

Análise de Desempenho de Arquiteturas de Nó e de Enlace em Redes Ópticas Multibandas

Eloisa Bento Sarmiento, José Roberto do Nascimento Arcanjo, Helder Alves Pereira

Resumo—Neste artigo, analisam-se arquiteturas de nó e de enlace disponíveis na literatura, considerando o contexto de redes ópticas multibandas. Para isso, o ruído de emissão espontânea amplificada, gerado pela presença dos amplificadores ópticos na rede, é deduzido para cada uma delas e são analisadas três bandas de transmissão (S, C e L). Os resultados obtidos mostram que, para uma das arquiteturas de nó e de enlace mais utilizadas na literatura, seu desempenho é inferior frente às demais em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas e potência óptica de entrada por fatia espectral.

Palavras-Chave—Arquitetura de Nó e de Enlace, Potência Óptica, Probabilidade de Bloqueio de Chamada, Rede Óptica Multibanda, Relação Sinal-Ruído Óptica.

Abstract—In this paper, node and link architectures available in the literature are analyzed, considering the context of multiband optical networks. For this, the amplified spontaneous emission noise, generated by the presence of optical amplifiers in the network, is deduced for each one of them and three transmission bands (S, C and L) are analyzed. The results obtained show that, for one of the most used node and link architectures in the literature, its performance is inferior compared to the others in terms of calls blocking probability and input optical power per slot.

Keywords—Calls Blocking Probability, Input Optical Power, Multiband Optical Network, Node and Link Architecture, Optical Signal-to-Noise Ratio.

I. INTRODUÇÃO

A demanda por tráfego de dados tem crescido bastante nos últimos anos. Aplicações como tecnologia móvel de quinta geração (5G), realidade aumentada e transmissão de vídeo (*streaming*) com alta definição devem passar a exigir evoluções ainda maiores nas tecnologias de informação e comunicação, demandando, desse modo, mais largura de banda [1]. As redes ópticas multibandas (MB) têm sido consideradas como uma solução promissora para satisfazer tais requisitos. Nessas redes, os sinais são transmitidos utilizando fibras ópticas monomodo (SMF – *Single Mode Fiber*), abrangendo uma maior faixa de frequências, promovendo, desse modo, o aumento da capacidade do sistema óptico de transmissão [1].

As redes ópticas MB apresentam a vantagem de utilizar a infraestrutura das redes já existentes, diminuindo assim o custo de sua implementação nos sistemas ópticos de transmissão [2]. Todavia, nos sistemas que envolvem transmissão multibandas, 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. Um dos principais efeitos não-lineares associados à tecnologia MB e capaz de influenciar o desempenho dos sistemas é o efeito Raman estimulado (SRS – *Stimulated Raman Scattering*) [3]. O ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) também ganha notoriedade nessas redes, haja vista a possibilidade de nelas estarem presentes amplificadores ópticos com maiores figuras de ruído, por exemplo [4]. Desse modo, a análise da qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) em redes ópticas MB, considerando tais penalidades, é essencial para implementação de projetos de redes com arquiteturas mais eficientes [5].

Neste artigo, analisam-se as principais arquiteturas de nó e de enlace utilizadas na literatura, considerando o contexto de redes ópticas multibandas. Para isso, o ruído ASE, gerado pela presença dos amplificadores ópticos ao longo dos enlaces, é deduzido para cada uma das três configurações disponíveis na literatura. As métricas de desempenho utilizadas envolvem a potência de entrada por fatia espectral (*slot*) (P_{in}) e a probabilidade de bloqueio de chamadas (PB), sendo analisadas três bandas de transmissão: S, C e L. Desse modo, este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresenta-se o estado da arte com relação às arquiteturas de nó e de enlace utilizadas na literatura de redes ópticas multibandas. Na Seção III, descreve-se a dedução da potência de ruído ASE para cada uma das três arquiteturas de nó e de enlace descritas na Seção II. Na Seção IV, apresenta-se o cenário de simulação utilizado. Os resultados são discutidos na Seção V e, por fim, as conclusões são apresentadas na Seção VI.

II. ESTADO DA ARTE

As arquiteturas de nó diferem na presença, ou ausência, de amplificadores ópticos de potência (*booster*) (AP) e de pré-amplificadores (PA). Na literatura, é possível encontrar arquiteturas de enlace que diferem no número de trechos de fibras ópticas que são compensados pelos amplificadores ópticos de linha (s ou $s + 1$).

Com relação ao estado da arte, é possível encontrar diversas contribuições que utilizam essa variedade de arquiteturas de nó e de enlace, no entanto, sem priorizar a análise do impacto delas no desempenho das redes. Desse modo, não se observou nenhum trabalho na literatura que deduzisse a modelagem analítica do ruído ASE, nem que fizesse um comparativo dessas arquiteturas no contexto de redes ópticas multibandas.

Basicamente, observam-se apenas três tipos de arquiteturas de nó e de enlace na literatura, são eles: (1) AP, AL[$s + 1$], PA [1], [6]–[9]; (2) AP, AL[s], PA [10]–[13] e (3) AL[s] [2],

[5], [14]–[32]. O primeiro utiliza amplificadores de potência e pré-amplificadores nos nós e considera que os amplificadores de linha compensam $s+1$ trechos de fibra óptica ao longo dos enlaces de um determinado caminho óptico. O segundo difere do primeiro na consideração de trechos ópticos compensados pelos amplificadores de linha, s trechos ao invés de $s+1$. O terceiro considera que existem amplificadores ópticos de linha e que esses compensam s trechos de fibra óptica.

Na Tabela I, apresenta-se a distribuição dos artigos disponíveis na literatura em termos de arquiteturas de nó e de enlace utilizadas. Percebe-se ainda que 16,67% consideraram a arquitetura de nó e de enlace AP, AL[$s+1$], PA (5 artigos); 13,33% a AP, AL[s], PA (4 artigos) e 70,00% a AL[s] (21 artigos).

III. MODELAGEM ANALÍTICA DO RUÍDO ASE

A arquitetura de nó, utilizada neste artigo para redes ópticas MB, baseia-se na arquitetura de comutação espectral (SS – *Spectrum Switching*) proposta por Simeonidou *et al.* [33] e se encontra ilustrada na Figura 1. Essa arquitetura conta com dispositivos como transmissores (TX), comutadores (Switch), multiplexadores (MUX), amplificadores de potência (AP), pré-amplificadores (PA), demultiplexadores (DEMUX) e receptores (RX), por exemplo.

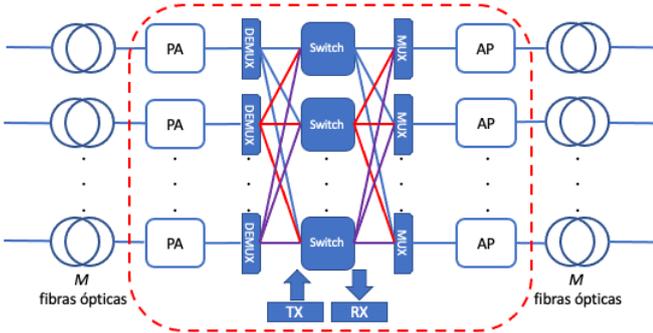


Fig. 1: Arquitetura de nó utilizada neste artigo para redes ópticas multibandas.

Considerando que os amplificadores ópticos compensam exatamente as perdas dos nós e dos enlaces, a expressão da relação sinal-ruído óptica no nó destino ($OSNR_{out}$) pode ser calculada da seguinte forma:

$$OSNR_{out} = \frac{P_{in}}{N_{in} + N_{amp-TOTAL}}, \quad (1)$$

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:

$$N_{AMP-TOTAL} = N_{AMP-AP} + N_{AMP-AL} + N_{AMP-PA}, \quad (2)$$

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.

Sabendo-se que o ruído ASE gerado pelo amplificador óptico é quantificado por [34]

$$N_{AMP} = h \cdot \nu \cdot F_{AMP} \cdot B_{Ref} \cdot (G_{AMP} - 1), \quad (3)$$

em que N_{AMP} representa o ruído ASE gerado devido à transmissão do sinal em duas polarizações da onda eletromagnética, h a constante de Planck, ν a frequência do sinal óptico, F_{AMP} o fator de ruído do amplificador, B_{Ref} a largura de banda de referência e G_{AMP} o ganho linear do amplificador. Considerando os dispositivos presentes na arquitetura de nó e de enlace na configuração: AP, AL[$s+1$], PA, tem-se que:

$$N_{AMP-AP} = h \cdot \nu \cdot F_{AMP} \cdot B_{Ref} \cdot \frac{l \cdot (L_{Sw} \cdot L_{Mx}^2 \cdot L_{Dx} - 1)}{L_{Mx}}, \quad (4)$$

$$N_{AMP-AL} = h \cdot \nu \cdot F_{AMP} \cdot B_{Ref} \cdot \sum_{i=1}^l \left[\frac{s_i}{L_{Mx}} \cdot (L_{Mx} \cdot L_{Dx} \cdot L_{Fbi}^{1/(s_i+1)} - 1) \right] \quad (5)$$

e

$$N_{AMP-PA} = h \cdot \nu \cdot F_{AMP} \cdot B_{Ref} \cdot \sum_{i=1}^l \frac{[L_{Mx} \cdot L_{Dx}^2 \cdot L_{Sw} \cdot L_{Fbi}^{1/(s_i+1)} - 1]}{L_{Mx} \cdot L_{Dx} \cdot L_{Sw}}, \quad (6)$$

em que l representa o número de enlaces da rota, L_{Sw} a perda linear do switch, L_{Mx} a perda linear do multiplexador óptico, L_{Dx} a perda linear do demultiplexador, L_{Fbi} a perda linear da fibra óptica referente ao i -ésimo enlace e s_i o número de amplificadores ópticos de linha no i -ésimo enlace óptico.

Para a arquitetura de nó e de enlace na configuração: AP, AL[s], PA, tem-se que:

$$N_{AMP-AP} = h \cdot \nu \cdot F_{AMP} \cdot B_{Ref} \cdot \frac{l \cdot (L_{Sw} \cdot L_{Mx}^2 \cdot L_{Dx} - 1)}{L_{Mx}}, \quad (7)$$

$$N_{AMP-AL} = h \cdot \nu \cdot F_{AMP} \cdot B_{Ref} \cdot \sum_{i=1}^l \left[\frac{s_i}{L_{Mx}} \cdot (L_{Mx} \cdot L_{Dx} \cdot L_{Fbi}^{1/s_i} - 1) \right] \quad (8)$$

e

$$N_{AMP-PA} = h \cdot \nu \cdot F_{AMP} \cdot B_{Ref} \cdot \frac{l \cdot (L_{Mx} \cdot L_{Dx}^2 \cdot L_{Sw} - 1)}{L_{Mx} \cdot L_{Dx} \cdot L_{Sw}}. \quad (9)$$

Por último, para a arquitetura de nó e de enlace na configuração: AL[s], tem-se que:

$$N_{AMP-AP} = 0. \quad (10)$$

Para $s_i \geq 3$, como é o caso para a utilização da topologia NSFNet considerada neste artigo e ilustrada na Figura 2, tem-se que:

TABELA I: Distribuição dos artigos disponíveis na literatura em termos de arquiteturas de nó e de enlace.

Referência	AP	AL[s + 1]	AL[s]	PA	Referência	AP	AL[s + 1]	AL[s]	PA	Referência	AP	AL[s + 1]	AL[s]	PA
Landero <i>et al.</i> [6]	X	X		X	Ferrari <i>et al.</i> [14]			X		D'Amico <i>et al.</i> [23]				X
Sadeghi <i>et al.</i> [1]	X	X		X	Ferrari <i>et al.</i> [18]			X		Jana <i>et al.</i> [25]				X
Sambo <i>et al.</i> [7]	X	X		X	Ferrari <i>et al.</i> [15]			X		Nikolaou <i>et al.</i> [27]				X
Sena <i>et al.</i> [8]	X	X		X	Mitra <i>et al.</i> [19]			X		Sadeghi <i>et al.</i> [30]				X
Venda <i>et al.</i> [9]	X	X		X	Sambo <i>et al.</i> [16]			X		Uzunidis <i>et al.</i> [28]				X
Okamoto <i>et al.</i> [10]	X		X	X	Ferrari <i>et al.</i> [2]			X		Uzunidis <i>et al.</i> [29]				X
Okamoto <i>et al.</i> [11]	X		X	X	Sambo <i>et al.</i> [17]			X		Virgillito <i>et al.</i> [31]				X
Ferrari <i>et al.</i> [12]	X		X	X	Uzunidis <i>et al.</i> [20]			X		D'Amico <i>et al.</i> [24]				X
Devigili <i>et al.</i> [13]	X		X	X	Correia <i>et al.</i> [21]			X		Jana <i>et al.</i> [26]				X
Cantono <i>et al.</i> [5]			X		Correia <i>et al.</i> [22]			X		Yao <i>et al.</i> [32]				X

$$N_{AMP-AL} = h \cdot \nu \cdot F_{AMP} \cdot B_{Ref} \cdot \sum_{i=1}^l (A_i + B_i + C_i), \quad (11)$$

em que:

$$A_i = \frac{L_{Sw} \cdot L_{Mx}^2 \cdot L_{Dx} \cdot L_{Fbi}^{1/s_i} - 1}{L_{Mx}}, \quad (12)$$

$$B_i = (s_i - 2) \cdot \frac{L_{Mx} \cdot L_{Dx} \cdot L_{Fbi}^{1/s_i} - 1}{L_{Mx}}, \quad (13)$$

$$C_i = \frac{L_{Sw} \cdot L_{Mx} \cdot L_{Dx}^2 \cdot L_{Fbi}^{1/s_i} - 1}{L_{Mx} \cdot L_{Dx} \cdot L_{Sw}} \quad (14)$$

e

$$N_{AMP-PA} = 0. \quad (15)$$

IV. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

As simulações realizadas neste artigo utilizaram a topologia NSFNet, ilustrada na Figura 2, bem como os parâmetros apresentados na Tabela II.

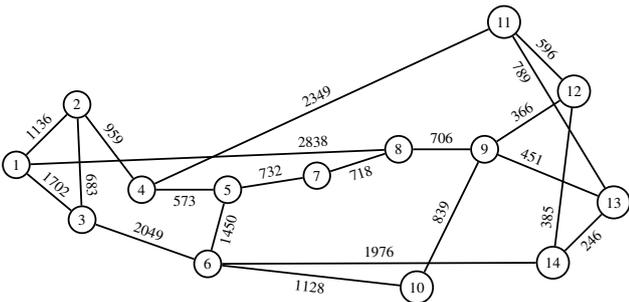


Fig. 2: Topologia NSFNet com as distâncias em quilômetros.

Três cenários de simulação foram analisados, sendo eles: (1) apenas transmissão na banda S, (2) apenas na banda C e (3) apenas na banda L. Para cada cenário, definiu-se inicialmente o valor da carga na rede correspondente a uma probabilidade de bloqueio de 10^{-3} , considerando 20 dBm de potência óptica de entrada por *slot* e utilizando a arquitetura de nó e de enlace de referência (AP, AL[s], PA). Os seguintes valores foram encontrados: (1) 1600 Erlangs para a banda S, (2) 800 Erlangs para a banda C e (3) 1000 Erlangs para a banda L. Os parâmetros específicos de cada cenário de simulação se encontram descritos na Tabela III [12].

TABELA II: Parâmetros utilizados em todos os cenários de simulação.

Parâmetro	Valor
Distância entre os amplificadores de linha	70 km
Formatos de modulação	4, 8, 16, 32 e 64-QAM
Largura de banda de referência	12,5 GHz
Largura de banda de um <i>slot</i>	12,5 GHz
Perda no demultiplexador	0 dB
Perda no multiplexador	0 dB
Perda no <i>switch</i>	5 dB
Relação sinal-ruído óptica de entrada	30 dB
Taxas de transmissão de bit	De 100 a 500 Gbps com distribuição uniforme

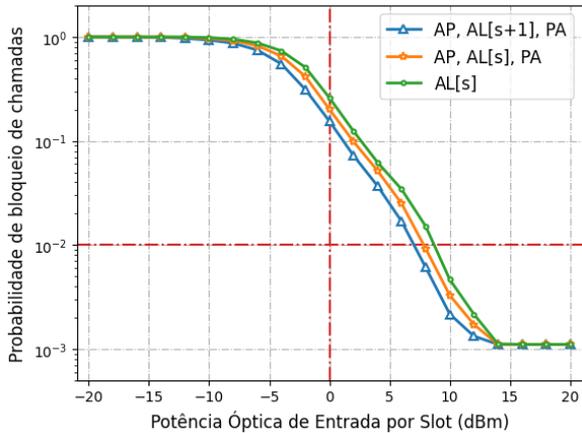
TABELA III: Parâmetros específicos de cada cenário de simulação [12].

Parâmetro	Banda S	Banda C	Banda L
Atenuação da fibra óptica (dB/km)	0,220	0,191	0,200
Figura de ruído (dB)	7,0	5,5	6,0
Número de <i>slots</i> por enlace	647	344	406

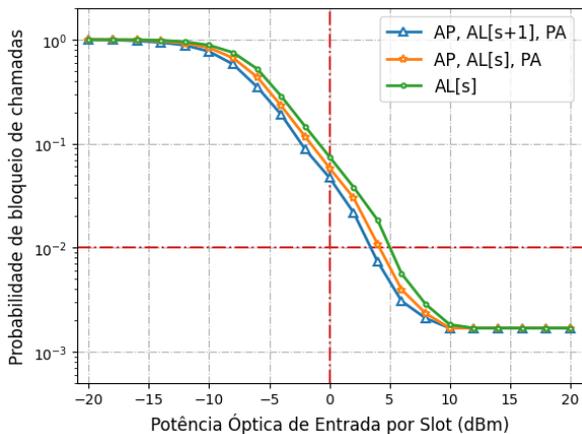
Para realização das simulações, utilizou-se uma plataforma computacional de código aberto (SONDA) [35], [36], adaptada para uso em redes ópticas multibandas. Para estabelecimento de uma chamada, é necessário que os seguintes critérios sejam atendidos: (1) existência de rota entre os nós fonte e destino, (2) recursos espectrais disponíveis e (3) QoT acima do limiar pré-estabelecido. Se não houver rota, recurso disponível e QoT suficiente para estabelecer a chamada, ela será bloqueada. Esse processo se repete até que o número de chamadas, ou bloqueios, estabelecido previamente pelo usuário, seja atingido. Utilizou-se o algoritmo de Dijkstra [37] para alocação de rota, o qual é responsável por encontrar o caminho mais curto entre dois nós de uma determinada rede. Para alocação de recursos espectrais, foi empregado o algoritmo de primeiro encaixe (*first fit*) [37], cuja função é de alocar o primeiro conjunto contínuo e contíguo de *slots* disponíveis que atenda à requisição. Considerou-se tráfego dinâmico em todos os cenários, bem como um número de bloqueios igual a 1000.

V. RESULTADOS

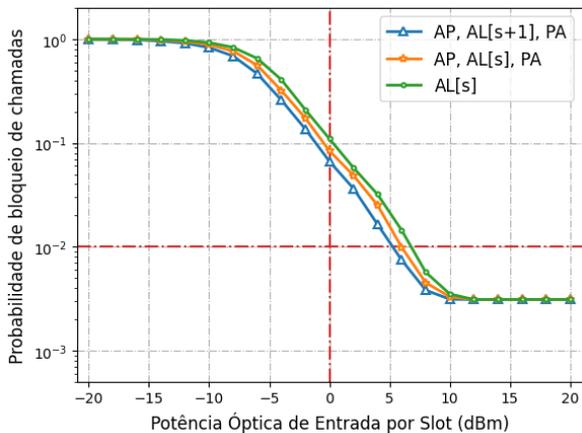
Na Figura 3, ilustra-se a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da potência óptica de entrada por *slot*, considerando diferentes arquiteturas de nó e de enlace, utilizando apenas: (a) a banda S, (b) a banda C e (c) a banda L.



(a) Banda S.



(b) Banda C.



(c) Banda L.

Fig. 3: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função da potência óptica de entrada por slot, considerando diferentes arquiteturas de nó e de enlace, utilizando: (a) a banda S, (b) a banda C e (c) a banda L.

Percebe-se que existe um comportamento de um maior número de chamadas bloqueadas para valores de P_{in} abaixo de -10 dBm e um menor número de chamadas bloqueadas para valores de P_{in} acima de 14 dBm (banda S) e de 10 dBm (bandas C e L). Esse comportamento é observado na literatura [38]

e remete ao fato de que, para valores baixos da potência óptica de entrada por slot, o ruído ASE é predominante, tornando a $OSNR_{out}$ cada vez menor, inviabilizando QoT para as chamadas solicitadas na rede. Com relação aos valores maiores da potência óptica de entrada por slot, como neste artigo não se considera penalidades não lineares, a $OSNR_{out}$ se torna cada vez maior, fazendo com que os bloqueios aconteçam predominantemente por falta de recursos espectrais.

De acordo com a Figura 3, considerando $P_{in} = 0$ dBm, para todas as bandas de transmissão analisadas (S, C e L), a arquitetura AP, AL[s + 1], PA foi a que apresentou melhor desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, sendo seguida pela arquitetura AP, AL[s], PA e, por fim, a AL[s], conforme descrito na Tabela IV. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que uma melhor distribuição de amplificadores ópticos entre os nós e os enlaces da rede pode diminuir seus respectivos ganhos, reduzindo, dessa forma, a quantidade de potência de ruído ASE produzida em cada um deles (vide Eq.(3)).

TABELA IV: Probabilidade de bloqueio de chamadas para cada banda de transmissão, considerando $P_{in} = 0$ dBm.

Arquitetura	Banda S	Banda C	Banda L
AP, AL[s + 1], PA	15,47%	4,71%	6,64%
AP, AL[s], PA	20,13%	5,85%	8,40%
AL[s]	25,98%	7,49%	10,97%

Considerando um valor fixo de probabilidade de bloqueio de chamadas ($PB = 1\%$), observou-se que, com um dado valor de P_{in} , a arquitetura AL[s] atingiu esse baixo nível de bloqueio somente após as outras duas arquiteturas (9 dBm para a banda S, 5,3 dBm para a banda C e 7,0 dBm para a banda L). Praticamente, a diferença entre os valores de P_{in} , considerando a arquitetura AL[s] como referência e a arquitetura AP, AL[s + 1], PA foi de 1,7 dB para as bandas S e C e 1,6 dB para a banda L. Em comparação com a arquitetura AP, AL[s], PA, essa diferença foi de 1,1 dB para as bandas S e C e 1,0 dB para a banda L, conforme descrito na Tabela V. Para o valor de carga de 1000 Erlangs e $P_{in} = 20$ dBm, obteve-se uma probabilidade média de bloqueio de chamadas de aproximadamente $1,42 \times 10^{-3}$, com margem de erro de $6,77 \times 10^{-5}$, correspondendo a intervalos de confiança de 95%, considerando 30 simulações realizadas para a banda L, utilizando a arquitetura de nó e de enlace AP, AL[s], PA.

TABELA V: P_{in} , em dBm, considerando um valor fixo da probabilidade de bloqueio de chamadas em 1%.

Arquitetura	Banda S	Banda C	Banda L
AP, AL[s + 1], PA	7,3	3,6	5,4
AP, AL[s], PA	7,9	4,2	6,0
AL[s]	9,0	5,3	7,0

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, foram analisadas as três arquiteturas de nó e de enlace utilizadas na literatura no contexto de redes ópticas multibandas. O ruído ASE, gerado pela presença dos amplificadores ópticos na rede, foi deduzido para cada uma

das configurações e a métrica de desempenho utilizada foi a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da potência óptica de entrada por *slot*.

Percebeu-se que, para as bandas de transmissão analisadas (S, C e L), a arquitetura AP, AL[$s + 1$], PA apresentou o melhor desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, seguida pelas arquiteturas AP, AL[s], PA e AL[s] para toda a faixa de potência de entrada por *slot* analisada. Além disso, considerando $PB = 1\%$, observou-se que, com um dado valor de P_{in} , a arquitetura AL[s], atingiu esse baixo nível de bloqueio somente após as outras duas arquiteturas. Embora seja uma das mais utilizadas no contexto de redes ópticas multibandas, a arquitetura AL[s] resultou em desempenho inferior nos cenários analisados neste artigo.

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] R. Sadeghi *et al.*, “Transparent vs translucent multi-band optical networking: capacity and energy analyses,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 11, pp. 3486–3498, 2022.
- [2] A. Ferrari *et al.*, “Assessment on the achievable throughput of multi-band it-u-t g. 652. d fiber transmission systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 16, pp. 4279–4291, 2020.
- [3] E. Paz and G. Saavedra, “Maximum transmission reach for optical signals in elastic optical networks employing band division multiplexing,” *arXiv preprint arXiv:2011.03671*, 2020.
- [4] R. K. Jana *et al.*, “Performance evaluation of conventional spectrum-allocation policies for c+ l band elastic optical networks,” in *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*, vol. 11, no. 1, pp. A103–A110, 2019.
- [6] S. E. Landero *et al.*, “Link power optimization for s+ c+ l multi-band wdm coherent transmission systems,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2022, pp. 1–3.
- [7] N. Sambo *et al.*, “Network upgrade exploiting multi band: S- or e-band?” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 14, no. 9, pp. 749–756, 2022.
- [8] M. Sena *et al.*, “Dsp-based link tomography for amplifier gain estimation and anomaly detection in c+l-band systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 11, pp. 3395–3405, 2022.
- [9] P. Venda, J. Rebol, and L. Cancela, “Impact of traffic load and spectral occupancy on gaussian noise models performance for multiband networks,” in *International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2022, pp. 240–245.
- [10] S. Okamoto *et al.*, “5-band (o, e, s, c, and l) wdm transmission with wavelength adaptive modulation format allocation,” in *European Conference on Optical Communication (ECOC)*. VDE, 2016, pp. 1–3.
- [11] —, “A study on the effect of ultra-wide band wdm on optical transmission systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1061–1070, 2019.
- [12] 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.
- [13] M. Devigili *et al.*, “Multi-band optical network assisted by gnpy: an experimental demonstration,” in *IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, 2022, pp. 1–5.
- [14] A. Ferrari *et al.*, “Upgrade capacity scenarios enabled by multi-band optical systems,” in *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [15] —, “Multi-band optical systems to enable ultra-high speed transmissions,” in *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*. Optica Publishing Group, 2019, p. ci_2_3.
- [16] N. Sambo *et al.*, “Provisioning in multi-band optical networks: A c+l+ s-band use case,” in *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2019, pp. 1–4.
- [17] —, “Provisioning in multi-band optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 9, pp. 2598–2605, 2020.
- [18] A. Ferrari, D. Pileri, E. Virgillito, and V. Curri, “Power control strategies in c+l optical line systems,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2019, pp. 1–3.
- [19] A. Mitra *et al.*, “Effect of reduced link margins on c+ l band elastic optical networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 10, pp. C86–C93, 2019.
- [20] D. Uzunidis, C. Matrakidis, A. Stavdas, and A. Lord, “Power optimization strategy for multi-band optical systems,” in *European Conference on Optical Communications (ECOC)*. IEEE, 2020, pp. 1–4.
- [21] B. Correia, R. Sadeghi, E. Virgillito, A. Napoli, N. Costa, J. Pedro, and V. Curri, “Power control strategies and network performance assessment for c+ l+ s multiband optical transport,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 13, no. 7, pp. 147–157, 2021.
- [22] —, “Multiband power control impact on the transmission capacity of optical line systems,” in *IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM)*. IEEE, 2021, pp. 1–2.
- [23] A. D’Amico, E. London, E. Virgillito, A. Napoli, and V. Curri, “Inter-band gsnr degradations and leading impairments in c+ l band 400g transmission,” in *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. IEEE, 2021, pp. 1–3.
- [24] A. D’Amico *et al.*, “Scalable and disaggregated ggn approximation applied to a c+l+ s optical network,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 11, pp. 3499–3511, 2022.
- [25] R. K. Jana *et al.*, “Machine learning-assisted nonlinear-impairment-aware proactive defragmentation for c+l band elastic optical networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 14, no. 3, pp. 56–68, 2022.
- [26] R. K. Jana, B. C. Chatterjee, A. P. Singh, A. Srivastava, B. Mukherjee, A. Lord, and A. Mitra, “Quality-aware resource provisioning for multiband elastic optical networks: a deep-learning-assisted approach,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 14, no. 11, pp. 882–893, 2022.
- [27] K.-F. Nikolaou *et al.*, “Quantifying the impact of physical layer effects in an optical multi-band system,” in *Telecommunications Forum (TELFOR)*. IEEE, 2021, pp. 1–4.
- [28] D. Uzunidis, F. Apostolopoulou, G. Pagiatakis, and A. Stavdas, “Analysis of available components and performance estimation of optical multi-band systems,” *Eng*, vol. 2, no. 4, pp. 531–543, 2021.
- [29] D. Uzunidis *et al.*, “Connectivity challenges in e, s, c and l optical multi-band systems,” in *European Conference on Optical Communication (ECOC)*. IEEE, 2021, pp. 1–4.
- [30] R. Sadeghi, B. Correia, E. Virgillito, A. Napoli, N. Costa, J. Pedro, and V. Curri, “Cost-effective capacity increase of deployed optical networks to support the future internet: the multi-band approach,” in *International Conference on Network of the Future (NoF)*. IEEE, 2021, pp. 1–7.
- [31] E. Virgillito *et al.*, “Single-vs. multi-band optimized power control in c+ l wdm 400g line systems,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2021, pp. 1–3.
- [32] Q. Yao *et al.*, “Snr re-verification-based routing, band, modulation, and spectrum assignment in hybrid c-c+l optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 11, pp. 3456–3469, 2022.
- [33] D. Simeonidou, N. Amaya, and G. Zervas, “Infrastructure and architectures on demand for flexible and elastic optical networks,” in *European Conference and Exhibition on Optical Communication*. Optical Society of America, Setembro 2012, pp. Tu–3.
- [34] D. A. A. Mello *et al.*, “Optical networking with variable-code-rate transceivers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 2, pp. 257–266, 2014.
- [35] 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.
- [36] G. B. Guerra-Júnior *et al.*, “Simulador de código livre aplicado em redes Óticas com multiplexação por divisão espacial,” in *XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*. SBrT, 2021, pp. 1–5.
- [37] H. Zang *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.
- [38] H. A. Pereira *et al.*, “Impact of amplifier noise figure modeling in simulations of impairment-aware all-optical networks,” *Photonic Network Communications*, vol. 19, no. 1, p. 110, 2010.