

Análise de Desempenho de Estratégias de Alocação de Banda em uma Rede Óptica Elástica Multibanda

André Victor Oliveira Cadena, Danilo de Oliveira Melo, José Roberto do Nascimento Arcanjo,
Helder Alves Pereira

Resumo— Neste artigo, comparam-se diferentes estratégias de alocação de bandas propostas recentemente na literatura em um cenário de rede óptica multibanda. Para isso, consideram-se quatro bandas de transmissão (S, C, L e E), o ruído de emissão espontânea amplificada gerado nos amplificadores ópticos como penalidade física e analisa-se o desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas e distribuição das chamadas aceitas pela rede em cada uma das bandas de transmissão. Os resultados mostram que a estratégia que utiliza alocação fixa de banda supera no mínimo em aproximadamente 2,41 vezes uma das heurísticas comparadas, alocando quase 58,82% de chamadas aceitas pela rede na banda C.

Palavras-Chave— Alocação de Banda, Rede Óptica Elástica Multibanda, Penalidade Física, Relação Sinal-Ruído Óptica.

Abstract— In this paper, different band assignment strategies recently proposed in the literature are compared in a multiband optical network scenario. For this, four transmission bands (S, C, L and E) are considered, the amplified spontaneous emission noise generated in optical amplifiers as a physical penalty and the performance is analyzed in terms of calls blocking probability and distribution of network accepted calls for each transmission band. The results show that the strategy that uses fixed band assignment outperforms at least by approximately 2.41 times one of the compared heuristics, allocating almost 58.82% of network accepted calls in the C band.

Keywords— Band Assignment, Multiband Elastic Optical Network, Optical Signal-to-Noise Ratio, Physical Penalty.

I. INTRODUÇÃO

Enquanto que as redes ópticas que utilizam multiplexação por comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) possuem grade fixa, ocupando o espectro de frequência da mesma forma, independente da taxa de transmissão de bit e do formato de modulação, as elásticas (EON – *Elastic Optical Network*) levam esses fatores em consideração, ocupando o espectro de frequência de forma mais eficiente. As redes ópticas que utilizam multiplexação por divisão espacial, que tanto podem utilizar a tecnologia WDM ou EON, oferecem recursos de aumento da capacidade dos sistemas ópticos de transmissão, por meio da utilização de conjuntos de fibras ópticas, fibras ópticas com múltiplos núcleos e até múltiplos modos. No entanto, essas redes ainda oferecem um alto custo para sua implementação e manutenção, requerendo novos dispositivos e novas instalações para funcionamento [1].

As redes ópticas que utilizam múltiplas bandas (MB) são caracterizadas na literatura como um boa relação custo-

benefício no sentido de atender ao aumento da capacidade exigida para os próximos anos, além de utilizar a infraestrutura já existente com alguns aprimoramentos e atualizações dos dispositivos [2]. Nesse contexto, as penalidades físicas também precisam ser consideradas nessas redes, de modo que o sinal 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]. Além disso, em redes ópticas que utilizam tráfego dinâmico, o objetivo de se resolver o problema de roteamento e alocação de recursos é de reduzir a probabilidade de bloqueio de chamadas ou, em geral, otimizar a ocupação do espectro [4]. Esse problema é 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, comparam-se diferentes estratégias de alocação de bandas propostas recentemente na literatura em um cenário MB-EON. Para isso, consideram-se quatro bandas de transmissão (S, C, L e E), o ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) gerado nos amplificadores ópticos como penalidade física e analisa-se o desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas e distribuição das chamadas aceitas pela rede em cada uma das bandas de transmissão. O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresenta-se o estado da arte sobre as estratégias de alocação de banda presentes na literatura de redes ópticas MB. Na Seção III, descreve-se o cenário de simulação utilizado. Na Seção IV, discutem-se os resultados e, por fim, na Seção V, são feitas as conclusões.

II. REVISÃO DA LITERATURA

Na literatura, observam-se estratégias de alocação de banda em redes ópticas MB que utilizam atribuições fixas [2]–[4], [7]–[9], heurísticas [10]–[13] e técnicas de inteligência artificial [6], [14], [15]. Além disso, algumas consideram penalidades físicas por meio de modelagens analíticas [2]–[4], [9], [13] e outras por meio do alcance máximo [6], [7], [10], [11], [14], [15].

Uzunidis *et al.* [3] propuseram um algoritmo de roteamento, atribuição de modulação e espectro, estimando o impacto das penalidades físicas nas bandas de transmissão O, S, C e L. Para a etapa de alocação de banda, os autores seguiram a sequência: $O \rightarrow C \rightarrow L \rightarrow S$. Hosseini *et al.* [7] propuseram uma heurística para resolver o problema de roteamento, alocação de formato de modulação, banda e espectro (RMLBSA – *Routing, Modulation Level, Band and Spectrum Assignment*). Para isso,

André Victor Oliveira Cadena, 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: {andre.victor.cadena,danilo.melo,jose.arcanjo}@ee.ufcg.edu.br e helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

utilizaram o algoritmo que pré-selecionava k rotas para qualquer solicitação de chamada e, em um cenário de atualização da banda C para incluir também a banda L, a banda L tinha preferência no estabelecimento das chamadas desde que todos os enlaces da rota possuísem fibras ópticas com dispositivos nas duas bandas. Caso contrário, utilizava-se apenas a banda C por não considerarem dispositivos conversores de banda nas simulações. Machuca *et al.* [8] analisaram três estratégias de roteamento e atribuição espectral. A primeira considerava características de atualização e adição de caminhos ópticos, utilizando apenas a banda C. A segunda tomava por base a primeira com a utilização de regeneradores eletrônicos presentes nos nós da rede. A terceira envolvia transmissão nas bandas C, L e S com essa respectiva sequência de alocação de banda utilizada na admissão das chamadas. Sambo *et al.* [9] propuseram um esquema de provisionamento que funcionava da seguinte forma: ao chegar uma solicitação de chamada, selecionava-se uma rota, atribuía-se um formato de modulação mais eficiente do ponto de vista espectral e uma banda com base em uma ordem de preferência. Caso o sinal óptico tivesse QoT suficiente, o algoritmo de primeiro encaixe (*first fit*) era utilizado para atribuição da chamada. Caso não tivesse QoT suficiente na banda selecionada, tentava-se outra banda. No caso de se tentar todas as bandas e não se ter QoT suficiente na recepção, tentava-se um novo formato de modulação menos eficiente do ponto de vista espectral. Por fim, caso não existisse mais formato de modulação e banda para atribuir, a chamada era bloqueada. As alocações de banda foram simuladas com as seguintes ordens de preferência: (1) C \rightarrow L; (2) L \rightarrow C; (3) C \rightarrow L \rightarrow S e (4) L \rightarrow C \rightarrow S. Em [4], Sambo *et al.* estenderam o trabalho [9] por considerar as bandas E e O e as seguintes ordens de preferência para alocação das bandas foram consideradas: (1) C \rightarrow L; (2) L \rightarrow C; (3) C \rightarrow L \rightarrow S; (4) L \rightarrow C \rightarrow S; (5) C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E e (6) C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E \rightarrow O. Em [2], Sambo *et al.* analisaram o mesmo esquema de provisionamento para as alocações de banda: (3), (5) e (6).

Nakagawa *et al.* [10] propuseram um esquema de provisionamento que aproveitava a alocação de recursos adaptável a distância. Os autores consideraram três bandas (S, C e L). O esquema de provisionamento funcionava da seguinte forma: selecionava-se uma rota; atribuía-se uma determinada combinação envolvendo um formato de modulação e uma banda que resultasse no menor alcance máximo possível; utilizava-se o *first fit* para atribuição espectral. Caso nenhum recurso tivesse disponível, tentava-se a próxima combinação mais eficiente até que não houvesse mais combinação a ser utilizada e assim a chamada seria bloqueada. Em [12], Nakagawa *et al.* propuseram um esquema adaptável de alocação de banda de enlace a enlace, utilizando uma arquitetura de nó que possuía elementos de conversão de banda. Para cada rota, a heurística proposta listava primeiro todas as combinações de banda possíveis para cada enlace, estimava o valor da relação sinal-ruído generalizada (GSNR – *Generalized Signal-to-Noise Ratio*) para cada uma delas e, em seguida, selecionava a que possuía o valor da margem de GSNR mais baixa possível. Foram consideradas ainda as bandas S, C e L. Em [13], Nakagawa *et al.* propuseram o conceito de redes habilitadas para comutação de banda com base no comprimento de onda,

onde cada comprimento de onda poderia ser comutado para qualquer banda e em qualquer nó. Os autores apresentaram também duas arquiteturas de nó óptico utilizando conversores de comprimento de onda totalmente ópticos. A alocação de banda era feita de forma exaustiva e se baseava em utilizar a banda que resultasse na menor margem de GSNR.

Calderón *et al.* [11] propuseram uma metodologia para desenvolvimento de algoritmos de alocação de banda que considerava dois estágios. O primeiro estágio era executado apenas uma vez e consistia em dividir o conjunto de chamadas solicitadas em X partições, de modo que cada solicitação de chamada pertencia a apenas uma única partição. Já o segundo estágio associava cada partição a uma lista ordenada de bandas e utilizava essa lista para operação na rede. Calderón *et al.* [11] apresentaram ainda três estratégias de alocação de banda. Na primeira, considerando M como o comprimento médio de todas as rotas mais curtas da rede, 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 lista ordenada levava em consideração apenas o alcance máximo e a primeira partição utilizou a seguinte ordem de preferência: E \rightarrow S \rightarrow C \rightarrow L, enquanto que a segunda partição utilizou: L \rightarrow C \rightarrow S \rightarrow E. Na segunda, 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, respectivamente, construídas usando dois critérios (alcance máximo e seleção equilibrada das bandas). Na terceira, 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. As listas ordenadas foram construídas usando três critérios: capacidade da banda, alcance máximo e equilíbrio entre as bandas, de forma que a primeira partição utilizou a lista ordenada: C \rightarrow S \rightarrow L \rightarrow E, enquanto que a segunda partição utilizou a seguinte sequência E \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow C.

Morales *et al.* [6] desenvolveram dois novos ambientes para a plataforma RL-GYM [16] de modo a resolver o problema de RMLBSA. O desempenho de seis agentes foram comparados no cenário avaliado com o maior número de bandas (C, L, S e E). Na recepção da solicitação de chamada, o agente selecionava uma ação definida por uma rota, dentre k possíveis pré-computadas, uma banda e a identificação do primeiro intervalo de frequência (*slot*) disponível para alocar a solicitação. Quando o ambiente recebia a ação do agente, ele selecionava o melhor formato de modulação e o número correspondente de *slots* necessários. Em seguida, ele verificava se a solicitação podia ser estabelecida e – com base no sucesso do estabelecimento da solicitação – enviava de volta uma observação no novo estado do sistema e uma recompensa. Se a solicitação fosse aceita, a recompensa seria igual a 1. Caso

contrário, seria igual a -1 . As solicitações de chamada eram rejeitadas caso não houvesse recursos espectrais suficientes na rota e banda selecionadas pelo agente. Basicamente, para alocação das bandas, era selecionado o formato de modulação mais eficiente espectralmente e a banda que resultasse no alcance máximo mais próximo do valor da distância física da rota analisada.

Em [14], Sheikh *et al.* compararam a proposta que envolvia aprendizagem profunda por reforço para provisionamento de recursos com uma heurística. A heurística priorizava o uso das bandas nessa ordem: $C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E$. A proposta utilizava um agente de rede treinada em diferentes cenários considerando várias bandas. No entanto, o agente não superou a heurística avaliada. Gonzalez *et al.* [15] propuseram quatro funções de recompensa para minimizar a probabilidade de bloqueio de chamadas. Essas funções utilizavam o uso da banda, a compactação do enlace, a disponibilidade do espectro e a fragmentação espectral como informações de realimentação para os agentes envolvidos no processo de aprendizagem profunda por reforço. Os autores consideraram as bandas C, L, S e E em suas simulações.

Neste artigo, são comparadas estratégias de alocação de banda que utilizam atribuições fixas e heurísticas, considerando a utilização conjunta das bandas S, C, L e E. 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 enlaces ópticos. O desempenho da rede óptica multibanda é analisado em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas e distribuições de chamadas aceitas pela rede para cada uma das bandas de transmissão. A Tabela I apresenta um resumo com as contribuições dos artigos da literatura referentes às estratégias de alocação de banda em redes ópticas MB.

III. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Neste artigo, foi considerada uma arquitetura de nó baseada na de comutação espectral [17]. A arquitetura leva em conta os seguintes dispositivos ópticos: transmissores, comutadores, multiplexadores, amplificadores de potência, pré-amplificadores, demultiplexadores e receptores. Considerou-se que os ganhos dos amplificadores ópticos compensam exatamente as perdas do enlace óptico. O ruído ASE gerado nos amplificadores ópticos foi modelado de acordo com Cavalcante *et al.* [18]. A relação sinal-ruído óptica no nó receptor foi calculada em função das perdas e dos ganhos nos dispositivos, além da potência de ruído ASE gerada nos amplificadores ópticos. O valor de limiar para a relação sinal-ruído óptica, 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) [17]. 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.

Para realizar a comparação entre as diferentes estratégias de alocação de banda, utilizou-se o simulador de código aberto em Python (SONDA [19]). 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 caminho, o de atribuição espectral foi o *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. A topologia considerada nas simulações foi a NSFNet. Os parâmetros das 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) potência de entrada de 8 dBm (Banda E), 2 dBm (Banda S) e 0 dBm (Bandas C e L); (6) relação sinal-ruído óptica de entrada de 30 dB e (7) taxa de transmissão de bit de 100 a 500 Gbps com distribuição uniforme. As atribuições fixas de banda foram denominadas de Estratégia 1 [2], [4], [14], enquanto que a primeira heurística de Calderón *et al.* [11] foi denominada de Estratégia 2, a segunda de Estratégia 3 e a terceira de Estratégia 4. Os parâmetros referentes às bandas E, S, C e L se encontram descritos na Tabela II [1].

IV. RESULTADOS

Fig. 1 mostra a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga na rede, considerando as bandas C, L, S e E, para cada uma das quatro estratégias de alocação de banda analisadas [2], [4], [11], [14].

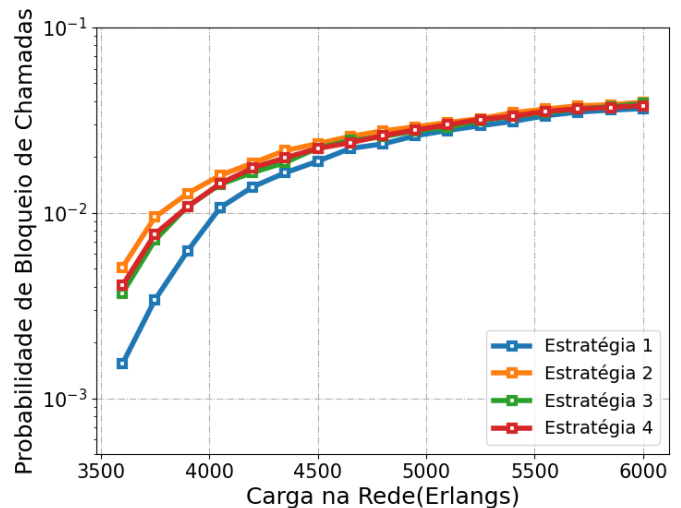


Fig. 1: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga na rede, considerando as bandas C, L, S e E, para cada uma das quatro estratégias de alocação de banda analisadas [2], [4], [11], [14].

Observa-se que, para uma carga de 3600 Erlangs, a Estratégia 1 supera em 3,31 vezes a Estratégia 2, em 2,41 vezes a Estratégia 3 e em 2,65 vezes a Estratégia 4. Como a Estratégia 1 considera atribuição fixa, percebe-se que essa alocação de banda ($C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E$) representa a melhor estratégia, em comparação com as três heurísticas propostas

TABELA I: Resumo com as contribuições dos artigos na literatura referentes às estratégias de alocação de banda em redes ópticas multibandas.

Referência	Banda O	Banda E	Banda S	Banda C	Banda L	Alcance Máximo	Modelagens Analíticas	Otimização	Contribuição
[9]	-	-	X	X	X	-	X	Heurística	Alocação de Banda
[4]	X	X	X	X	X	-	X	Heurística	Alocação de Banda
[2]	X	X	X	X	X	-	X	Heurística	Alocação de Banda
[10]	-	-	X	X	X	X	-	Heurística	Alocação de Banda
[11]	-	X	X	X	X	X	-	Heurística	Alocação de Banda
[6]	-	X	X	X	X	X	-	Aprendizagem por Reforço	RBMLSA
[12]	-	-	X	X	X	-	X	Heurística	Alocação de Banda
[14]	-	X	X	X	X	X	-	Aprendizagem Profunda por Reforço	Alocação de Banda
[3]	X	-	X	X	X	-	X	Heurística	RMLSA
[15]	-	X	X	X	X	X	-	Aprendizagem Profunda por Reforço	Alocação de Banda
[7]	-	-	-	X	X	X	-	Heurística	RBMLSA
[8]	-	-	X	X	X	-	-	Heurística	Utilização de Regeneradores
[13]	-	-	X	X	X	-	-	-	Arquitetura de Nó

TABELA II: Parâmetros referentes às bandas E, S, C e L [1].

Parâmetros	Banda E	Banda S	Banda C	Banda L
Frequência inicial (THz)	205,30	197,22	191,60	185,83
Frequência final (THz)	212,00	205,30	195,90	190,90
Número de slots	536	647	344	406
Figura de ruído (dB)	6	7	5,5	6
Coefficiente de atenuação (dB/km)	0,283	0,220	0,191	0,200

por Calderón *et al.* [11], no cenário analisado neste artigo. Vale salientar que todas as quatro estratégias utilizam apenas rotas fixas, ou seja, independente do estado da rede, sempre são as mesmas selecionadas entre os mesmos pares fonte-destino.

Desse modo, sabendo-se que a potência de ruído ASE, gerada nos amplificadores ópticos de linha ao longo dos enlaces ópticos, pode depender do produto entre o fator de ruído e a perda linear da fibra óptica [18], a ordem de preferência de banda que oferece menor quantidade de ruído ASE até a que oferece maior quantidade é a seguinte: $C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E$, de acordo com os dados apresentados na Tabela II [1]. Enquanto isso, todas as ordens de preferência possíveis utilizadas pelas partições nas estratégias propostas por Calderón *et al.* [11] são as seguintes: (1) $E \rightarrow S \rightarrow C \rightarrow L$; (2) $L \rightarrow C \rightarrow S \rightarrow E$; (3) $E \rightarrow S \rightarrow C \rightarrow L$; (4) $S \rightarrow C \rightarrow L \rightarrow E$; (5) $C \rightarrow L \rightarrow E \rightarrow S$; (6) $L \rightarrow E \rightarrow S \rightarrow C$; (7) $C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E$ e (8) $E \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow C$. Portanto, embora a melhor alocação de banda seja contemplada na opção (7) por Calderón *et al.* [11], ela é usada apenas em uma das duas partições da Estratégia 4.

Fig. 2 ilustra o número de chamadas aceitas pela rede em função da banda de transmissão analisada, considerando: (a) Estratégia 1; (b) Estratégia 2; (c) Estratégia 3 e (d) Estratégia 4. Verifica-se que a Estratégia 1 aloca quase 58,82% das chamadas aceitas pela rede na banda C, a qual resulta na menor quantidade de ruído ASE em comparação com as demais bandas. As Estratégias 3 e 4, embora tenham quase 53% das chamadas aceitas pela rede alocadas nas bandas C e S, diferem ligeiramente no número de chamadas aceitas na banda C (20,76% – Estratégia 3 e 45,25% – Estratégia 4). Além disso, a Estratégia 3 possui menos chamadas aceitas pela rede na banda E (28,66%) do que a Estratégia 4 (38,85%), resultando em um desempenho melhor para a Estratégia 3. Por fim, a Estratégia 2 apresenta o pior desempenho pois aloca aproximadamente 51,96% das chamadas aceitas pela rede na banda E, a que resulta no maior valor de ruído ASE em comparação com as demais.

Considerando-se a carga de 3600 Erlangs, obteve-se uma

probabilidade média de bloqueio de chamadas de aproximadamente $2,20 \times 10^{-3}$, com margem de erro de $2,01 \times 10^{-4}$, correspondendo a intervalos de confiança de 95% para 30 simulações realizadas.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, foram comparadas quatro estratégias de alocação de banda que utilizavam atribuições fixas e heurísticas, considerando a utilização conjunta das bandas S, C, L e E. Para isso, considerou-se como penalidade física o ruído ASE gerado nos amplificadores de potência, de linha e pré-amplificadores, presentes ao longo dos nós e enlaces ópticos. O desempenho foi analisado em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas e distribuições de chamadas aceitas pela rede entre as bandas de transmissão.

Observou-se que, para uma carga de 3600 Erlangs, a Estratégia 1 superou em 3,31 vezes a Estratégia 2, em 2,41 vezes a Estratégia 3 e em 2,65 vezes a Estratégia 4. Como a Estratégia 1 considerava atribuição fixa, percebeu-se que sua sequência de alocação de banda ($C \rightarrow L \rightarrow S \rightarrow E$) representou a melhor opção, em comparação com as utilizadas pelas heurísticas propostas por Calderón *et al.* [11], no cenário analisado neste artigo.

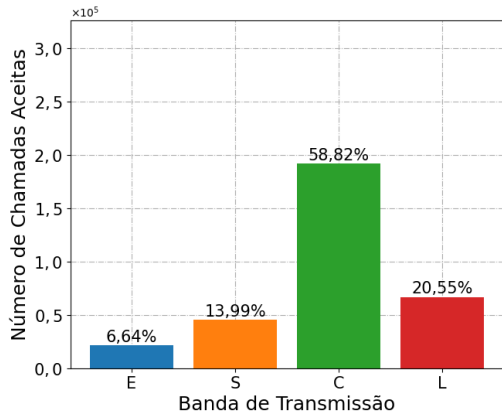
Percebeu-se ainda que a Estratégia 1 alocou quase 58,82% das chamadas aceitas pela rede na banda C e que as Estratégias 3 e 4, embora tivessem quase 53% das chamadas aceitas pela rede alocadas nas bandas C e S, diferiram ligeiramente no número de chamadas aceitas na banda C (20,76% – Estratégia 3 e 45,25% – Estratégia 4). Além disso, a Estratégia 3 apresentou menos chamadas aceitas pela rede na banda E (28,66%) do que a Estratégia 4 (38,85%), resultando em um desempenho melhor para a Estratégia 3. Por fim, a Estratégia 2 teve o pior desempenho pois alocou aproximadamente 51,96% das chamadas aceitas pela rede na banda E, a banda de transmissão que resultou no maior valor de ruído ASE em comparação com as demais.

AGRADECIMENTOS

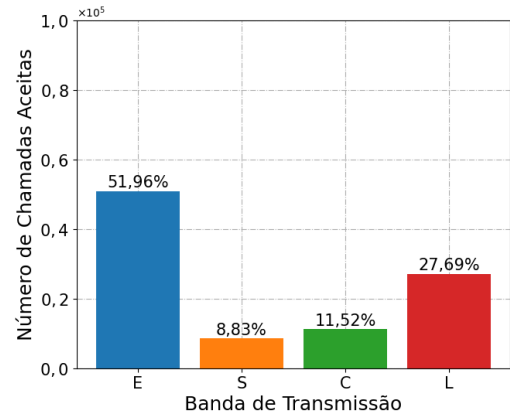
Os autores deste trabalho agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ/PB – Termo de Outorga nº 3067/2021) o apoio financeiro e à UFCG o apoio institucional.

REFERÊNCIAS

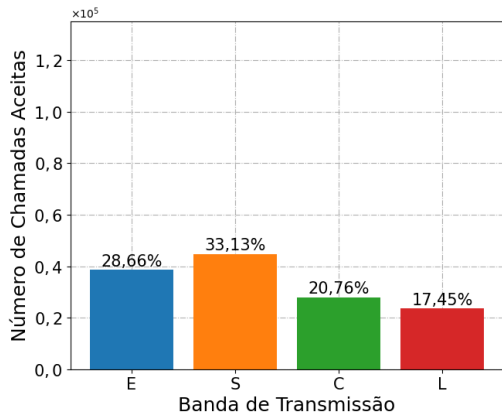
- [1] A. Ferrari, E. Virgillito, and V. Curri, “Band-division vs. space-division multiplexing: a network performance statistical assessment,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1041–1049, 2020.



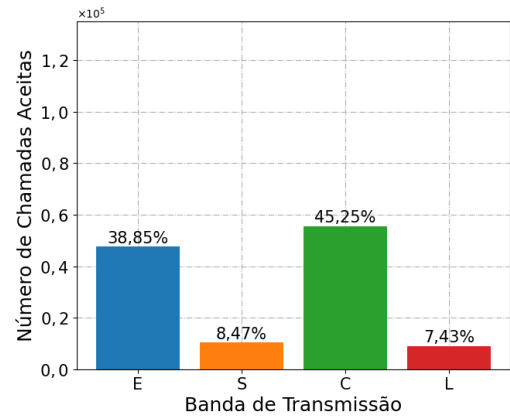
(a) Estratégia 1.



(b) Estratégia 2.



(c) Estratégia 3.



(d) Estratégia 4.

Fig. 2: Número de chamadas aceitas pela rede em função da banda de transmissão analisada, considerando: (a) Estratégia 1; (b) Estratégia 2; (c) Estratégia 3 e (d) Estratégia 4.

[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. Uzundis *et al.*, “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 *et al.*, “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] S. Hosseini *et al.*, “Migration strategy from c-band elastic optical network to c+1 multiband optical network,” in *International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*. IEEE, 2022, pp. 204–206.

[8] 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.

[9] N. Sambo *et al.*, “Provisioning in multi-band optical networks: A c+1+s-band use case,” in *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2019, pp. 1–4.

[10] M. Nakagawa *et al.*, “Performance evaluation of multi-band optical networks employing distance-adaptive resource allocation,” in *Opto-Electronics and Communications Conference*. IEEE, 2020, pp. 1–3.

[11] 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.

[12] M. Nakagawa *et al.*, “Adaptive link-by-link band allocation: A novel adaptation scheme in multi-band optical networks,” in *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. IEEE, 2021, pp. 1–6.

[13] M. Nakagawa, H. Kawahara, T. Seki, and T. Miyamura, “Highly efficient multi-band optical networks with wavelength-selective band switching,” *IEICE Transactions on Communications*, 2022.

[14] 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.

[15] M. Gonzalez *et al.*, “Improving multi-band elastic optical networks performance using behavior induction on deep reinforcement learning,” in *IEEE Latin-American Conference on Communications*, 2022, pp. 1–6.

[16] C. Natalino *et al.*, “The optical rl-gym: An open-source toolkit for applying reinforcement learning in optical networks,” in *International Conference on Transparent Optical Networks*. IEEE, 2020, pp. 1–5.

[17] 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.

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

[19] E. B. Sarmiento *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.