

# Heurísticas para Alocação de Banda de Transmissão em Redes Ópticas Elásticas Multibandas

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

**Resumo**— Neste artigo, propõem-se três heurísticas de alocação de banda de transmissão para redes ópticas elásticas multibandas. Para isso, consideram-se quatro cenários envolvendo de três a cinco bandas. O ruído de emissão espontânea amplificada, gerado nos amplificadores ópticos, é considerado como penalidade física e se analisa o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas (PBC) e distribuição de chamadas aceitas na rede, em cada uma das bandas de transmissão. Os resultados mostram que a heurística proposta, que toma por base os menores valores da margem da relação sinal-ruído óptica, oferece os menores valores de PBC para todos os cenários analisados.

**Palavras-Chave**— Alocação de Banda, Emissão Espontânea Amplificada, Multibanda, Penalidade Física, Rede Óptica Elástica.

**Abstract**— In this paper, three transmission band assignment heuristics are proposed for multiband elastic optical networks. For that, four scenarios are considered involving three to five bands. The amplified spontaneous emission noise, generated in the optical amplifiers, is considered as a physical penalty and the network performance is analyzed in terms of calls blocking probability (CBP) and distribution of accepted calls in the network, in each of the transmission bands. The results show that the proposed heuristic, which is based on the lowest values of the optical signal-to-noise ratio margin, offers the lowest CBP values for all scenarios analyzed.

**Keywords**— Amplified Spontaneous Emission, Band Assignment, Elastic Optical Network, Multiband, Physical Penalty.

## I. INTRODUÇÃO

As redes ópticas que utilizam multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) ocupam o espectro de frequência da mesma forma, independente da taxa de transmissão de bit e do formato de modulação. Enquanto isso, as redes ópticas elásticas (EON – *Elastic Optical Network*) levam esses fatores em consideração, ocupando o espectro de frequência de forma mais eficiente. Com relação à capacidade, as redes ópticas que utilizam multiplexação por divisão espacial (SDM – *Space Division Multiplexing*) ampliam os recursos dos sistemas ópticos de transmissão, por meio da utilização de conjuntos de fibras

Felipe César Maia e Silva é estudante do curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, e-mail: felipe.maia@ee.ufcg.edu.br.

Danilo de Oliveira Melo, José Roberto do Nascimento Arcanjo e Helder Alves Pereira fazem parte da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, e-mails: {danilo.melo, jose.arcanjo}@ee.ufcg.edu.br e helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

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

ópticas, fibras ópticas com múltiplos núcleos e até múltiplos modos. No entanto, essas redes ainda oferecem um alto custo para sua implementação e manutenção, exigindo novos dispositivos e instalações para funcionamento [1].

As redes ópticas que utilizam múltiplas bandas de transmissão (MB – *Multiband*) possuem boa relação custo-benefício no sentido de atender ao aumento da capacidade exigida, além de utilizar a infraestrutura já existente com alguns aprimoramentos e atualizações dos dispositivos [2]. Além disso, as penalidades físicas precisam ser consideradas nessas redes, de modo que o sinal óptico recebido tenha qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) o suficiente para que a chamada possa ser aceita pelo plano de controle da rede [3]. Desse modo, o objetivo de se resolver o problema de roteamento, alocação de banda, de formato de modulação e de espectro é de reduzir a probabilidade de bloqueio de chamadas quando se considera tráfego dinâmico [4]. Esse problema é conhecido na literatura como do tipo não polinomial (NP *Hard*) [5], ou seja, são problemas complexos e inviáveis de se obter, em tempo real, uma solução para topologias com grande número de nós. Por isso, utilizam-se, geralmente, heurísticas, meta-heurísticas ou inteligência artificial para resolvê-los [6].

Neste artigo, propõem-se três heurísticas de alocação de banda de transmissão para MB-EONs. Para isso, consideram-se quatro cenários distintos, envolvendo de três a cinco bandas. O ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*), gerado nos amplificadores ópticos, é considerado como penalidade física e se analisa o desempenho da rede em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas e distribuição de chamadas aceitas na rede em cada uma das bandas de transmissão. O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresentam-se as estratégias de alocação de banda disponíveis na literatura e as heurísticas propostas neste artigo. Na Seção III, descrevem-se os cenários de simulação utilizados. Na Seção IV, discutem-se os resultados e, por fim, na Seção V, são feitas as conclusões.

## II. ALOCAÇÃO DE BANDAS DE TRANSMISSÃO

Neste artigo, não são considerados dispositivos que realizam conversão de fatias do espectro (*slots*), ou de bandas de transmissão, utilização de regeneradores ópticos, ou eletrônicos, e nem cenários que envolvam atualização, ou adição, de enlaces ópticos na topologia física. O objeto de estudo deste artigo é a análise de como as bandas de transmissão podem ser atribuídas entre as chamadas solicitadas, considerando que, no mínimo, existam três bandas de transmissão.

Para isso, foram propostas três heurísticas que tomam por base: (1) o número de encaixes de *slots*; (2) o número total de

possibilidades de encaixe de todos os *slots* e (3) a margem da relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*) da chamada solicitada. Na Subseção II-A, apresentam-se as heurísticas disponíveis na literatura que foram utilizadas para comparação e, na Subseção II-B, as heurísticas propostas.

### A. Heurísticas Disponíveis na Literatura

Na literatura, encontram-se artigos que tratam da alocação fixa de banda [3], [4], [7]–[9] e heurísticas que tomam por base alguns parâmetros da rede [10]. Uzunidis *et al.* [3] propuseram um algoritmo de roteamento, atribuição de modulação e de espectro, utilizando a seguinte sequência para a etapa de alocação de banda:  $O \rightarrow C \rightarrow L \rightarrow S$ . Enquanto isso, Machuca *et al.* [7] propuseram a alocação de banda que considerava a sequência:  $C \rightarrow L \rightarrow S$ . Sambo *et al.* [8] realizaram simulações com as seguintes ordens de preferência: (1)  $C \rightarrow L \rightarrow S$  e (2)  $L \rightarrow C \rightarrow S$ . Em [4], Sambo *et al.* estenderam o trabalho em [8] por considerar também as seguintes ordens de preferência: (1)  $C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E$  e (2)  $C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E \rightarrow O$ . Em [9], Sheikh *et al.* compararam a proposta que envolvia aprendizagem profunda por reforço para provisionamento de recursos com uma heurística. Essa heurística priorizava o uso das bandas nessa ordem:  $C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E$ .

Calderón *et al.* [10] apresentaram três estratégias de alocação de banda. Na primeira estratégia, consideraram o comprimento médio de todas as rotas mais curtas da rede ( $M$ ). Os pedidos de conexão eram separados em duas partições: (1)  $r_{s,d} < M$  e (2)  $r_{s,d} \geq M$ , em que  $r_{s,d}$  representava o comprimento da rota analisada entre os pares fonte e destino. A primeira partição utilizava a ordem de preferência:  $E \rightarrow S \rightarrow C \rightarrow L$ , enquanto que a segunda partição utilizava:  $L \rightarrow C \rightarrow S \rightarrow E$ . Na segunda estratégia, foi considerado o critério de comprimento da rota mais curta. Para isso, foi definido o parâmetro  $LR$  como o maior comprimento da rota mais curta da rede e as solicitações de chamada foram divididas em quatro partições: (1)  $r_{s,d} \leq \frac{LR}{4}$ ; (2)  $\frac{LR}{4} < r_{s,d} \leq \frac{LR}{2}$ ; (3)  $\frac{LR}{2} < r_{s,d} \leq 3 \cdot \frac{LR}{4}$  e (4)  $3 \cdot \frac{LR}{4} < r_{s,d} \leq LR$ . As listas ordenadas foram as seguintes para as respectivas partições: (1)  $E \rightarrow S \rightarrow C \rightarrow L$ ; (2)  $S \rightarrow C \rightarrow L \rightarrow E$ ; (3)  $C \rightarrow L \rightarrow E \rightarrow S$  e (4)  $L \rightarrow E \rightarrow S \rightarrow C$ . Na terceira estratégia, as solicitações de chamada foram divididas em duas partições e o critério utilizado foi o do valor médio das taxas de transmissão de bit disponíveis ( $M_b$ ) da seguinte forma: (1)  $b_{s,d} < M_b$  e (2)  $b_{s,d} \geq M_b$ , em que  $b_{s,d}$  representava a taxa de transmissão de bit da rota analisada entre os pares fonte e destino. A primeira partição utilizava a lista:  $C \rightarrow S \rightarrow L \rightarrow E$ , enquanto que a segunda partição utilizava a sequência  $E \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow C$ . A Tabela I apresenta um resumo das estratégias de alocação utilizadas para comparação com as heurísticas propostas neste artigo. Os números correspondem à ordem de preferência de alocação da respectiva banda dentre as disponíveis quando a estratégia for fixa. Quando a estratégia for dependente de algum parâmetro da rede (Fixa-Parâmetro), especifica-se com um X, devido ao fato de que a sequência pode variar dependendo do parâmetro considerado ( $M$ ,  $LR$  ou  $M_b$ ) para a rota analisada.

TABELA I: Estratégias de alocação de banda de transmissão utilizadas para comparação com as heurísticas propostas.

Referência	O	E	S	C	L	Tipo	Estratégia
Uzunidis <i>et al.</i> [3]	1	–	4	2	3	Fixa	Est1-4B
Machuca <i>et al.</i> [7]	–	–	3	1	2	Fixa	Est1-3B
Sambo <i>et al.</i> [8]	–	–	3	1	2	Fixa	Est1-3B
Sambo <i>et al.</i> [8]	–	–	3	2	1	Fixa	Est2-3B
Sambo <i>et al.</i> [4]	–	4	3	1	2	Fixa	Est2-4B
Sambo <i>et al.</i> [4]	5	4	3	1	2	Fixa	Est1-5B
Sheikh <i>et al.</i> [9]	–	4	3	1	2	Fixa	Est2-4B
Calderón <i>et al.</i> [10]	–	X	X	X	X	Fixa-Parâmetro ( $M$ )	Est3-4B
Calderón <i>et al.</i> [10]	–	X	X	X	X	Fixa-Parâmetro ( $LR$ )	Est4-4B
Calderón <i>et al.</i> [10]	–	X	X	X	X	Fixa-Parâmetro ( $M_b$ )	Est5-4B

### B. Heurísticas Propostas

1) *Número de Encaixes de Slots*: essa estratégia verifica o número de possibilidades de se encaixar os *slots* solicitados pela chamada, considerando o espectro de frequência disponível em cada banda, de forma contínua e contígua. Para cada banda, esse valor é salvo em uma lista e essa é ordenada de forma crescente ( $NE_{>}$ ), ou decrescente ( $NE_{<}$ ).

2) *Número de Possibilidades de Encaixe de Todos os Slots*: essa estratégia é bastante similar à anterior ( $NE$ ), no entanto, calcula-se o número total de encaixes de *slots* possíveis de serem solicitados, considerando informações sobre as taxas de transmissão de bit e os formatos de modulação. Neste artigo, consideram-se as taxas de transmissão de bit: 100, 200, 300 e 400 Gbps e os formatos de modulação: 4, 8, 16, 32 e 64-QAM. Da mesma forma que a estratégia anterior ( $NE$ ), obtém-se uma lista ordenada de forma crescente ( $NP_{>}$ ), ou decrescente ( $NP_{<}$ ).

3) *Margem da Relação Sinal-Ruído Óptica*: nessa estratégia, considera-se a margem da OSNR para a solicitação de chamada em cada banda de transmissão ( $M$ -OSNR). Essa margem é calculada pela diferença entre o valor da  $OSNR_{out}$  (Eq. (2)) e o da  $OSNR_{th}$  (Eq. (1)), considerando a taxa de transmissão de bit solicitada e o formato de modulação atribuído. Com o valor de cada margem, calculada em cada banda, obtém-se uma lista ordenada de forma crescente ( $M$ -OSNR $_{>}$ ), ou decrescente ( $M$ -OSNR $_{<}$ ).

Neste artigo, as heurísticas propostas são comparadas com estratégias de alocação de banda (Fixa e Fixa-Parâmetro, conforme descritas na Tabela I), disponíveis na literatura, considerando a utilização de três a cinco bandas de transmissão. Para isso, considera-se como penalidade física o ruído ASE gerado nos amplificadores de potência, de linha e pré-amplificadores, presentes ao longo dos nós e dos enlaces ópticos. O desempenho da rede óptica multibanda é analisado em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, em função da carga da rede, e da distribuição de chamadas aceitas na rede em função das bandas de transmissão.

## III. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Neste artigo, foi considerada uma arquitetura de nó baseada na de comutação espectral [11] e adaptada para redes MB-EONS [12]. 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 [12]:

$$OSNR_{th} = \frac{1}{2} \frac{B}{B_{Ref}} snr_b, \quad (1)$$

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 por bit. 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 [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 [13]:

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

em que  $N_{in}$  representa a potência de ruído gerada no transmissor e  $N_{AMP-TOTAL}$  a potência total de ruído ASE, sendo dada por [13]:

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

em que  $N_{AMP-AP}$  representa a parcela da potência de ruído ASE total gerada pela presença dos amplificadores ópticos de potência,  $N_{AMP-AL}$  a parcela referente à presença dos amplificadores ópticos de linha e  $N_{AMP-PA}$  a que se refere à presença dos pré-amplificadores ao longo da rota analisada.  $N_{AMP-AP}$ ,  $N_{AMP-AL}$  e  $N_{AMP-PA}$  foram modeladas considerando a arquitetura de nó e de enlace denominada de AP, AL[ $s + 1$ ], PA e utilizando as equações (4) a (6) propostas por Sarmiento *et. al* [13].

Para realizar a comparação entre as diferentes estratégias de alocação de banda, utilizou-se um simulador de código aberto em Python (SONDA [14]). O princípio de funcionamento desse simulador consiste em verificar quatro condições básicas para que uma chamada seja estabelecida, são elas: (1) banda disponível; (2) rota disponível; (3) *slots* contínuos e contíguos disponíveis e (4) QoT acima do limiar para o sinal óptico recebido. O algoritmo de roteamento utilizado foi o de menor distância física (SP – *Shortest Path*) e o de atribuição espectral foi o do primeiro encaixe (*First Fit*). Para cada solicitação de chamada, a alocação do formato de modulação seguiu a ordem do mais eficiente ao menos eficiente em termos espectrais. Considerou-se ainda a topologia PacificBell e que todos os enlaces utilizavam fibra óptica do tipo G652.D [12].

Os parâmetros utilizados nas simulações foram os seguintes: (1) distância entre os amplificadores ópticos de linha de 40 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;

(6) relação sinal-ruído óptica de entrada de 30 dB e (7) taxa de transmissão de bit de 100, 200, 300 e 400 Gbps.

A metodologia para se determinar a potência óptica de entrada por *slot* ( $P_{in}$ ) para cada banda tomou como base a análise da viabilidade da maior rota, dentre as mais curtas encontradas pelo algoritmo de Dijkstra, utilizando a distância física como função custo do enlace. Assumiu-se que a solicitação de chamada que utilizasse essa maior rota deveria ter QoT satisfatória ( $OSNR_{out} \geq OSNR_{th}$ ), quando considerados: a maior taxa de transmissão de bit (400 Gbps) e o formato de modulação menos eficiente em termos espectrais (4-QAM). Além disso, o menor valor de carga simulado para cada cenário foi obtido considerando: (1) 1000 bloqueios e (2) um valor de probabilidade de bloqueio de chamadas igual, ou próximo, a  $10^{-2}$ . Os parâmetros referentes às bandas O, E, S, C e L se encontram descritos na Tabela II [1].

#### IV. RESULTADOS

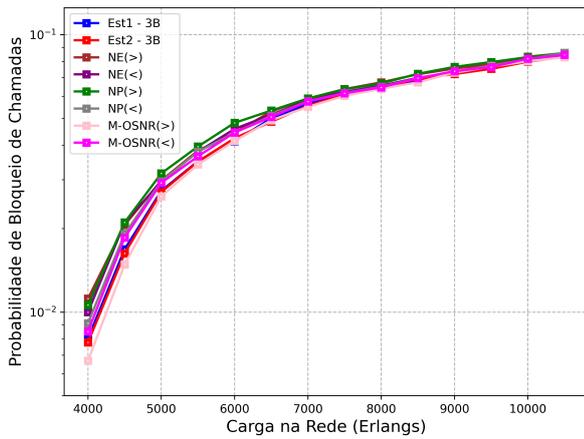
Fig. 1 ilustra a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga na rede, considerando: (a) 3 bandas (S, C e L) (Cenário 1); (b) 4 bandas (E, S, C e L) (Cenário 2); (c) 4 bandas (O, S, C e L) (Cenário 3) e (d) 5 bandas (O, E, S, C e L) (Cenário 4). Percebe-se que, para todos os cenários analisados (Fig. 1(a) a Fig. 1(d)), a estratégia  $M-OSNR_{>}$  obteve o melhor desempenho da rede, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, apresentando maior relevância no ponto de menor valor de carga (4000 Erlangs para o Cenário 1, 7500 Erlangs para o Cenário 2, 8000 Erlangs para o Cenário 3 e 11000 Erlangs para o Cenário 4).

Desse modo, em comparação com a estratégia  $M-OSNR_{>}$ , em Fig. 1(a), Est1-3B teve um aumento de aproximadamente 20,21% na probabilidade de bloqueio de chamadas (PBC), Est2-3 de 16,39%,  $NE_{>}$  de 67,54%,  $NE_{<}$  de 49,63%,  $NP_{>}$  de 58,82%,  $NP_{<}$  de 36,48% e  $M-OSNR_{<}$  de 27,46%. Em Fig. 1(b), Est2-4B teve um aumento de aproximadamente 14,20% na PBC, Est3-4B de 17,80%, Est4-4B de 24,98%, Est5-4B de 11,69%,  $NE_{>}$  de 44,26%,  $NE_{<}$  de 35,37%,  $NP_{>}$  de 22,42%,  $NP_{<}$  de 64,26% e  $M-OSNR_{<}$  de 54,13%. Em Fig. 1(c), Est1-4B teve um aumento de aproximadamente 10,30% na PBC,  $NE_{>}$  de 76,96%,  $NE_{<}$  de 32,23%,  $NP_{>}$  de 104,04%,  $NP_{<}$  de 14,12% e  $M-OSNR_{<}$  de 104,29%. Por fim, em Fig. 1(d), Est1-5B teve um aumento de aproximadamente 12,11% na PBC,  $NE_{>}$  de 82,08%,  $NE_{<}$  de 46,14%,  $NP_{>}$  de 117,24%,  $NP_{<}$  de 22,80% e  $M-OSNR_{<}$  de 54,66%.

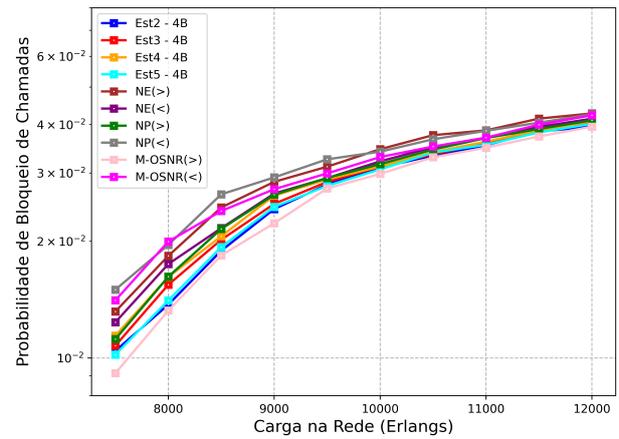
De acordo com Cadena *et al.* [15], a estratégia de alocação fixa de banda de transmissão que obtém melhor desempenho, em termos de PBC, envolve a sequência em ordem crescente que toma por base o produto entre o coeficiente de atenuação da fibra óptica e o fator de ruído do amplificador óptico, ambos utilizados na respectiva banda de transmissão ( $\alpha \cdot F$ ), quando se considera apenas o ruído ASE como penalidade física no cenário MB-EON. Desse modo, para o Cenário 1 (Fig. 1(a)), a sequência corresponde a: C→L→S (Est1-3B). Para o Cenário 2 (Fig. 1(b)), C→L→S→E (Est2-4B). Para o Cenário 3 (Fig. 1(c)), a sequência O→C→L→S (Est1-4B) corresponde ao menor aumento na PBC (10,30%), em comparação com a heurística proposta  $M-OSNR_{>}$ , dentre as alocações fixas em

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

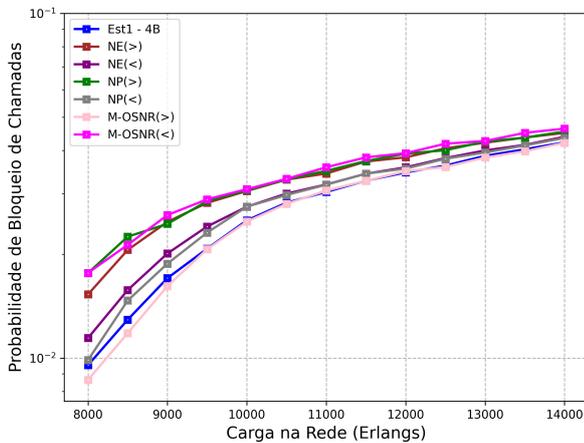
Parâmetros	Banda O	Banda E	Banda S	Banda C	Banda L
Frequência inicial (THz)	220,59	205,48	196,08	191,69	184,62
Frequência final (THz)	238,10	220,59	205,48	196,08	191,69
Número de <i>slots</i>	1401	1209	752	352	566
Figura de ruído (dB)	7,0	6,0	7,0	5,5	6,0
Coefficiente de atenuação (dB/km)	0,340	0,283	0,220	0,191	0,200
Potência óptica de entrada (dBm)	1,78	-2,06	-3,86	-6,87	-6,07



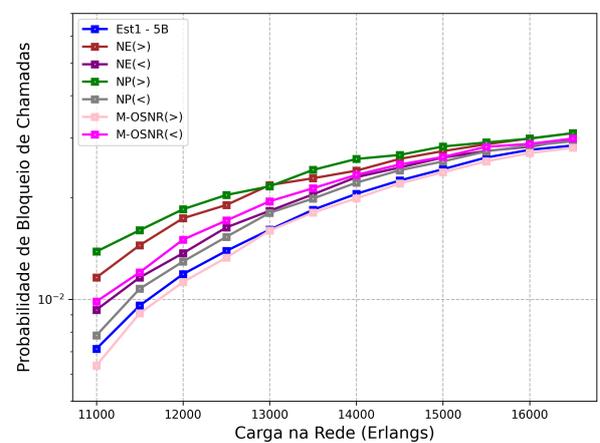
(a) 3 bandas (S, C e L).



(b) 4 bandas (E, S, C e L).



(c) 4 bandas (O, S, C e L).



(d) 5 bandas (O, E, S, C e L).

Fig. 1: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga na rede, considerando: (a) 3 bandas (S, C e L) (Cenário 1); (b) 4 bandas (E, S, C e L) (Cenário 2); (c) 4 bandas (O, S, C e L) (Cenário 3) e (d) 5 bandas (O, E, S, C e L) (Cenário 4).

todos os cenários avaliados. Essa sequência fixa de alocação de banda (Est1-4B) não corresponde à sequência:  $C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow O$ , sugerida por Cadena *et al.* [15]. Para o Cenário 4 (Fig. 1(d)),  $C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E \rightarrow O$  (Est1-5B).

Fig. 2 ilustra o número normalizado de chamadas aceitas, considerando o Cenário 4 (5 bandas de transmissão: O, E, S, C e L) e as estratégias de alocação de banda: (1) Est1-

5B; (2)  $NE_{>}$ ; (3)  $NE_{<}$ ; (4)  $NP_{>}$ ; (5)  $NP_{<}$ ; (6)  $M-OSNR_{>}$  e (7)  $M-OSNR_{<}$ . Percebe-se que Est1-5B, estratégia de alocação fixa de banda que fornece desempenho mais próximo à melhor heurística ( $M-OSNR_{>}$ ) (aumento de 12,11% na PBC), distribuiu, aproximadamente, 65,43% das chamadas aceitas entre as bandas C e L. Essas bandas fornecem os menores valores do produto  $\alpha \cdot F$ , em comparação com as outras bandas (O,

E e S), de acordo com a Tabela II. Enquanto isso, distribuiu aproximadamente 34,57% das chamadas aceitas entre as bandas O, E e S, as quais fornecem os maiores valores do produto  $\alpha \cdot F$ . Interessante observar que a estratégia  $M\text{-OSNR}_>$  prioriza a alocação de banda do menor para o maior valor da margem de OSNR. Dessa forma, distribuiu apenas 15,49% das chamadas aceitas, aproximadamente, entre as bandas C e L. Enquanto isso, 64,13% na banda E e 20,56% entre as bandas O e S. Desse modo, a estratégia proposta  $M\text{-OSNR}_>$  distribui os caminhos ópticos, priorizando a menor margem de OSNR, dentre as bandas disponíveis, admitindo um maior número de chamadas aceitas na rede (conforme pode ser visto em Fig. 1).

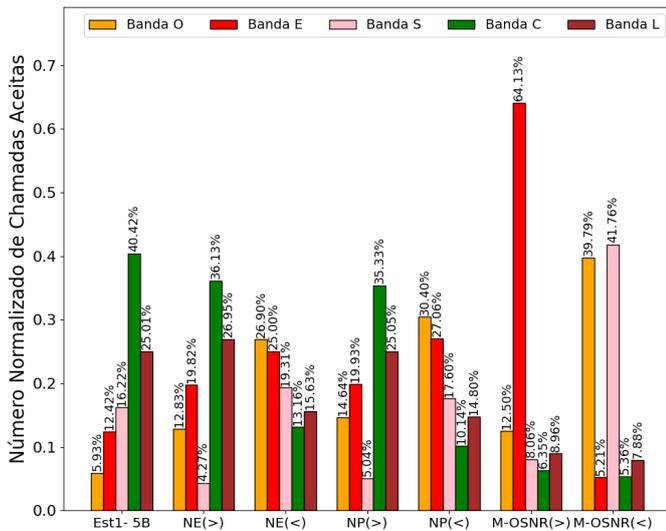


Fig. 2: Número normalizado de chamadas aceitas, considerando o Cenário 4 (5 bandas de transmissão: O, E, S, C e L) e as estratégias de alocação de banda: (1) Est1-5B; (2)  $NE_>$ ; (3)  $NE_<$ ; (4)  $NP_>$ ; (5)  $NP_<$ ; (6)  $M\text{-OSNR}_>$  e (7)  $M\text{-OSNR}_<$ .

## V. CONCLUSÕES

Neste artigo, foram propostas três heurísticas de alocação de banda para redes MB-EONs: (1)  $NE$ ; (2)  $NP$  e (3)  $M\text{-OSNR}$ , todas elas com variações na ordem de alocação das bandas (crescente ou decrescente) com relação às suas métricas de avaliação. Foram considerados quatro cenários, contemplando de três a cinco bandas de transmissão. O ruído de emissão espontânea amplificada, gerado nos amplificadores ópticos dispostos ao longo dos nós e dos enlaces da rede, foi considerado como penalidade física.

A estratégia proposta  $M\text{-OSNR}_>$  obteve o melhor desempenho, em termos de PBC, em todos os quatro cenários analisados. Dentre todas as estratégias comparadas e disponíveis na literatura, em termos percentuais, a menor diferença (10,30%) foi observada no Cenário 3 (Est1-4B) e a maior diferença (24,98%) no Cenário 2 (Est4-4B), considerando o menor valor de carga da rede no intervalo considerado para cada cenário (7500 Erlangs para o Cenário 2 e 8000 Erlangs para o Cenário 3).

Com relação à distribuição das chamadas aceitas na rede, em função da banda de transmissão, a estratégia  $M\text{-OSNR}_>$

resultou em um maior número de chamadas aceitas devido ao fato de distribuir os caminhos ópticos priorizando a menor margem de OSNR dentre as bandas disponíveis. Praticamente,  $M\text{-OSNR}_>$  considerou as bandas que possuíam maior valor do produto  $\alpha \cdot F$  e que ainda assim garantiam QoT do sinal óptico no nó destino. Desse modo, distribuiu, aproximadamente, 15,49% das chamadas aceitas entre as bandas C e L, 64,13% na banda E e 20,56% entre as bandas O e S, considerando o Cenário 4, no valor de carga de 11000 Erlangs. Enquanto isso, Est1-5B, estratégia de alocação de banda fixa que fornece desempenho mais próximo à melhor heurística ( $M\text{-OSNR}_>$ ) (aumento de 12,11% na PBC), distribuiu, aproximadamente, 65,43% das chamadas aceitas entre as bandas C e L e 34,57% entre as bandas O, E e S.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Ferrari, E. Virgillito, and V. Curri, "Band-division vs. space-division multiplexing: a network performance statistical assessment," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1041–1049, 2020.
- [2] N. Sambo *et al.*, "Beyond C-band in optical networks," in *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2020, pp. 1–4.
- [3] D. Uzunidis, E. Kosmatos, C. Matrakidis, A. Stavdas, and A. Lord, "Strategies for upgrading an operator's backbone network beyond the C-band: towards multi-band optical networks," *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 1–18, 2021.
- [4] N. Sambo, A. Ferrari, A. Napoli, N. Costa, J. Pedro, B. Sommerkorn-Krombholz, P. Castoldi, and V. Curri, "Provisioning in multi-band optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 9, pp. 2598–2605, 2020.
- [5] M. Ruiz *et al.*, "Column generation algorithm for rsa problems in flexgrid optical networks," *Photonic network communications*, vol. 26, no. 2, pp. 53–64, 2013.
- [6] P. Morales *et al.*, "Multi-band environments for optical reinforcement learning gym for resource allocation in elastic optical networks," in *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. IEEE, 2021, pp. 1–6.
- [7] C. M. Machuca, S. K. Patri, and S. Amjad, "Long-term capacity planning in flexible optical transport networks," in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2022, pp. 1–3.
- [8] N. Sambo, A. Ferrari, A. Napoli, N. Costa, J. Pedro, B. Sommerkorn-Krombholz, P. Castoldi, and V. Curri, "Provisioning in multi-band optical networks: A c+ l+ s-band use case," in *European Conference on Optical Communication (ECOC)*. IET, 2019, pp. 1–4.
- [9] N. E. D. El Sheikh *et al.*, "Multi-band provisioning in dynamic elastic optical networks: a comparative study of a heuristic and a deep reinforcement learning approach," in *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. IEEE, 2021, pp. 1–3.
- [10] F. Calderón *et al.*, "Heuristic approaches for dynamic provisioning in multi-band elastic optical networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 2, pp. 379–383, 2021.
- [11] B. C. Chatterjee, N. Sarma, and E. Oki, "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776–1800, 2015.
- [12] A. A. Santos-Júnior, J. R. N. Arcanjo, H. A. Pereira, and R. C. A. Almeida-Júnior, "Analysis of the impact of wavelength-dependent physical impairments considering a multiband elastic optical network," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 92–104, 2023.
- [13] E. B. Sarmento, J. R. N. Arcanjo, and H. A. Pereira, "Análise de desempenho de arquiteturas de nó e de enlace em redes ópticas multibandas," in *XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2023, pp. 1–5.
- [14] E. B. Sarmento *et al.*, "SONDA: Simulador em python para redes óticas," in *X Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM)*. IECOM, 2020, pp. 1–2.
- [15] A. V. O. Cadena, D. O. Melo, J. R. do Nascimento Arcanjo, and H. A. Pereira, "Análise de desempenho de estratégias de alocação de banda em uma rede óptica elástica multibanda," in *XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*. Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2023, pp. 1–5.