

Algoritmo de Roteamento para Otimização de Desempenho de uma Rede Óptica Elástica

Jefferson John do Rêgo Leite, Igor Monteiro Abreu dos Santos, Helder Alves Pereira e Raul Camelo de Andrade Almeida-Júnior.

Resumo— Basicamente, quando se considera tráfego dinâmico e topologias com um número elevado de nós, utiliza-se o algoritmo de Dijkstra e modifica-se sua função custo de modo a otimizar o desempenho das redes ópticas. Nesse contexto, a contribuição deste artigo é de adaptar um algoritmo de roteamento disponível na literatura de redes ópticas multiplexadas em comprimento de onda para o cenário de redes elásticas e investigar seu desempenho considerando diversos algoritmos de roteamento utilizados na literatura. Consideram-se aspectos da camada física, tais como perdas e ganhos ao longo dos dispositivos, além do ruído de emissão espontânea amplificada gerado nos amplificadores ópticos.

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

Abstract— Basically, when considering dynamic traffic and topologies with a high number of nodes, the Dijkstra algorithm is used and its cost function is modified in order to optimize the performance of optical networks. In this context, the contribution of this paper is to adapt a routing algorithm available in the wavelength division multiplexing optical networks for the scenario of elastic optical networks and to investigate its performance considering some routing algorithms. Aspects of the physical layer are considered, such as gains and losses along the devices, in addition to the amplified spontaneous emission noise generated in optical amplifiers.

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

I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas que utilizam a tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) fornecem largura de banda fixa para atendimento às chamadas solicitadas, independente do formato de modulação utilizado e da taxa de transmissão de bit requerida. Dessa forma, as requisições de chamada são avaliadas considerando a disponibilidade de rota e de largura de banda fixa [1]. Entretanto, com a demanda de tráfego crescendo de forma exponencial ao longo das últimas décadas, estudos vêm sendo realizados no sentido de fornecer flexibilidade espectral no atendimento dessa diversidade de serviços [2]. As redes ópticas elásticas (EON – *Elastic Optical Network*)

Jefferson John do Rêgo Leite 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: jefferson.leite@ee.ufcg.edu.br.

Igor Monteiro Abreu 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: helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

Raul Camelo de Andrade Almeida-Júnior faz parte do Grupo de Fotônica, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, email: ralmeida.ufpe@gmail.com.

se encaixam nesse contexto de fornecer os recursos espectrais para atendimento das solicitações de chamada, considerando aspectos de formato de modulação utilizado e valor da taxa de transmissão de bit requerida, utilizando o espectro de frequência de forma eficiente quando comparadas com as redes ópticas WDM [3].

O problema de se determinar uma rota e dispor de recursos para atendimento das solicitações de chamada é conhecido na literatura como roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA - *Routing and Wavelength Assignment*), em redes ópticas WDM, roteamento e atribuição de espectro (RSA - *Routing and Spectrum Assignment*), ou ainda roteamento, atribuição de formato de modulação e espectro (RMLSA - *Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*), em redes ópticas elásticas [3]. A diferença entre o RSA e o RMLSA é que para o primeiro não se considera que a EON utilize mais do que um formato de modulação para atendimento das solicitações de chamada [4]. Em todos esses três problemas (RWA, RSA e RMLSA), resolvê-los exaustivamente, considerando tráfego dinâmico, aspectos da camada física e topologias com número elevado de nós, é bastante dispendioso, em termos computacionais, devido ao fato desses problemas serem conhecidos na literatura como problemas NP-Completo [5].

Dessa forma, costuma-se utilizar heurísticas para analisar e otimizar o desempenho de EONs nesse tipo de cenário de avaliação [1]. O algoritmo de Dijkstra vem sendo utilizado ao longo das pesquisas realizadas em redes ópticas e suas variações, em termos de função custo, têm trazido novas perspectivas de melhoria em termos de desempenho [6]. Nesse contexto, a contribuição deste artigo é de propor uma adaptação de um algoritmo de roteamento disponível na literatura de redes ópticas WDM para EONs. Com isso, pretende-se investigar o impacto desse algoritmo de roteamento adaptado, considerando custos relacionados com EONs, de modo a utilizá-lo como algoritmo de roteamento de referência frente aos demais utilizados na literatura de redes ópticas. Serão consideradas as perdas e os ganhos, ao longo dos dispositivos, bem como o ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) gerado nos amplificadores ópticos presentes nos nós e enlaces da rede. A proposta deste artigo, bem como os outros algoritmos de roteamento utilizados, será analisada em termos da métrica de desempenho conhecida como probabilidade de bloqueio de chamadas. Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, descreve-se uma revisão da literatura sobre os algoritmos RMLSA utilizados em EONs. Na Seção III, apresentam-se o algoritmo PIAWF e a principal contribuição desse trabalho

juntamente com suas características. Na Seção IV, apresentam-se os parâmetros, a topologia e as modelagens analíticas utilizadas no cenário de simulação considerado neste artigo. Na Seção V, os resultados são analisados e discutidos e, por fim, as conclusões são apresentadas na Seção VI.

II. ALGORITMOS DE RMLSA

O problema de RMLSA se trata de obter uma rota, atribuir um formato de modulação e um conjunto de fatias do espectro (*slots*) de modo a estabelecer uma conexão entre dois nós (fonte e destino), considerando uma determinada taxa de transmissão de bit requerida [4]. Dessa forma, alguns trabalhos da literatura de EONs, considerando tráfego dinâmico e topologias com um número elevado de nós, foram propostos no contexto de se elaborar um algoritmo de roteamento para se maximizar o número de chamadas estabelecidas na rede [1], [3], [7]–[12].

O algoritmo de Dijkstra vem sendo utilizado na literatura como algoritmo de referência, em que, modificando a função custo do enlace, é possível obter bons desempenhos em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas. Por exemplo, quando se atribui um valor constante à função custo do enlace ($f_{i,j} = 1$), obtém-se o algoritmo de roteamento conhecido como de menor número de enlaces (MH – *Minimum Hops*). Quando se considera a distância física como custo ($f_{i,j} = d_{i,j}$), obtém-se o algoritmo de roteamento como de menor distância física (SP – *Shortest Path*) [13]. Esses dois algoritmos têm sido bastante utilizados na literatura como comparativo de novas propostas de algoritmos de roteamento [1], [3], [7], [14], [15].

Além dos algoritmos de roteamento MH e SP, também é possível obter outros algoritmos de roteamento, a partir de combinações de parâmetros na função custo do enlace utilizada no algoritmo de Dijkstra, tais como [1]: comprimento e ocupação de rota adaptado à continuidade (LORa – *Length and Occupation Routing Availability* ($f_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{D} + \frac{a_{i,j}}{A}$) e comprimento e ocupação de rota adaptado à disponibilidade (LORc – *Length and Occupation Routing Contiguity* ($f_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{D} + \frac{1}{1+sr_{i,j}}$), em que D representa o valor da distância física do maior enlace da rede, $a_{i,j}$ a disponibilidade de *slots* do enlace, A a quantidade de *slots* disponibilizada por enlace e $sr_{i,j}$ o número de possibilidades de se encaixar um conjunto de s *slots* no enlace.

Em [7], Cavalcante *et al.* analisaram o impacto dos algoritmos de roteamento MH, SP, LORa e LORc, considerando o ruído ASE como penalidade física em diversos cenários. Em [1], Cavalcante *et al.* propuseram modificações no algoritmo de roteamento por série de potências (PSR – *Power Series Routing*) para o cenário de EONs, comparando com os algoritmos de MH, SP, LORa, LORc, considerando o ruído ASE como penalidade física. O algoritmo PSR envolve conceitos de computação inteligente para se otimizar a função custo do enlace, porém utiliza como base o algoritmo de Dijkstra para realizar o roteamento. Moura *et al.* [8] propuseram um algoritmo de RMLSA que considera o consumo de energia para estabelecimento das chamadas, levando em consideração o algoritmo de Dijkstra no roteamento, no entanto sem considerar penalidades físicas. O algoritmo proposto por Moura *et*

al. é comparado com outro que considera rotas alternativas. Fontinele *et al.* [9] propuseram um algoritmo de RMLSA que leva em consideração o formato de modulação para se obter um nível de qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) que permita estabelecimento de chamadas, comparando com o algoritmo de Dijkstra modificado e outro que considera rotas alternativas. Nesse trabalho, foram considerados o ruído ASE e os efeitos não lineares como penalidades físicas. Cavalcante *et al.* [3] aplicou o algoritmo PSR em diversos cenários, considerando diferentes parâmetros e dimensões na função custo do enlace e o ruído ASE nas simulações. Barbosa *et al.* [10] propuseram um algoritmo de RMLSA baseado em lógica Fuzzy, levando em consideração aspectos de fragmentação e quantidade de *slots* ocupados. O algoritmo proposto foi comparado com outros que levam em conta rotas alternativas, não levando em consideração aspectos da camada física. Costa *et al.* [11] propuseram um algoritmo de RMLSA que considera a margem de QoT para o estabelecimento das chamadas, levando em conta o ruído ASE e efeitos não lineares como penalidades físicas. Foi utilizado ainda o algoritmo clássico de rotas alternativas para estabelecimento das rotas como comparativo. Alves *et al.* [12] propuseram o uso de um algoritmo (BSR) que utiliza um processo iterativo para se obter a melhor dentre as rotas mais curtas possíveis, considerando o ruído ASE como penalidade física. Nesse trabalho, o algoritmo proposto foi comparado com o algoritmo clássico de rotas alternativas e duas outras propostas que levam em conta metaheurísticas baseadas em algoritmo genético e algoritmo de enxame de partículas. A tabela I descreve as contribuições dos algoritmos RMLSA citados nesta seção no que se refere às considerações de penalidades físicas e algoritmos utilizados como comparação.

III. PIAWF

Nesta seção, descrevem-se o algoritmo PIAWF, proposto originalmente para redes ópticas WDM, suas características e respectiva função custo. Nas Subseções III-A e III-B serão apresentadas as contribuições deste artigo no tocante à adaptação e consideração de parâmetros específicos de EONs para o PIAWF.

Chaves *et al.* [16] propuseram um algoritmo rápido e de alto desempenho com uma função custo adaptativa (PIAWF – *Physical Impairment Aware Weight Function*). Esse algoritmo de roteamento consiste de uma função custo do enlace que depende da distância normalizada e da disponibilidade normalizada de comprimentos de onda. Possui ainda dois parâmetros (γ e n) que precisam ser otimizados para se obter probabilidades de bloqueio mínimas na rede.

$$f_{i,j} = \gamma \left(\frac{d_{i,j}}{D} \right) + (1 - \gamma) \left(\frac{\lambda_{i,j}}{\lambda_T} \right)^n, \quad (1)$$

em que $\lambda_{i,j}$ representa o número de comprimentos de onda disponíveis e λ_T a quantidade de comprimentos de onda disponibilizada no enlace i, j .

Em [16], Chaves *et al.* consideraram como penalidades físicas o ruído ASE e a interferência (*crossstalk*) homodina presente nos comutadores ópticos. Os resultados obtidos com

TABELA I

CONTRIBUIÇÕES DOS ALGORITMOS RMLSA CITADOS NESTA SEÇÃO NO QUE SE REFERE ÀS CONSIDERAÇÕES DE PENALIDADES FÍSICAS E ALGORITMOS UTILIZADOS COMO COMPARAÇÃO.

Referência	RMLSA	Heurística	Metaheurística	Penalidade Física	Algoritmos Comparados
[7]	-	X	-	ASE	MH, SP, LORa e LORc
[1]	PSR _{NDA} e PSR _{NDC}	-	PSO	ASE	MH, SP, LORa e LORc
[8]	EAMGSP	X	-	-	Algoritmo de rotas alternativas
[9]	KSP-RQoTO	X	-	ASE e efeitos não lineares	Dijkstra modificado e Algoritmo de rotas alternativas
[3]	PSR	-	PSO	ASE	PSR
[10]	Fuzzy-RQoTO	-	Fuzzy	-	Algoritmo de rotas alternativas
[11]	LMCI	X	-	ASE e efeitos não lineares	Algoritmo de rotas alternativas
[12]	BSR	X	-	ASE	Algoritmo genético, Algoritmo de enxame de partículas e Algoritmo de rotas alternativas

o PIAWF foram comparados com os algoritmos de roteamento: SP, NF e LRW, todos esses utilizando como referência o algoritmo de Dijkstra e se diferenciam basicamente na função custo utilizada (distância física, figura de ruído ou disponibilidade normalizada de comprimentos de onda por enlace, respectivamente). Em [17], Chaves *et al.* investigaram o PIAWF em diversos cenários, considerando os algoritmos de roteamento SP, LRW e OSNR-R como comparativo em termos de desempenho, sendo esse último algoritmo utilizando como função custo a relação sinal-ruído óptica do enlace.

A. PIAWF-DN

A adaptação realizada no PIAWF consiste primeiramente em considerar a disponibilidade normalizada de *slots* (PIAWF-DN) ao invés da disponibilidade normalizada de comprimentos de onda [16], [17]. À primeira vista, essa adaptação pode parecer simples. No entanto, é uma adaptação importante no que se refere a um primeiro estudo/investigação desse algoritmo de roteamento no cenário de EONs, o qual considera múltiplos formatos de modulação e diversas taxas de transmissão de bit. Dessa forma, a função custo do PIAWF-DN pode ser representada da seguinte forma:

$$f_{i,j} = \gamma \left(\frac{d_{i,j}}{D} \right) + (1 - \gamma) \left(\frac{a_{i,j}}{A} \right)^n, \quad (2)$$

em que γ e n são parâmetros ajustáveis, otimizados conforme o cenário de simulação e topologia de rede considerada. Para Chaves *et al.* [16], [17], γ e n devem pertencer aos intervalos de $[0; 1]$ e $[0; 2, 5]$, respectivamente.

B. PIAWF-NF

O PIAWF-NF foi concebido modificando-se o parâmetro de disponibilidade normalizada de *slots* pelo parâmetro que considera o número de possíveis encaixes de um conjunto de *slots* no espectro disponível de frequência ($sr_{i,j}$). Esse parâmetro tem sido utilizado na literatura e os resultados obtidos com os algoritmos de roteamento tem se mostrado interessantes em termos de desempenho das EONs nos cenários analisados [1], [3], [7]. Assim a função custo do PIAWF-NF é dada pela seguinte equação:

$$f_{i,j} = \gamma \left(\frac{d_{i,j}}{D} \right) + (1 - \gamma) \left(\frac{1}{1 + sr_{i,j}} \right)^n. \quad (3)$$

IV. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

A arquitetura de nó utilizada baseia-se na de comutação espectral (*spectrum switching*) [18]. Dessa forma, os seguintes dispositivos estão presentes ao longo dos enlaces: (1) transmissor óptico; (2) dispositivo de comutação; (3) amplificador óptico de potência, (4) fibra óptica, (5) amplificadores ópticos de linha, (6) pré-amplificador e (7) receptor óptico. Os ganhos dos amplificadores ópticos foram modelados de modo a compensar exatamente as perdas do enlace e dos nós. O ruído ASE, gerado nos 3 tipos de amplificadores ópticos considerados, foi modelado de acordo com Cavalcante *et al.* [7].

Os parâmetros utilizados nas simulações foram os seguintes: (1) frequência central da grade de 193,4 THz; (2) largura de banda de referência de 12,5 GHz; (3) largura de banda do *slot* de 12,5 GHz; (4) figura de ruído dos amplificadores ópticos de 5 dB; (4) perda no dispositivo de comutação de 5 dB; (6) número de *slots* por enlace igual a 64; (7) relação sinal-ruído óptica de entrada de 30 dB; (8) potência óptica de entrada de 0 dBm; (9) distância entre amplificadores de linha igual a 70 km; (10) formatos de modulação de 4, 16 e 64-QAM; (11) taxas de transmissão de bit de 10, 40, 100, 160 e 400 Gbps; (12) número de chamadas simuladas igual a 10^7 e (13) topologia de rede NSFNet. Todas as simulações deste artigo foram realizadas com o *software* de código aberto SimeON [19].

Para uma determinada solicitação de chamada (nó fonte, nó destino e taxa de transmissão de bit), o algoritmo de RMLSA realiza as seguintes etapas: (1) utiliza o algoritmo de roteamento em análise para retornar uma rota entre os nós fonte e destino; (2) atribui-se o formato de modulação mais eficiente em termos espectrais (64-QAM); (3) o algoritmo de atribuição espectral de primeiro encaixe (*first-fit*) verifica se existem *slots* disponíveis; (4) a partir da rota e do conjunto de *slots* disponíveis conhecidos, avalia-se a QoT do sinal óptico no nó destino. Caso a QoT não seja satisfeita, tenta-se utilizar o próximo formato de modulação de maior eficiência espectral, até que o último seja o 4-QAM e volta-se para a

etapa (3); (5) se, para algum formato de modulação, a QoT seja satisfeita no nó destino, porém não seja possível estabelecer um conjunto contínuo, ou contíguo, de *slots*, a solicitação de chamada é bloqueada. Neste artigo, foram considerados os algoritmos MH, SP e LORc para comparação de desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, com relação às contribuições PIAWF-DN e PIAWF-NF.

A. Otimização dos Parâmetros dos Algoritmos de Roteamento PIAWF-DN e PIAWF-NF

A otimização dos parâmetros γ e n dos algoritmos de roteamento PIAWF-DN e PIAWF-NF consistiu na realização de simulações considerando 10^6 chamadas, o valor de 150 Erlangs de carga de rede e os seguintes intervalos de variação: $\gamma \in [0; 1]$ e $n \in [0; 2.5]$, conforme metodologia descrita por Chaves *et al.* [16], [17]. O valor da probabilidade de bloqueio foi utilizado como métrica de desempenho e foram obtidos os valores de γ e n de modo que resultaram em um valor mínimo de probabilidade de bloqueio de chamadas na rede.

A Figura 1 ilustra a otimização dos parâmetros γ e n dos algoritmos de roteamento: (a) PIAWF-DN e (b) PIAWF-NF, em termos da probabilidade de bloqueio de chamadas. Observa-se que para o PIAWF-DN, tem-se que: $\gamma = 6 \times 10^{-1}$ e $n = 1 \times 10^{-2}$. Enquanto que, para o PIAWF-NF, tem-se que: $\gamma = 4 \times 10^{-1}$ e $n = 3 \times 10^{-1}$.

V. RESULTADOS

A Figura 2 ilustra a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga da rede, em Erlang, considerando os seguintes algoritmos de roteamento: MH, SP, LORc, PIAWF-DN e PIAWF-NF. Os dados foram obtidos por meio de simulações com 10^7 chamadas variando a carga da rede de 100 a 300 Erlangs.

Observa-se que o PIAWF-NF apresentou melhor desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, em toda a faixa de carga de rede considerada. Isso se deve ao fato de que o processo de otimização encontra os parâmetros que resultam em menores valores de probabilidade de bloqueio na rede. Além disso, o termo que se refere ao número de encaixes no PIAWF-NF se mostra mais adequado ao cenário de EONs em comparação com o termo de disponibilidade de *slots* utilizado no PIAWF-DN. Considerando o valor de 100 Erlangs, a relação entre o valor da probabilidade de bloqueio de chamadas do algoritmo de roteamento (MH, SP, LORc ou PIAWF-DN) com relação ao valor obtido para o PIAWF-NF (η_X) foi da seguinte forma: $\eta_{MH} \approx 4, 16$, $\eta_{SP} \approx 3, 63$, $\eta_{LORc} \approx 1, 75$ e $\eta_{PIAWF-DN} \approx 1, 99$.

A Figura 3 ilustra os diagramas de caixa considerando os seguintes algoritmos de roteamento: MH, SP, LORc, PIAWF-DN e PIAWF-NF. Os diagramas de caixa foram obtidos para um conjunto de 500 simulações independentes, considerando uma carga de 100 Erlangs. A caixa representa o intervalo entre o primeiro e o terceiro quartil, enquanto a linha horizontal dentro da caixa indica a mediana. Para o valor de carga de 100 Erlangs, obteve-se uma probabilidade média de bloqueio de chamadas de aproximadamente $1, 68 \times 10^{-3}$ com margem

de erro de 5×10^{-6} , correspondendo a intervalos de confiança de 99%, considerando 500 simulações realizadas.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi proposta uma adaptação de um algoritmo de roteamento utilizado na literatura de redes ópticas WDM para EONs. Essa modificação envolveu considerar a disponibilidade de *slots* ao invés de considerar a disponibilidade de comprimentos de onda (PIAWF-DN). Além disso, utilizou-se um parâmetro importante de redes EONs nesse algoritmo adaptado de modo a considerar o número de possibilidades que um determinado conjunto de *slots* pode ser encaixado no espectro de frequência disponível (PIAWF-NF). Dessa forma, ambos os algoritmos de roteamento foram comparados com aqueles mais conhecidos na literatura e considerados, na maior parte dos trabalhos, como referências de desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas (MH, SP e LORc).

O algoritmo de roteamento PIAWF-NF demonstrou melhor desempenho frente aos demais e se apresenta como uma boa referência para comparação com novas propostas de algoritmos RMLSA no contexto de EONs. Como toma por base o algoritmo de Dijkstra, possui complexidade conhecida na literatura e, após um processo exaustivo de otimização de parâmetros, é possível obter um desempenho interessante em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas quando comparado com os algoritmos de roteamento MH, SP, LORc e até mesmo o PIAWF-DN. Como trabalhos futuros, espera-se investigar o desempenho do PIAWF em cenários de EONs translúcidas e utilizar outros parâmetros relacionados a esses diversos cenários de simulação (EONs transparentes, translúcidas, opacas, por exemplo).

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq o apoio financeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPgEE) da UFCG, à UFCG e à UFPE o apoio institucional.

REFERÊNCIAS

- [1] M. A. Cavalcante, H. A. Pereira, D. A. R. Chaves, and R. C. Almeida, "Applying power series routing algorithm in transparent elastic optical networks," in *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. IEEE, 2015, pp. 1–5.
- [2] I. Sartzetakis *et al.*, "Quality of transmission estimation in wdm and elastic optical networks accounting for space-spectrum dependencies," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 9, pp. 676–688, 2016.
- [3] M. A. Cavalcante, H. A. Pereira, D. A. R. Chaves, and R. C. Almeida Jr, "Optimizing the cost function of power series routing algorithm for transparent elastic optical networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 29, pp. 57–64, 2018.
- [4] I. Tomkos, S. Azodolmolky, J. Sole-Pareta, D. Careglio, and E. Palkopoulou, "A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 9, pp. 1317–1337, 2014.
- [5] M. Ruiz, M. Pioro, M. Żotkiewicz, M. Klinkowski, and L. V., "Column generation algorithm for rsa problems in flexgrid optical networks," *Photonic Network Communications*, vol. 26, pp. 53–64, 2013.
- [6] I. Szcześniak, A. Jajszczyk, and B. Woźna-Szcześniak, "Generic dijkstra for optical networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 11, pp. 568–577, 2019.

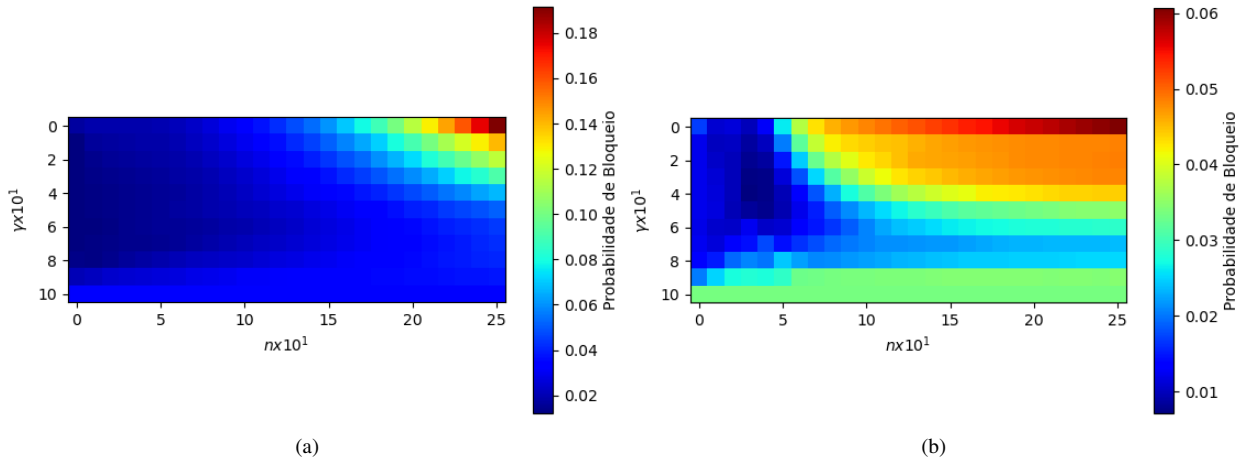


Fig. 1. Otimização dos parâmetros γ e n dos algoritmos de roteamento: (a) PIAWF-DN e (b) PIAWF-NF, em termos da probabilidade de bloqueio de chamadas.

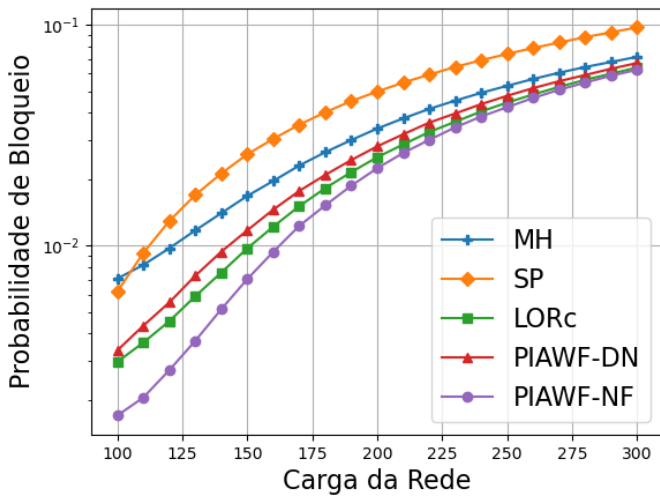


Fig. 2. Probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga da rede, em Erlang, para os algoritmos de roteamento: MH, SP, LORc, PIAWF-DN e PIAWF-NF.

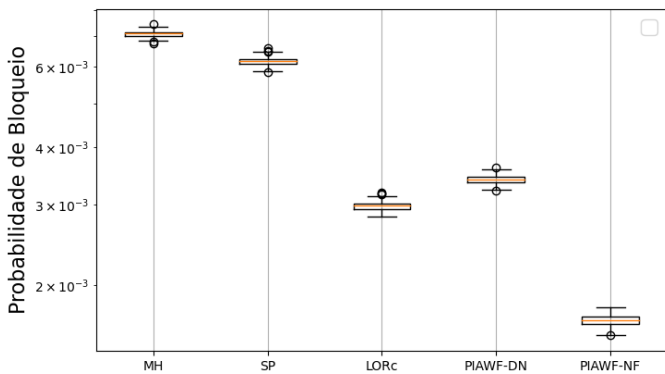


Fig. 3. Diagramas de caixa para os seguintes algoritmos de roteamento: MH, SP, LORc, PIAWF-DN e PIAWF-NF.

[7] M. A. Cavalcante, H. A. Pereira, D. A. R. Chaves, and R. C. Almeida-Júnior, “Análise do impacto do ruído ase em redes ópticas elásticas transparentes usando múltiplos formatos de modulação,” in *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrt)*, vol. 1. Sociedade Brasileira

de Telecomunicações, Setembro 2015, pp. 1–5.

[8] P. M. Moura, R. A. Scaraficci, and N. L. S. da Fonseca, “Algorithm for energy efficient routing, modulation and spectrum assignment,” in *International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2015, pp. 5961–5966.

[9] A. Fontinele, I. Santos, J. N. Neto, D. R. Campelo, and A. Soares, “An efficient ia-rmlsa algorithm for transparent elastic optical networks,” *Computer Networks*, vol. 118, pp. 1–14, 2017.

[10] L. V. Barbosa, J. V. dos Reis-Júnior, A. C. B. Soares, and R. d. A. L. Rabelo, “Avaliação de desempenho de um sistema fuzzy nas redes ópticas elásticas considerando o problema ia-rmlsa para a topologia usa,” *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, vol. 1, no. 1, 2019.

[11] L. R. Costa, Í. B. Brasileiro, and A. C. Drummond, “Novo rmlsa com tonificação de circuito e ciente da qualidade de transmissão com baixa margem em redes ópticas elásticas,” in *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. SBC, 2020, pp. 197–210.

[12] M. M. Alves, R. C. Almeida, A. F. dos Santos, H. A. Pereira, and K. D. R. Assis, “Impairment-aware fixed-alternate bsr routing heuristics applied to elastic optical networks,” *The Journal of Supercomputing*, vol. 77, pp. 1475–1501, 2021.

[13] H. Zang, J. P. Jue, B. Mukherjee *et al.*, “A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks,” *Optical networks magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 47–60, 2000.

[14] J. F. Martins-Filho, J. L. de Santana, H. A. Pereira, D. A. R. Chaves, and C. J. A. Bastos-Filho, “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.

[15] C. J. A. Bastos-Filho, R. C. Freitas, D. A. R. Chaves, R. C. L. Silva, M. L. P. Freire, H. A. Pereira, and J. F. Martins-Filho, “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.

[16] D. A. R. Chaves, D. O. Aguiar, H. A. Pereira, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Novel physical impairments aware adaptive weight function for routing in all optical networks,” in *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*. IEEE, 2007, pp. 194–198.

[17] D. A. R. Chaves, D. O. Aguiar, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Fast and adaptive impairment aware routing and wavelength assignment algorithm optimized by offline simulations,” *Optical Switching and Networking*, vol. 7, no. 3, pp. 127–138, 2010.

[18] R. J. Essiambre, R. Ryf, N. K. Fontaine, and S. Randel, “Breakthroughs in photonics 2012: Space-division multiplexing in multimode and multicore fibers for high-capacity optical communication,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 0701307–0701307, Abril 2013.

[19] M. A. Cavalcante, H. A. Pereira, and R. C. Almeida, “Simeon: an open-source elastic optical network simulator for academic and industrial purposes,” *Photonic Network Communications*, vol. 34, no. 2, pp. 193–201, 2017.