

Provisionamento de Conexões por Multicaminho em uma Rede Óptica Elástica Multibanda

Felipe César Maia e Silva, Warley Lima Barbosa, D'jonathas Breno Pinheiro Costa de Farias, Gabriel Santos Pereira do Nascimento e Helder Alves Pereira

Resumo— Neste artigo, propõem-se dois esquemas de provisionamento de conexões (serial e paralelo) baseados na estratégia de roteamento por multicaminho em uma rede óptica elástica multibanda. Para isso, considera-se uma topologia conhecida na literatura, o ruído de emissão espontânea amplificada, gerado ao longo dos amplificadores ópticos, como penalidade física e cinco bandas de transmissão (E, S, C, L e U). Os resultados indicam que, considerando o melhor caso e comparando com a estratégia clássica de roteamento disponível na literatura, obtém-se 98,71% de redução na probabilidade de bloqueio de conexões com a estratégia serial e 98,95% com a estratégia paralela.

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

Abstract— In this paper, we propose two connection provisioning schemes (serial and parallel) based on the multipath routing strategy in a multiband elastic optical network. For this, we considered a topology known in the literature, amplified spontaneous emission noise, generated along the optical amplifiers, as a physical penalty and five transmission bands (E, S, C, L, and U). The results indicate that, considering the best case and comparing with the classic routing strategy available in the literature, a 98.71% reduction in the call blocking probability is obtained with the serial strategy and 98.95% with the parallel strategy.

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

I. INTRODUÇÃO

Com a elevação das taxas de transmissão de bit, devido ao aumento na demanda pela utilização de novas tecnologias, as redes ópticas elásticas multibandas (MB) vem ganhando espaço ao longo dos últimos 10 anos na literatura. Tecnologia móvel de quinta geração (5G), realidade aumentada, conexão de dispositivos com a tecnologia de internet das coisas (IoT – *Internet of Things*) e transmissão de vídeo de alta definição (*streaming*) são alguns dos serviços que tem necessitado cada vez mais de largura de banda nos últimos anos [1]. Além disso, as redes ópticas MB apresentam a vantagem de utilizar a infraestrutura das redes ópticas já existentes, diminuindo assim o custo de sua implementação nos sistemas ópticos de transmissão [2].

Quando se trata da propagação dos sinais ópticos ao longo dos dispositivos presentes nos nós e enlaces ópticos, 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 [3]. O ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) também se torna ainda mais relevante pelo fato de que, nessas redes, estão presentes amplificadores ópticos com valores diferentes de figuras de ruído [4]. Com isso, a análise da qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) em redes ópticas MB é essencial para implementação de projetos de redes com arquiteturas mais eficientes [5].

Dessa forma, tarefas como determinar rotas, alocar bandas de transmissão, formato de modulação e espectro de forma eficiente representam etapas importantes para admissão das conexões solicitadas pela rede. No que se refere à etapa de roteamento, na literatura de redes ópticas, encontram-se estratégias que consideram, basicamente, uma única rota (*single path*), rotas alternativas (*alternate paths*) e múltiplos caminhos (*multipath*). Essa última estratégia, diferente das outras duas, considera que a conexão solicitada pode ser dividida em partes diferentes e distribuída entre rotas diversas, mantendo os nós fonte e destino [6].

Neste artigo, propõe-se uma extensão do trabalho de Lima *et al.* [7], em que foi proposto um esquema de provisionamento de conexões baseado no roteamento por multicaminho. Nesse trabalho, os autores realizaram quebras uniformes no número de fatias do espectro (*slot*) para estabelecimento das conexões. Neste artigo, propõem-se dois esquemas de provisionamento (serial e paralelo), em que a quebra da conexão se refere à taxa de transmissão de bit solicitada. Para avaliar o desempenho das estratégias propostas, considerou-se a probabilidade de bloqueio de conexões (PBC) como métrica de desempenho, o ruído de emissão espontânea amplificada como penalidade física, uma topologia bem conhecida na literatura, cinco bandas de transmissão (E, S, C, L e U) e assumiu-se 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. Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresentam-se os esquemas de provisionamento propostos. Na Seção III, descreve-se o cenário de simulação. Na Seção IV, apresentam-se os resultados e, por fim, na Seção V, as conclusões do artigo.

II. ESQUEMAS DE PROVISIONAMENTO DE CONEXÕES POR MULTICAMINHO

O conceito de roteamento por multicaminho permite que a conexão principal seja dividida e encaminhada por múltiplas

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.

Warley Lima Barbosa, D'jonathas Breno Pinheiro Costa de Farias, Gabriel Santos Pereira 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: {warley.barbosa, djonathas.breno.farias, gabriel.nascimento}@ee.ufcg.edu.br e helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

rotas simultaneamente, desde a origem até o destino. Essa abordagem tem como objetivo melhorar a taxa de aceitação das 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]. Até o presente momento, apenas o trabalho de Lima *et al.* [7] trouxe contribuições envolvendo a aplicação de roteamento por multicaminho no contexto de redes ópticas elásticas multibandas (MB-EON – *Multiband Elastic Optical Network*).

Os esquemas de provisionamento de conexões propostos neste artigo consideram que, para qualquer solicitação de conexão, deve-se estabelecê-la utilizando o conceito de algoritmo de roteamento por multicaminho. Esse conceito toma por base a quebra da conexão em $k+1$ subconexões. Essas subconexões possuem taxas de transmissão de bit menores ($B/(k+1)$) que precisam ser atendidas para o mesmo par fonte-destino em análise.

A. Esquema de Provisionamento de Conexões Serial

Para cada conexão solicitada, tem-se o par origem-destino ($s-d$) e a taxa de transmissão de bit (B). A conexão é quebrada em $k+1$ subconexões, em que cada uma delas tem a taxa de transmissão de bit igual a $B/(k+1)$. Com isso, utiliza-se o algoritmo de Dijkstra, considerando a distância física como função custo do enlace, para determinar a rota. Assim sendo, para cada solicitação de subconexão, verifica-se a possibilidade de alocá-la, caso haja recursos espectrais disponíveis (*slots* 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 conexão solicitada. Caso alguma solicitação de subconexão não possa ser estabelecida, ou devido à falta de recursos espectrais ou de QoT, a conexão solicitada é bloqueada. Caso contrário, cada subconexão é estabelecida na rede e o processo continua até que todas as solicitações de conexões 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 $\mathcal{O}(M \cdot K \cdot T \cdot P)$, em que M representa o número de conexões solicitadas, K o número máximo de quebras da conexão em análise, T o número de bandas de transmissão e P o custo de verificação da QoT ao longo da rota.

B. Esquema de Provisionamento de Conexões Paralelo

Para cada conexão solicitada, tem-se o par origem-destino ($s-d$) e a taxa de transmissão de bit (B). A conexão é quebrada em $k+1$ subconexões, em que cada uma delas tem a taxa de transmissão de bit igual a $B/(k+1)$. Com isso, utiliza-se o algoritmo de Yen, considerando a distância física como função custo do enlace, para determinar um conjunto de R possíveis rotas para cada subconexão. Assim sendo, para cada solicitação de subconexão, verifica-se a possibilidade de alocá-la, caso haja recursos espectrais disponíveis (*slots* contínuos

e contíguos), e QoT aceitável no nó destino. As solicitações das subconexões podem ser estabelecidas na mesma rota, na mesma banda de transmissão, em outras bandas de transmissão ou até mesmo em rotas diferentes. Caso alguma solicitação de subconexão não possa ser estabelecida, ou devido à falta de recursos espectrais ou de QoT, a conexão solicitada é bloqueada. Caso contrário, cada subconexão é estabelecida na rede e o processo continua até que todas as solicitações de conexões 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 *First-Fit*. A complexidade do esquema de provisionamento proposto é $\mathcal{O}(M \cdot R \cdot K \cdot T \cdot P)$, em que R representa o número de rotas alternativas por conexão.

III. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Neste artigo, foi considerada uma arquitetura de nó baseada na de comutação espectral [8] e adaptada para redes MB-EONs [9]. 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 [10]:

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

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, 8-QAM, $\text{snr}_b = 6,03$ dB, 16-QAM, $\text{snr}_b = 7,88$ dB, 32-QAM, $\text{snr}_b = 9,86$ dB, e 64-QAM, $\text{snr}_b = 11,95$ dB [11].

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 [10]:

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

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 [10]:

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

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_{AMP-AP} , N_{AMP-AL} e N_{AMP-PA} foram modeladas considerando a arquitetura de nó e de enlace denominada de BA+ILA[$s+1$]+PA (Subseção 3.1, ref [12]).

Para realizar as simulações, considerou-se a topologia *US Backbone* e que todos os enlaces utilizam fibra óptica do tipo G652.D [10]. 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 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 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 satisfatória ($OSNR_{out} \geq OSNR_{th}$), 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^{-3} . Os parâmetros referentes às bandas E, S, C, L e U se encontram descritos na Tabela I [13].

IV. RESULTADOS

Fig. 1 ilustra a probabilidade de bloqueio de conexões em função da carga na rede, considerando o desempenho dos algoritmos de Dijkstra, multicaminho serial e multicaminho paralelo, para os seguintes valores: (a) $k = 0$; (b) $k = 1$ e (c) $k = 2$. Percebe-se que, para $k = 0$, as estratégias multicaminho serial e multicaminho paralelo resultam no mesmo desempenho que o algoritmo de Dijkstra, considerando a função custo como a distância física dos enlaces. Na medida que o valor de k aumenta, ou seja, o número de quebras das conexões é considerado, observa-se uma diminuição na probabilidade de bloqueio de conexões, resultando em um desempenho superior para as estratégias de multicaminho propostas neste artigo.

Para $k = 1$, considerando $PBC = 10^{-3}$, o algoritmo de Dijkstra resultou em uma carga de 1575 Erlangs. Enquanto isso, a estratégia multicaminho serial resultou em uma carga de 3950 Erlangs, ou seja, um aumento de 150,79% em relação à carga da rede quando utilizado o algoritmo de Dijkstra. Para a estratégia multicaminho paralela, obteve-se uma carga de 4075 Erlangs, representando um aumento de 158,73% na carga da rede. Ainda no valor de carga correspondente à $PBC = 10^{-3}$, a estratégia multicaminho serial resultou em uma redução de 98,22% ($PBC = 9,80 \times 10^{-4}$), em comparação ao obtido com o algoritmo de Dijkstra ($PBC = 5,50 \times 10^{-2}$). Com relação ao valor obtido pelo algoritmo de Dijkstra ($PBC = 5,90 \times 10^{-2}$), a estratégia multicaminho paralela obteve uma

redução de 98,22% ($PBC = 1,05 \times 10^{-3}$). Em comparação com a estratégia multicaminho serial ($PBC = 3,01 \times 10^{-3}$), a estratégia multicaminho paralela resultou em uma redução de 65,12% ($PBC = 1,05 \times 10^{-3}$).

Para $k = 2$, considerando $PBC = 10^{-3}$, o algoritmo de Dijkstra resultou em uma carga de 1575 Erlangs. Enquanto isso, a estratégia multicaminho serial resultou em uma carga de 4650 Erlangs, ou seja, um aumento de 195,24% na carga da rede, em comparação ao obtido com o algoritmo de Dijkstra. Para a estratégia multicaminho paralela, obteve-se uma carga de 5470 Erlangs, resultando em um aumento de 247,30% na carga da rede. Ainda no valor de carga correspondente à $PBC = 10^{-3}$, a estratégia multicaminho serial resultou em uma redução de 98,71% ($PBC = 1,01 \times 10^{-3}$) em comparação com o algoritmo de Dijkstra ($PBC = 7,85 \times 10^{-2}$). Com relação ao valor obtido pelo algoritmo de Dijkstra ($PBC = 9,84 \times 10^{-2}$), a estratégia multicaminho paralela obteve uma redução de 98,95% ($PBC = 1,03 \times 10^{-3}$). Em comparação com a estratégia multicaminho serial ($PBC = 1,63 \times 10^{-2}$), a estratégia multicaminho paralela resultou em uma redução de 93,69% ($PBC = 1,03 \times 10^{-3}$).

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, foram propostos dois esquemas de provisionamento de conexões (serial e paralelo) baseados na estratégia de roteamento por multicaminho em uma rede óptica elástica multibanda. Para isso, considerou-se a topologia *US Backbone*, o ruído de emissão espontânea amplificada, gerado ao longo dos amplificadores ópticos, como penalidade física e cinco bandas de transmissão (E, S, C, L e U).

Os resultados mostraram que, para $k = 0$, ou seja, sem considerar as quebras das conexões, as estratégias de multicaminho serial e paralelo obtiveram os mesmos resultados obtidos pelo algoritmo de Dijkstra. Para $k = 1$ e $k = 2$, os resultados das estratégias foram melhores, em termos de probabilidade de bloqueio de conexões, oferecendo mais carga na rede quando foi considerado $PBC = 10^{-3}$.

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] 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.

TABELA I
PARÂMETROS REFERENTES ÀS BANDAS DE TRANSMISSÃO E, S, C, L E U [13].

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

- [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] G. de Souza Lima et al., “Aplicação de Roteamento Multicaminho em uma Rede Óptica Elástica Multi-banda,” pp. 1–5, 2025. DOI: 10.14209/sbrt.2025.1571157172.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] R.-J. Essiambre et al., “Capacity limits of optical fiber networks,” *Journal of Lightwave technology*, v. 28, n. 4, pp. 662–701, 2010.
- [12] 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. 103956, 2024, ISSN: 1068-5200.
- [13] A. Ferrari et al., “Band-division vs. space-division multiplexing: a network performance statistical assessment,” *Journal of Lightwave Technology*, v. 38, n. 5, pp. 1041–1049, 2020.

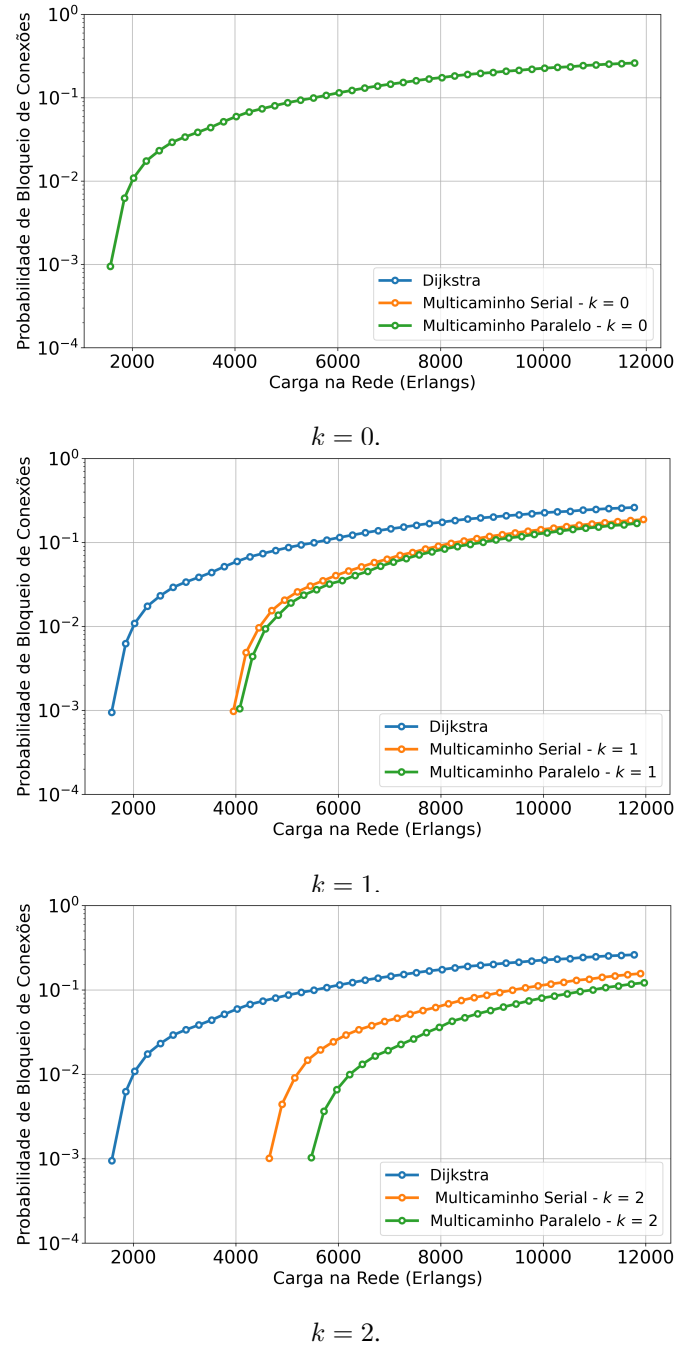


Fig. 1. Probabilidade de bloqueio de conexões em função da carga na rede, considerando o desempenho dos algoritmos de Dijkstra, multicaminho serial e multicaminho paralelo, para os seguintes valores: (a) $k = 0$; (b) $k = 1$ e (c) $k = 2$.