

Algoritmo de Roteamento Evolucionário Adaptativo em Rede Ópticas Elásticas Multibandas Híbridas

Felipe César Maia e Silva, Nayara Ramos dos Santos e Helder Alves Pereira

Resumo— Neste artigo, propõe-se a aplicação de um algoritmo evolucionário adaptativo para se determinar as rotas no contexto de uma rede óptica elástica multibanda híbrida. Para isso, considera-se como penalidade física o ruído de emissão espontânea amplificada, gerado ao longo dos amplificadores ópticos dispostos nos nós e enlaces da rede, três bandas de transmissão (S, C e L) e uma topologia bem conhecida na literatura. Os resultados indicam que, considerando o melhor caso e a probabilidade de bloqueio de conexões (PBC) como métrica de desempenho, nossa proposta obtém 99,49% de redução na PBC em comparação com um algoritmo de roteamento clássico e disponível na literatura.

Palavras-Chave— Emissão Espontânea Amplificada, Multibanda, Penalidade Física, Rede Óptica Híbrida.

Abstract— In this paper, we propose the application of an adaptive evolutionary algorithm to determine routes in the context of an hybrid multiband elastic optical network. For this, the physical penalty considered is the amplified spontaneous emission noise generated along the optical amplifiers located in the nodes and links of the network, three transmission bands (S, C, and L), and an well-known topology in the literature. The results indicate that, considering the best case and the call blocking probability (CBP) as a performance metric, our proposal achieves a 99,49% reduction in CBP compared to a classic routing algorithm available in the literature.

Keywords— Amplified Spontaneous Emission, Hybrid Optical Network, Multiband, Physical Penalty.

I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas multiplexadas por comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) atribuem largura de banda fixa na alocação de espectro, fazendo com que demandas que solicitam taxas de transmissão de bit diferentes ocupem a mesma faixa espectral. Já as redes ópticas elásticas (EON – *Elastic Optical Network*) flexibilizam a largura de banda das conexões de acordo com a taxa de transmissão de bit e o formato de modulação utilizados. Com isso, o espectro óptico passa a ser utilizado de forma mais eficiente em comparação com as redes ópticas WDM [1].

Quanto ao aumento na capacidade das redes ópticas, destacam-se as redes ópticas multiplexadas espacialmente (SDM – *Spatial Division Multiplexing*) e as redes ópticas multibandas [2]. As primeiras utilizam fibras ópticas com múltiplas fibras, núcleos, modos ou até mesmo uma

combinação das características anteriores. As segundas utilizam outras bandas de transmissão disponíveis nas próprias fibras ópticas para aumentar a capacidade de transmissão dos sistemas ópticos. As redes ópticas multibandas resultam em melhor custo-benefício pelo fato de utilizarem a infraestrutura já instalada, sem a necessidade de substituir as fibras ópticas já existentes [2].

Além da classificação das redes ópticas quanto à flexibilidade na atribuição de espectro e ao aumento na capacidade de transmissão, nos últimos anos, novas tecnologias têm surgido no desenvolvimento de fibras ópticas de modo a reduzir os valores dos coeficientes não lineares. Isso se torna importante quando se considera o aumento na capacidade dos sistemas ópticos de transmissão de longa distância, na eficiência espectral e no aumento das taxas de transmissão de bit utilizadas. Nos anos 2010, uma nova classe de fibras ópticas com áreas efetivas na faixa de 120 a 155 μm^2 e coeficiente de atenuação por volta de 0,1460 dB/km foi apresentada para uso em sistemas terrestres e submarinos [1]. Nesse cenário, fibras ópticas com valores ultra baixos do coeficiente de atenuação (ULL – *Ultra-Low Loss*) se tornam eficientes em melhorar a relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*) dos sistemas ópticos de transmissão [3].

Desde que a vida útil de um cabo de fibra óptica é relatada na literatura como possuindo de 20 a 25 anos, espera-se que grande parte das instaladas seja atualizada em breve [4]. No entanto, atualizar todas as fibras ópticas de uma só vez não só representa um custo elevado como também demanda recursos de mão de obra, logística de alocação, utilização e substituição de equipamentos e intervenção de locais bastante populosos [4]. Desse modo, operadores de rede atualizariam apenas uma parte dos enlaces por etapa de modo a atualizar progressivamente os enlaces com fibras ópticas ULL [5].

Nesse contexto, redes ópticas que possuem parte de sua estrutura física com enlaces contendo um tipo de fibra óptica, geralmente do tipo G652-D [2], [6], e outra parte contendo fibras ópticas ULL (PSCF-130 [7]) são chamadas de redes ópticas híbridas (ROH) [3]. Nessas redes, o problema de se determinar rotas passa pela seleção do tipo de fibra óptica, que pode impactar no desempenho da rede, em termos de probabilidade de bloqueio de conexões (PBC), visto que nos enlaces ópticos contendo fibras ópticas ULL ocorre uma menor degradação da relação sinal-ruído óptica do sinal propagante [3].

Neste artigo, propõe-se a aplicação de um algoritmo evolucionário adaptativo para se determinar as rotas no contexto de uma rede óptica elástica multibanda híbrida (ROEMBH). Para isso, considera-se como penalidade física o ruído de emissão

Felipe César Maia e Silva é estudante do curso de Doutorado 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.

Nayara Ramos dos Santos 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-mail: nayara.ramos.santos@ee.ufcg.edu.br e helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*), gerado ao longo dos amplificadores ópticos dispostos nos nós e enlaces da rede, e três bandas de transmissão (S, C e L). Está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresenta-se o conceito de redes ópticas híbridas, bem como o estado da arte sobre técnicas de roteamento utilizadas nessas redes. Na Seção III, descreve-se o algoritmo evolucionário adaptativo aplicado no contexto de redes ópticas elásticas multibandas híbridas. Na Seção IV, define-se a configuração do cenário de simulação. Na Seção V, os resultados são apresentados e discutidos e, por fim, na Seção VI, as conclusões.

II. ESTADO DA ARTE SOBRE ROTEAMENTO EM REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS

O estudo de como substituir as fibras ópticas monomodo padrão (SSMF – *Standard Single Mode Fiber*) gradualmente foi investigado por Guan *et al.* em 2017 [3]. Nesse trabalho, os autores propuseram três estratégias. Na primeira, os enlaces eram elencados de forma crescente de acordo com suas distâncias físicas e os mais longos eram substituídos (PL – *Physical Length*). Na segunda, utilizava-se o algoritmo de Dijkstra, considerando a distância física como função custo, e se obtinha a rota mais curta para cada par fonte-destino. Então, verificava-se o número de rotas que compartilhavam cada enlace da rede. Os enlaces eram elencados em ordem crescente com relação ao número de rotas compartilhadas e então substituídos. Na terceira, utilizava-se um algoritmo de roteamento e atribuição de espectro (RSA – *Routing and Spectrum Assignment*) para verificar as conexões na rede que seriam bloqueadas por falta de qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*). Desse modo, os enlaces da rota possuíam um contador que, na medida em que as conexões fossem bloqueadas por falta de QoT, esse era incrementado até o final da simulação. Com isso, obtinha-se uma lista ordenada dos enlaces onde ocorreram o maior número de bloqueios e esses seriam substituídos.

Yang *et al.* [8] investigaram os problemas de alocar de forma eficiente enlaces com fibras ópticas ULL e executar algoritmos RSA para estabelecer caminhos ópticos (*lightpaths*) em redes EONs, contendo ambos os tipos de fibra (SSMF e ULL). Para isso, consideraram três heurísticas: (1) substituição aleatória (RND); (2) PL e (3) máxima eficiência espectral (MSE – *Maximum Spectral Efficiency*). A terceira selecionava os enlaces tomando por base a minimização do número máximo de fatias do espectro (*slots*) utilizadas na rede quando todos os *lightpaths* fossem atendidos. O algoritmo conhecido como de janela espectral (SWP – *Spectrum Window Plane*) foi estendido para resolver o problema RSA, considerando redes ópticas híbridas.

Em [9], Li *et al.* investigaram o problema de implantação de fibras ópticas ULL enquanto permitiam a utilização de fibras ópticas SSMF. Os autores apresentaram o conceito de redes EONs com topologias fixas e variáveis. Na primeira, não seria possível a adição de novos enlaces com fibras ópticas ULL e, na segunda, seria possível a adição de novos enlaces com esse tipo de fibra. Para isso, formularam modelos baseados em programação linear inteira mista (MILP – *Mixed Integer Linear Programming*) e quatro heurísticas: (1) PL; (2) rota mais curta

percorrida (SRT – *Shortest Route Traversed*); (3) demanda de tráfego (TD – *Traffic Demand*) e (4) máximo desempenho da rede (MNP – *Maximum Network Performance*). Li *et al.* também propuseram algoritmos de roteamento, atribuição de fibra óptica, de formato de modulação e de espectro (RFMSA – *Routing, Fiber, Modulation Format and Spectrum Assignment*) para estabelecer *lightpaths*, considerando a coexistência de fibras ópticas SSMF e ULL na rede.

Em [10], Ouyang *et al.* propuseram dois algoritmos RFMSA e três estratégias de seleção de fibras ópticas. Com relação aos algoritmos RFMSA, o primeiro se baseava na rota mais curta e o segundo no algoritmo SWP. Com relação às estratégias de seleção de fibra óptica, a primeira selecionava aleatoriamente a fibra disponível em cada enlace ao longo da rota (*random*). A segunda selecionava apenas um único tipo de fibra ao longo da rota (*unmixed*). Por exemplo, a fibra óptica SSMF só seria selecionada em caso do número máximo de *slots* utilizados na rede fosse menor do que quando as fibras ópticas ULL fossem utilizadas. Em caso de empate, a fibra óptica SSMF era selecionada. A terceira poderia considerar o uso de diferentes tipos de fibra óptica ao longo do *lightpath* (*adaptive*), levando em conta o número máximo de *slots* usados na rede e a OSNR do *lightpath*.

Neste artigo, propõe-se a utilização do algoritmo evolucionário adaptativo, chamado de algoritmo de roteamento por série de potências (PSR – *Power Series Routing*) [11], para realização da etapa de roteamento no cenário ROEMBH. Para isso, considerou-se a adaptação dos seguintes algoritmos de roteamento como forma de comparação com os resultados obtidos: (1) de menor distância física (SP – *Shortest Path*) [12], (2) menor número de saltos (MH – *Minimum Hops*), (3) SWP [8], [10] e (4) distância e disponibilidade [12] adaptado para contiguidade de *slots* (LOR_C – *Length and Contiguity Routing*) [13]. Basicamente, o algoritmo de Dijkstra foi modificado, em termos de sua função custo, para cada um dos algoritmos mencionados (SP, MH, SWP 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, $sr_{i,j}$ o número de possibilidades de como se encaixar o conjunto de *slots* solicitados na grade de *slots* disponíveis entre os nós i e j e $OSNR_{ij}$ a relação sinal-ruído óptica entre os nós i e j .

TABELA I
FUNÇÕES CUSTO DOS ALGORITMOS SP, MH, SWP E LOR_C UTILIZADOS COMO COMPARAÇÃO NESTE ARTIGO.

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

III. ALGORITMO DE ROTEAMENTO POR SÉRIE DE POTÊNCIAS

O algoritmo PSR tem duas fases [11]: (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 [14], [15], [16]:

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

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 $a_{i,k}$ 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 ($P = 2$): (1) $x_1 = \frac{d_{i,j}}{D}$ e (2) $x_2 = \frac{1}{sr_{i,j} + 1}$. A implementação dessas duas variáveis no PSR corresponde ao algoritmo PSR_{NDC} proposto por Cavalcante *et al.* [17]. Os parâmetros utilizados pelo PSO na etapa de planejamento são os mesmos descritos por Chaves *et al.* [18].

IV. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Neste artigo, foi considerada uma arquitetura de nó baseada na de comutação espectral [19] e adaptada para redes MB-EONs [2]. Essa arquitetura de nó, em conjunto com a arquitetura de enlace, leva em conta os seguintes dispositivos em sequência, considerando um respectivo enlace: 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) [20]. 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, respectivamente [20]. Considerou-se que os ganhos dos amplificadores ópticos compensam exatamente as perdas de um enlace óptico. Como penalidade física, considerou-se o ruído ASE, gerado nos amplificadores ópticos. Dessa forma, a expressão da relação sinal-ruído óptica no nó destino pode ser calculada do seguinte modo [21]:

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

em que P_{in} representa a potência de entrada por *slot*, N_{in} a potência de ruído gerada no transmissor e $N_{\text{AMP-TOTAL}}$ a potência total de ruído ASE, sendo dada por [21]:

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

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 parcela 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.* [21].

Para realizar a comparação entre as diferentes estratégias de roteamento, em termos de probabilidade de bloqueio de conexões, utilizou-se um simulador proprietário. O princípio de funcionamento desse simulador consiste em verificar quatro condições básicas para que uma conexão seja estabelecida, são elas: (1) banda de transmissão disponível; (2) rota disponível; (3) *slots* contínuos e contíguos disponíveis e (4) QoT acima do limiar para o sinal óptico recebido. 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. A alocação de banda foi considerada fixa, com base no produto entre a constante de atenuação e o fator de ruído do amplificador óptico utilizado na respectiva banda de transmissão, ou seja, $C \rightarrow L \rightarrow S$. A topologia considerada nas simulações foi a NSFNet. Os parâmetros utilizados nas simulações foram os seguintes: (1) distância entre os amplificadores ópticos de linha de 70 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) taxas de transmissão de bit de 100, 200 e 300 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 conexão que utilizasse essa maior rota deveria ter QoT igual ou acima do limiar correspondente ($OSNR_{\text{out}} \geq OSNR_{\text{th}}$), quando considerados: a maior taxa de transmissão de bit (300 Gbps) e o formato de modulação menos eficiente (4-QAM). Além disso, o menor valor de carga simulado (8000 Erlangs) foi obtido considerando: (1) 10^5 conexões como critério de parada e (2) um valor de probabilidade de bloqueio de conexões igual, ou próximo, a 10^{-3} . Os parâmetros referentes às bandas S, C e L se encontram descritos na Tabela II [2], [7], [22].

Para uma comparação justa com os algoritmos de roteamento descritos neste artigo, foi considerado um cenário em que 30% dos enlaces da topologia NSFNet eram constituídos por fibra óptica ULL [7] e o restante com fibras ópticas do

TABELA II
 PARÂMETROS REFERENTES ÀS BANDAS S, C E L [2], [6], [7], [22].

Parâmetros	Banda S	Banda C	Banda L
Frequência inicial (THz)	196,08	191,69	184,62
Frequência final (THz)	205,48	196,08	191,69
Frequência central (THz)	200,78	193,89	188,16
Número de <i>slots</i>	752	352	566
Figura de ruído (dB)	7	5,5	6
Coefficiente de atenuação – G652-D (dB/km)	0,198	0,191	0,194
Coefficiente de atenuação – PSCF-130 (dB/km)	0,163	0,150	0,152
Potência óptica de entrada (dBm)	−1.34	−3.54	−2.94

tipo G652-D [2], [6]. A técnica considerada para substituição das fibras ópticas foi a PL [3], [8].

V. RESULTADOS

Fig. 1 ilustra a probabilidade de bloqueio de conexões em função do número de iterações. Observa-se que, na primeira iteração, o melhor indivíduo (I_1) possui $PBC = 1,36 \times 10^{-2}$, enquanto que, o melhor indivíduo do processo evolutivo (I_{313}), obteve $PBC = 1,00 \times 10^{-4}$, resultando em uma redução de aproximadamente 99,26% na probabilidade de bloqueio de conexões.

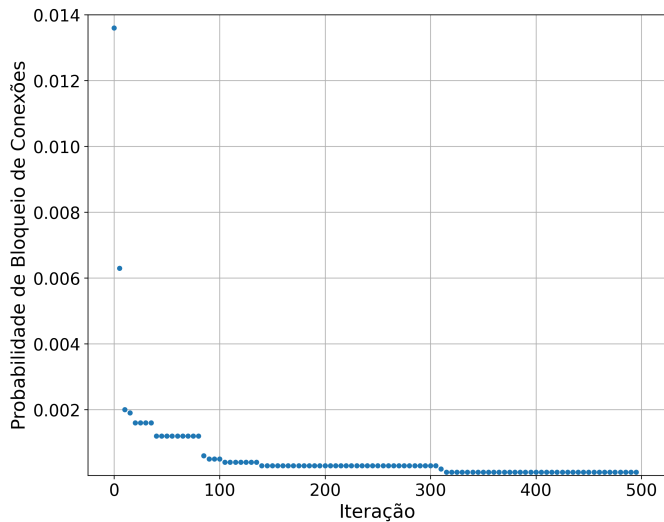


Fig. 1. Probabilidade de bloqueio de conexões em função do número de iterações.

Fig. 2 ilustra a probabilidade de bloqueio de conexões em função da carga na rede, considerando os algoritmos de roteamento: SP, MH, SWP, LOR_C e PSR. Percebe-se que o algoritmo PSR obteve melhor desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de conexões, em comparação com todos os outros algoritmos (SP, MH, SWP e LOR_C), para toda

a variação de carga na rede. Considerando o menor valor de carga (8000 Erlangs), o algoritmo MH obteve uma redução de 87,16% ($PBC = 9,08 \times 10^{-3}$), o SWP de 97,30% ($PBC = 1,91 \times 10^{-3}$), o LOR_C de 96,83% ($PBC = 2,24 \times 10^{-3}$) e o PSR de 99,49% ($PBC = 0,36 \times 10^{-3}$), em comparação com o valor de PBC obtido pelo algoritmo SP ($PBC = 70,70 \times 10^{-3}$).

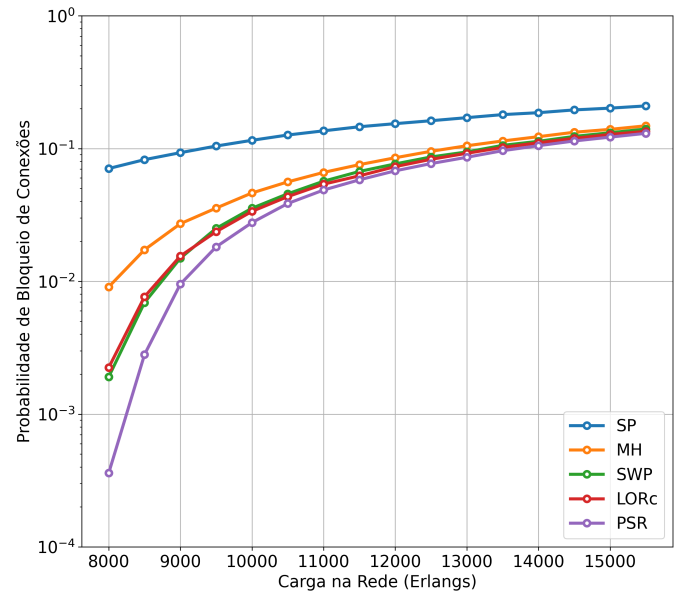


Fig. 2. Probabilidade de bloqueio de conexões em função da carga na rede, considerando os algoritmos de roteamento: SP, MH, SWP, LOR_C e PSR.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi proposta a aplicação do algoritmo de roteamento por série de potências para se determinar as rotas no contexto de uma rede óptica elástica multibanda híbrida. Para isso, considerou-se como penalidade física o ruído de emissão espontânea amplificada, gerado ao longo dos amplificadores ópticos dispostos nos nós e enlaces da rede, três bandas de transmissão (S, C e L) e a topologia NSFNet.

Os resultados indicaram que, no cenário da rede óptica conter 30% dos enlaces de fibra óptica ULL e o restante com fibra óptica do tipo G652-D [2], [6], o algoritmo PSR obteve desempenho superior, em termos de probabilidade de bloqueio de conexões, em comparação com os demais algoritmos de roteamento (SP, MH, SWP e LOR_C), para todo o intervalo de variação de carga. Considerando o menor valor de carga (8000 Erlangs), o algoritmo PSR obteve uma redução de: 99,49%, em comparação com o algoritmo SP, 96,04%, em comparação com o algoritmo MH, 81,15%, em comparação com o algoritmo SWP e 83,93%, em comparação com o algoritmo LOR_C.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem o apoio institucional à UFCG e o apoio financeiro ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) – Termo nº 635/2026.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Zhu et al., “Large-area low-loss fibers and advanced amplifiers for high-capacity long-haul optical networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 8, n. 7, A55–A63, 2016.
- [2] 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*, v. 38, n. 1, pp. 92–104, 2023.
- [3] Y. Guan et al., “Migrating elastic optical networks from standard single-mode fibers to ultra-low loss fibers: strategies and benefits,” em *Optical Fiber Communication Conference*, Optica Publishing Group, 2017, W4H–3.
- [4] Y. Li et al., “Scheduling strategies for network link upgradation with ultra low loss fibers,” em *Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, IEEE, 2018, pp. 1–3.
- [5] D. Wang et al., “Ultra-low-loss and large-effective-area fiber for 100 Gbit/s and beyond 100 Gbit/s coherent long-haul terrestrial transmission systems,” *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 17 162, 2019.
- [6] *Optical Fiber Attenuation*, <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052294-optical-fiber-attenuation>, Acesso em: 02 de Julho de 2022.
- [7] Y. Yamamoto, Y. Kawaguchi e M. Hirano, “Low-Loss and Low-Nonlinearity Pure-Silica-Core Fiber for C- and L-band Broadband Transmission,” *Journal of Lightwave Technology*, v. 34, n. 2, pp. 321–326, 2016. DOI: 10.1109/JLT.2015.2476837.
- [8] H. Yang et al., “Deploying Ultra-Low Loss Fibers for Enhancing Lightpath Provisioning Performance in an Elastic Optical Network,” em *Optical Fiber Communication Conference*, Optica Publishing Group, 2021, W1F–6.
- [9] Y. Li et al., “Ultra-Low Loss Fiber Deployment in Elastic Optical Networks With Fixed and Variable Topologies,” *Journal of Lightwave Technology*, 2024.
- [10] K. Ouyang et al., “Lightpath provisioning in a hybrid ULL fiber-SSMF elastic optical network,” em *Advanced Fiber Laser Conference (AFL)*, SPIE, vol. 13104, 2024, pp. 707–711.
- [11] J. F. Martins-Filho et al., “Intelligent and fast IRWA algorithm based on power series and Particle Swarm Optimization,” em *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2008, pp. 158–161.
- [12] D. A. R. Chaves et al., “A methodology to design the link cost functions for impairment aware routing algorithms in optical networks,” *Photonic Networking Communications*, v. 22, pp. 133–150, 2011.
- [13] 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*, v. 49, n. 5, pp. 359–361, Fevereiro de 2013.
- [14] M. A. Cavalcante et al., “Nova Proposta para Otimização da Função Custo do Algoritmo de Roteamento por Série de Potências,” em *Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia (ENCOM)*, IECOM, 2016, pp. 1–2.
- [15] F. C. M. Silva et al., “Aplicação do Algoritmo de Roteamento por Série de Potências em Redes Ópticas Elásticas Multibandas,” pp. 1–5, 2024.
- [16] F. C. M. e Silva et al., “Aplicação do Algoritmo de Roteamento por Série de Potências em uma Rede Óptica Elástica Multibanda no Cenário Adaptativo-Alternativo,” pp. 1–5, 2025.
- [17] M. A. Cavalcante et al., “Applying power series routing algorithm in transparent elastic optical networks,” em *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2015, pp. 1–5.
- [18] D. A. R. Chaves et al., “Impairment aware routing algorithm for all-optical network based on power series and particle swarm optimization,” em *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrt)*, Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2008, pp. 1–6.
- [19] 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.
- [20] R.-J. Essiambre et al., “Capacity limits of optical fiber networks,” *Journal of Lightwave technology*, v. 28, n. 4, pp. 662–701, 2010.
- [21] E. B. Sarmento, J. R. N. Arcanjo e H. A. Pereira, “Análise de Desempenho de Arquiteturas de Nó e de Enlace em Redes ópticas Multibandas,” em *XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrt)*, Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2023, pp. 1–5.
- [22] 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.