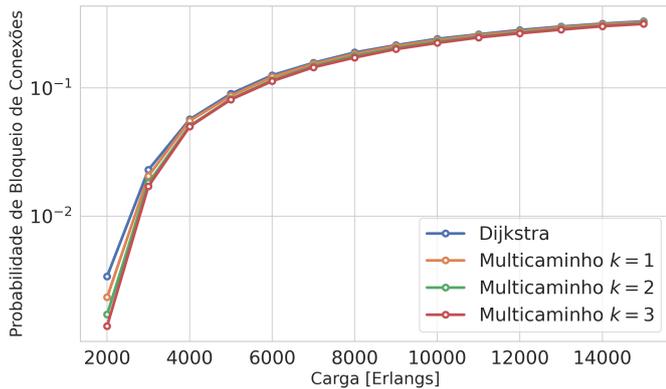
IV. RESULTADOS

Fig. 2 ilustra a probabilidade de bloqueio de conexões em função da carga, considerando o algoritmo de Dijkstra e a estratégia multicaminho proposta para os valores de k de 1 a 3. Percebe-se que quanto maior o valor de k , correspondente ao número de divisões do bloco de *slots* da conexão principal, menor o valor da probabilidade de bloqueio de conexões para variações no valor de carga da rede. Isso se deve ao fato de que a técnica de roteamento por multicaminho leva em consideração a diminuição no tamanho do bloco de *slots* da conexão principal para tentar encaixar blocos de *slots* menores no espectro fragmentado e viabilizar o estabelecimento dessa conexão. Quando se analisa o valor de carga de 2000 Erlangs, tomando-se como referência o valor obtido pelo algoritmo de Dijkstra ($PBC \approx 3,40 \times 10^{-3}$), obtém-se uma redução na probabilidade de bloqueio de conexões de aproximadamente 32,35% ($PBC \approx 2,30 \times 10^{-3}$), quando se considera o uso da estratégia proposta para $k = 1$, de 50,00% ($PBC \approx 1,70 \times 10^{-3}$), para $k = 2$, e de 58,82% ($PBC \approx 1,40 \times 10^{-3}$), para $k = 3$. Para o valor de carga de 15000 Erlangs, tomando-se como referência o valor obtido pelo algoritmo de Dijkstra ($PBC \approx 0,3315$), obtém-se uma redução na probabilidade de bloqueio de conexões de aproximadamente 1,21% ($PBC \approx 0,3275$), quando se considera o uso da estratégia proposta para $k = 1$, de 2,87% ($PBC \approx 0,3220$), para $k = 2$, e de 4,68% ($PBC \approx 0,3160z$), para $k = 3$.

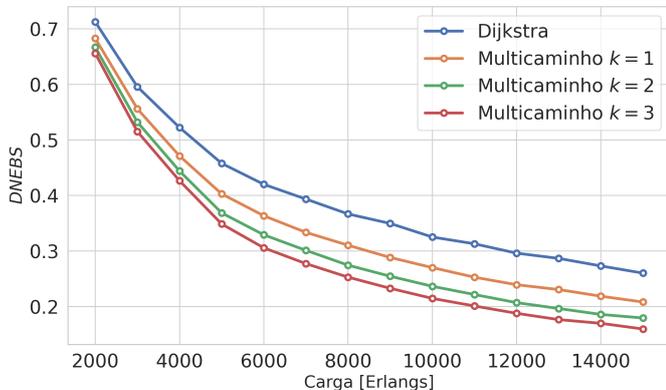
Fig. 3 ilustra a densidade normalizada de encaixe de blocos de *slots* (DNEBS) em função da carga, considerando o algoritmo de Dijkstra e a estratégia de multicaminho proposta para os valores de k de 1 a 3. A métrica DNEBS proposta, para análise da fragmentação da rede, leva em consideração o número de encaixes de todos os blocos de *slots* possíveis na rede. Desse modo, quanto maior o seu valor, maior a possibilidade de se encaixar os blocos de *slots* solicitados pelo plano de controle. Com isso, tomando-se como referência o resultado obtido pelo algoritmo de Dijkstra ($DNEBS \approx 0,7124$), para o valor de carga igual a 2000 Erlangs, percebe-se que, utilizando-se a estratégia de multicaminho proposta neste artigo, para $k = 1$, obtém-se uma redução de aproximadamente

TABELA I
 PARÂMETROS REFERENTES ÀS BANDAS DE TRANSMISSÃO E, S, C, L E U [28].

Parâmetros	Banda E	Banda S	Banda C	Banda L	Banda U
Frequência inicial (THz)	205,48	196,08	191,69	184,62	179,10
Frequência final (THz)	220,59	205,48	196,08	191,69	184,60
Número de <i>slots</i>	1209	752	352	566	440
Figura de ruído (dB)	6,0	7,0	5,5	6,0	6,0
Coefficiente de atenuação (dB/km)	0,283	0,220	0,191	0,200	0,264
Potência óptica de entrada (dBm)	-0,38	-1,50	-3,54	-2,99	0,00


 Fig. 2. Probabilidade de bloqueio de conexões em função da carga, considerando o algoritmo de Dijkstra e a estratégia multicaminho proposta para os valores de k de 1 a 3.

4,18% ($DNEBS \approx 0,6826$). Para $k = 2$, obtém-se uma redução de aproximadamente 6,41% ($DNEBS \approx 0,6667$) e, para $k = 3$, obtém-se uma redução de aproximadamente 7,96% ($DNEBS \approx 0,6557$). Para o valor de carga igual a 15000 Erlangs, tomando-se como referência o resultado obtido pelo algoritmo de Dijkstra ($DNEBS \approx 0,2602$), para $k = 1$, obtém-se uma redução de aproximadamente 19,98% ($DNEBS \approx 0,2082$). Para $k = 2$, obtém-se uma redução de aproximadamente 31,01% ($DNEBS \approx 0,1795$) e, para $k = 3$, obtém-se uma redução de aproximadamente $DNEBS \approx 38,66\%$ ($0,1596$).


 Fig. 3. Densidade normalizada de encaixe de blocos de *slots* em função da carga, considerando o algoritmo de Dijkstra e a estratégia de multicaminho proposta para os valores de k de 1 a 3.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, pela primeira vez na literatura, propôs-se um esquema de provisionamento de conexões que considera roteamento multicaminho em redes ópticas elásticas multibandas. Os resultados foram avaliados por meio da probabilidade de bloqueio de conexões e pela disponibilidade normalizada de encaixes de blocos de *slots*. Considerou-se, como penalidade física, apenas o ruído de emissão espontânea amplificada, gerada nos amplificadores ópticos de potência, de linha e pré-amplificadores, assumindo que a potência de entrada por banda de transmissão utilizada não era suficiente para que efeitos de não-linearidade e Raman estimulado fossem relevantes ao longo da transmissão dos sinais ópticos.

Observou-se que a estratégia de provisionamento proposta, considerando a aplicação do roteamento multicaminho sempre que a conexão fosse solicitada pela rede, obteve melhor desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de conexões, para toda a variação de carga da rede no cenário avaliado neste artigo. Quanto maior o valor do número de divisões do bloco de *slots* da conexão principal (k), maior foi a redução no valor da *PBC*, em comparação com o algoritmo de Dijkstra. Com relação à outra métrica de avaliação ($DNEBS$), observou-se uma diminuição no seu valor à medida em que o valor de k aumentava. Isso se deve ao fato de que quanto menor o bloco de *slots* a ser considerado, maior a possibilidade desse ser encaixado no espectro de frequência disponível, diminuindo essa métrica para futuras conexões, tornando o espectro mais compactado. No entanto, mesmo com esse valor da métrica $DNEBS$ diminuído com relação ao obtido pelo algoritmo de Dijkstra, foi constatado uma redução máxima de até 58,82% na *PBC* (estratégia proposta com $k = 3$ e carga da rede igual a 2000 Erlangs).

REFERÊNCIAS

- [1] R. Sadeghi et al., “Transparent vs translucent multi-band optical networking: capacity and energy analyses,” *Journal of Lightwave Technology*, v. 40, n. 11, pp. 3486–3498, 2022.
- [2] A. Ferrari et al., “Assessment on the achievable throughput of multi-band ITU-T G. 652. D fiber transmission systems,” *Journal of Lightwave Technology*, v. 38, n. 16, pp. 4279–4291, 2020.

- [3] E. Paz e G. Saavedra, “Maximum transmission reach for optical signals in elastic optical networks employing band division multiplexing,” *arXiv preprint arXiv:2011.03671*, 2020.
- [4] R. K. Jana et al., “Performance evaluation of conventional spectrum-allocation policies for C+ L band elastic optical networks,” em *IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, IEEE, 2021, pp. 348–353.
- [5] M. Cantono et al., “Physical layer performance of multi-band optical line systems using Raman amplification,” *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 11, n. 1, A103–A110, 2019.
- [6] R. Agarwal e R. Bhatia, “Multipath routing using genetic algorithm in elastic optical network,” *Journal of Optics*, v. 53, n. 3, pp. 2316–2321, 2024.
- [7] S. Paira, J. Halder, M. Chatterjee et al., “On energy efficient survivable multipath based approaches in space division multiplexing elastic optical network: Crosstalk-aware and fragmentation-aware,” *IEEE Access*, v. 8, pp. 47 344–47 356, 2020.
- [8] J. Halder, T. Acharya, M. Chatterjee et al., “On spectrum and energy efficient survivable multipath routing in off-line elastic optical network,” *Computer Communications*, v. 160, pp. 375–387, 2020.
- [9] J. Halder et al., “A novel RSCA scheme for offline survivable SDM-EON with advance reservation,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, v. 19, n. 2, pp. 804–817, 2022.
- [10] J. Thangaraj et al., “Multi-path provisioning in elastic optical network with dynamic on-request optimal defragmentation strategy,” *Optical Switching and Networking*, v. 41, p. 100 607, 2021.
- [11] C. Liu, K. Wang, W. Zhan et al., “Multi-path routing spectrum allocation algorithm based on fragment sensing and energy saving,” em *International Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications*, 2021, pp. 50–54.
- [12] M. Nakagawa et al., “Performance evaluation of multi-band optical networks employing distance-adaptive resource allocation,” em *Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, IEEE, 2020, pp. 1–3.
- [13] F. Calderón et al., “Heuristic approaches for dynamic provisioning in multi-band elastic optical networks,” *IEEE Communications Letters*, v. 26, n. 2, pp. 379–383, 2021.
- [14] B. Bao et al., “LoRB: link-oriented resource balancing scheme for hybrid C/C+ L band elastic optical networks,” *Optical Fiber Technology*, v. 74, p. 103 071, 2022.
- [15] Y. Zhang et al., “Survivable RMSA combined with QoT estimation and fault prediction in multi-band elastic optical networks,” em *International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP)*, SPIE, vol. 12478, 2022, pp. 359–362.
- [16] Q. Yao et al., “SNR re-verification-based routing, band, modulation, and spectrum assignment in hybrid C-C+ L optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, v. 40, n. 11, pp. 3456–3469, 2022.
- [17] Z. Yang, R. Gu e 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*, v. 20, n. 4, pp. 4681–4697, 2023.
- [18] A. Pagès et al., “SDN-based band-adaptive quality assurance scheme in support of heterogenous B5G services over sliceable multi-band optical networks,” *Optical Switching and Networking*, v. 47, p. 100 721, 2023.
- [19] S. Hosseini et al., “An ILP formulation for partially upgrading elastic optical networks to multi-band,” em *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, IEEE, 2023, pp. 1–5.
- [20] S. Hosseini et al., “Migration of elastic optical networks to the C+ L-bands subject to a partial upgrade of the number of erbium-doped fiber amplifiers,” *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 15, n. 11, F22–F35, 2023.
- [21] A. B. Terki, J. Pedro, A. Eira et al., “Routing and spectrum assignment assisted by reinforcement learning in multi-band optical networks,” em *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Optica Publishing Group, 2022, Tu5–63.
- [22] L. Zhao et al., “A RSA Policy with Failure Probability Based on Reinforcement Learning in Multi-band Optical Network,” em *International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, IEEE, 2022, pp. 1–3.
- [23] A. Beghelli et al., “Approaches to dynamic provisioning in multiband elastic optical networks,” em *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [24] J. L. Ravipudi e M. Brandt-Pearce, “Impairment- and fragmentation-aware dynamic routing, modulation and spectrum allocation in C+ L band elastic optical networks using Q-learning,” *Optical Switching and Networking*, v. 47, p. 100 717, 2023.
- [25] A. A. dos 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*, v. 38, n. 1, pp. 92–104, 2023.
- [26] B. C. Chatterjee, N. Sarma e E. Oki, “Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, n. 3, pp. 1776–1800, 2015.
- [27] J. R. do Nascimento Arcanjo et al., “Analysis of the impact of different node and link architectures on the performance of multiband elastic optical networks,” *Optical Fiber Technology*, v. 88, p. 103 956, 2024, ISSN: 1068-5200.
- [28] A. Ferrari, E. Virgillito e V. Curri, “Band-division vs. space-division multiplexing: a network performance statistical assessment,” *Journal of Lightwave Technology*, v. 38, n. 5, pp. 1041–1049, 2020.