

# Análise do Impacto de Penalidades Físicas na Banda C para uma Rede Óptica Elástica

Ademar Alves dos Santos-Júnior, Helder Alves Pereira e Raul Camelo de Andrade Almeida-Júnior

**Resumo**—Neste artigo, analisa-se o impacto de penalidades físicas dependentes do comprimento de onda, em específico a atenuação da fibra óptica e a figura de ruído dos amplificadores ópticos, considerando transmissões na banda C em uma rede óptica elástica. Foram utilizadas a probabilidade de bloqueio de chamadas e a distribuição dos formatos de modulação entre as chamadas aceitas pela rede como métricas de avaliação. Os resultados obtidos indicam que considerar essa dependência resultou em um desempenho de até 88 vezes melhor, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, quando comparado com a utilização clássica desses parâmetros na literatura (ambos os valores fixos e independentes do comprimento de onda).

**Palavras-Chave**—Otimização, Penalidade Física, Rede Óptica Elástica, Simulação, Transmissão de Múltiplas Bandas.

**Abstract**—In this paper, we analyze the impact of wavelength-dependent physical penalties, specifically the optical fiber attenuation and the optical amplifiers noise figure, considering C-band transmissions in an elastic optical network. The calls blocking probability and the distribution of modulation formats among the calls accepted by the network were used as evaluation metrics. The results obtained indicate that considering this dependence resulted in a performance of up to 88 times better, in terms of calls blocking probability, when compared to the classical use of these parameters in the literature (both fixed and wavelength independent values).

**Keywords**—Elastic Optical Network, Multi-Band Transmission, Optimization, Physical Penalty, Simulation.

## I. INTRODUÇÃO

Nos anos 1990, as redes ópticas multiplexadas por comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) possibilitaram o envio de múltiplos comprimentos de onda em uma fibra monomodo (SMF – *Single Mode Fiber*), de modo a ampliar a capacidade de transmissão de dados nas redes ópticas [1]. A utilização das redes ópticas elásticas (EON – *Elastic Optical Network*) permitiu o uso de múltiplos formatos de modulação e adaptou a largura de banda necessária também de acordo com a taxa de transmissão de bit, otimizando assim o espectro de frequência [2]. Ainda nesse contexto, as redes ópticas multiplexadas por divisão espacial (SDM – *Spatial Division Multiplexing*) forneceram grandes possibilidades de uso de múltiplas fibras, fibras com vários núcleos, com diversos modos e até uma combinação de diferentes núcleos e modos de forma a aumentar a capacidade das redes ópticas [3].

Ademar Alves dos Santos-Júnior 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: ademarsantos@ee.ufcg.edu.br e helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

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

No entanto, sob certas circunstâncias, o uso da tecnologia SDM pode ser bastante dispendioso, necessitando de um maior número de dispositivos, aumentando de certa forma o custo e o consumo de energia [4].

Considerando a limitação espectral da banda C, o desenvolvimento de novos amplificadores ópticos tem permitido a utilização de outras bandas para transmissão dos sinais ópticos [4]. A utilização de amplificadores a fibra óptica dopada com Érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*) e de sistemas de amplificação baseados no efeito Raman com diferentes configurações (completamente Raman, Raman com EDFA ou até mesmo amplificadores ópticos bombeados remotamente) ampliaram a transmissão dos sinais ópticos para as bandas L e S, além da banda C [4].

Nesse contexto, nos últimos cinco anos, o conceito de redes ópticas, que utilizam transmissão em múltiplas bandas (MBT – *Multi-Band Transmission*), vem ganhando bastante atenção na comunidade científica. Basicamente, as redes ópticas MBT oferecem a oportunidade de se explorar as janelas que fornecem valores baixos de atenuação em fibras ópticas SMF do tipo ITU-T G-652.D, expandindo a capacidade dos sistemas ópticos em quase 11 vezes a capacidade da banda C ou em quase 5 vezes a capacidade conjunta das bandas C e L [5]. A grande vantagem dessas redes ópticas é o alto potencial, em termos de custo, para eventuais atualizações dos sistemas ópticos, já que aproveitam a infraestrutura já existente [5]. É importante mencionar que já se encontram no mercado sistemas ópticos que utilizam as bandas C e L, direcionando as pesquisas para transmissão de dados em outras bandas (O, E e S, por exemplo) [5]. Além disso, quando se considera a degradação da qualidade de transmissão do sinal óptico (QoT – *Quality of Transmission*), deve-se levar em consideração as particularidades de transmissão em cada uma das diversas bandas (O, E, S, C e L) [6].

Neste artigo, analisa-se o impacto de penalidades físicas dependentes do comprimento de onda, em específico a atenuação da fibra óptica e a figura de ruído dos amplificadores ópticos, em transmissões na banda C, considerando três cenários de simulação em uma rede óptica elástica. Considera-se esse estudo como preliminar para futuras análises e estimativas em outras bandas de transmissão além da banda C (O, E, S e L, por exemplo). Está organizado da seguinte forma: na Seção II, apresenta-se o estado da arte sobre como as penalidades físicas foram consideradas no cenário de redes ópticas MBT. Na Seção III, descreve-se a modelagem das penalidades físicas consideradas neste trabalho. Na Seção IV, apresentam-se os parâmetros, topologia e cenários de simulação utilizados. Na Seção V, analisam-se os resultados obtidos e, por fim, as conclusões são apresentadas na Seção VI.

## II. ESTADO DA ARTE

Alguns autores têm trabalhado com simulações em EONs, considerando tráfego dinâmico e incluindo em suas considerações as penalidades físicas em diferentes bandas de transmissão [7]–[16]. Alguns consideram o ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) e as interferências não lineares dependentes do comprimento de onda [7]–[12]. Outros ainda consideram a abordagem do alcance máximo obtido para cada formato de modulação [13]–[16].

Nesse contexto, Sambo et al. [7] propuseram um fluxograma para estabelecimento das chamadas baseado na atribuição da primeira banda de transmissão utilizada, dentre as bandas S, C e L, considerando a atenuação e a dispersão dependentes do comprimento de onda, além das interferências não lineares e o espalhamento Raman estimulado (SRS – *Stimulated Raman Scattering*). Em [8] e [9], os autores estenderam esse fluxograma para atender também as bandas O e E. Nakagawa et al. [10] propuseram uma heurística para alocação de recursos nas bandas S, C e L, por meio do uso em conjunto dos formatos de modulação mais eficientes e as características físicas das bandas. Dessa forma, obtiveram redução nas margens da relação sinal-ruído óptica entre as chamadas, melhorando o desempenho da rede no cenário analisado. Uzunidis et al. [11] desenvolveram uma ferramenta de planejamento que envolve um algoritmo de roteamento, atribuição de formato de modulação e espectro. Foram considerados o ruído ASE, a mistura de quatro ondas e o SRS nas bandas O, S, C e L. Em [12], Sadeghi et al. propuseram diferentes algoritmos de alocação de nós translúcidos com o objetivo de minimizar o consumo de energia nas bandas de transmissão S, C, L e U. Paz et al. [13] fizeram um estudo sobre o alcance máximo da propagação dos sinais ópticos em um ambiente multi-banda para uma variedade de formatos de modulação com valores de taxa de erro por bit comumente usados em EONs. Calderón et al. [14] propuseram três algoritmos para atribuição de bandas de transmissão, considerando as bandas E, S, C e L. Morales et al. [15] propuseram um esquema, baseado em aprendizagem por reforço, para resolver o problema do roteamento, atribuição de banda de transmissão, formato de modulação e espectro, considerando as bandas E, S, C e L. Sheik et al. [16] propuseram um esquema de provisionamento de recursos baseado em aprendizagem profunda por reforço, considerando as bandas E, S, C e L.

Desse modo, o objetivo desses trabalhos não foi de analisar exclusivamente o desempenho das redes EON-MBT com relação à dependência das penalidades físicas com o comprimento de onda. De acordo com o estado da arte, nenhum trabalho, até o momento, analisou o impacto conjunto de diferentes perfis da atenuação da fibra óptica e da figura de ruído dos amplificadores ópticos, conforme realizado neste artigo.

## III. MODELAGEM DAS PENALIDADES FÍSICAS

Neste artigo, considerou-se a arquitetura do nó denominada de comutação espectral (*spectrum switching*) [17]. Essa arquitetura conta com os seguintes dispositivos ópticos: transmissores, comutadores, multiplexadores, demultiplexadores, receptores, além de amplificadores. Considerou-se também que os

amplificadores ópticos de potência e pré-amplificadores, presentes nos nós, e os amplificadores ópticos de linha, presentes ao longo dos enlaces, compensam exatamente as perdas dos nós e dos enlaces.

O ruído ASE, gerado nos amplificadores ópticos, foi modelado de acordo com Cavalcante et al. [18]. Dessa forma, a relação sinal-ruído óptica obtida no nó destino ( $OSNR_{out}$ ) pode ser calculada conhecendo-se os valores das perdas nos dispositivos, ganhos e cálculo do ruído ASE gerado nos amplificadores ópticos. A relação sinal-ruído óptica de limiar ( $OSNR_{th}$ ), dependente da taxa de transmissão de bit, do formato de modulação e da relação sinal ruído por bit ( $snr_b$ ), pode ser utilizada como parâmetro de avaliação da QoT da solicitação de chamada, em comparação com o valor obtido da  $OSNR_{out}$  [18]. Considerando uma taxa de erro por bit máxima tolerável de  $10^{-3}$  e utilizando código corretor de erro (FEC – *Forward Error Correction*), para o formato de modulação 4-QAM, tem-se que  $snr_b = 6,79$  dB, 8-QAM,  $snr_b = 8,58$  dB, 16-QAM,  $snr_b = 10,52$  dB, 32-QAM,  $snr_b = 12,59$  dB, e 64-QAM,  $snr_b = 14,77$  dB [19].

Fig. 1 ilustra o coeficiente de atenuação para dois tipos de fibra óptica (G652.A e G652.D) (eixo à esquerda) [20], bem como a figura de ruído de um EDFA (eixo à direita) [21], ambos em função do comprimento de onda. A dependência desses dois parâmetros com o comprimento de onda ( $\alpha(\lambda)$  e  $NF(\lambda)$ ) foi modelada de acordo com dados disponíveis na literatura para transmissão na banda C [20], [21].

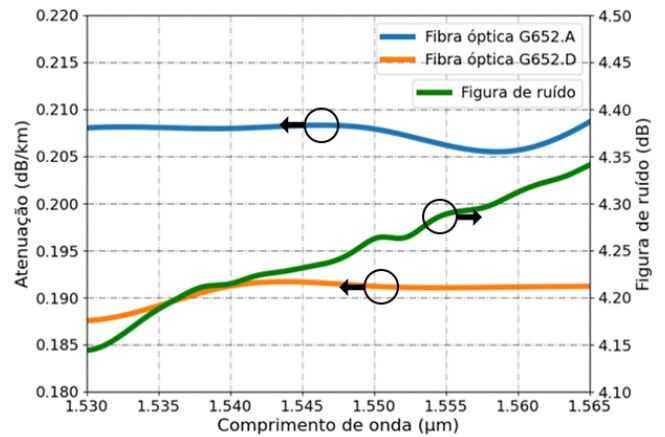


Fig. 1: Coeficiente de atenuação, em dB/km, para dois tipos de fibra óptica (G652.A e G652.D) (eixo à esquerda) [20], bem como a figura de ruído, em dB, de um EDFA (eixo à direita) [21], ambos em função do comprimento de onda.

## IV. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

As simulações realizadas neste artigo utilizaram a topologia NSFNet, ilustrada em Fig. 2, e os parâmetros descritos na Tabela I.

Três cenários de simulação foram analisados ( $CS1$ ,  $CS2$  e  $CS3$ ).  $CS1$  considerou o desempenho da rede frente a um cenário em que tanto o coeficiente de atenuação da fibra óptica

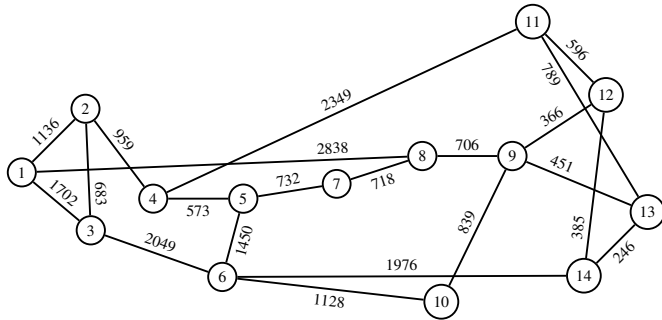


Fig. 2: Topologia NSFNet.

TABELA I: Parâmetros utilizados nas simulações.

| Parâmetro                                  | Valor                                       |
|--|---|
| Distância entre os amplificadores de linha | 70 km                                       |
| Formatos de modulação                      | 4, 8, 16, 32 e 64-QAM                       |
| Comprimento de onda inicial da grade       | 1530 nm (195,94 THz)                        |
| Comprimento de onda final da grade         | 1562 nm (191,95 THz)                        |
| Largura de banda de referência             | 12,5 GHz                                    |
| Largura de banda de um slot                | 12,5 GHz                                    |
| Número de slots por enlace                 | 320   |
| Perda no elemento de comutação             | 5 dB  |
| Potência óptica de entrada                 | 0 dBm                                       |
| Relação sinal-ruído óptica de entrada      | 30 dB                                       |
| Taxas de transmissão de bit                | De 100 a 500 Gbps com distribuição uniforme |

como a figura de ruído dos amplificadores ópticos envolvidos ao longo da propagação do sinal óptico possuem valores fixos. *CS2* considerou o desempenho da rede frente a um cenário em que o coeficiente de atenuação da fibra óptica e/ou a figura de ruído dos amplificadores ópticos podiam ser variáveis com o comprimento de onda do sinal óptico propagante, considerando a transmissão em uma fibra óptica do tipo G652.A. *CS3* considerou os mesmos aspectos de *CS2*, no entanto, utilizou-se a fibra óptica do tipo G652.D. Para análise de desempenho, considerou-se a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga da rede e a distribuição dos tipos de formatos de modulação atribuídos às chamadas aceitas pela rede.

Para realização das simulações, foi utilizada uma plataforma computacional de código aberto disponível na literatura (SONDA [22], [23]). Para que uma dada chamada seja estabelecida, é preciso que exista uma rota entre os nós fonte e destino, recursos espectrais disponíveis e QoT do sinal óptico na recepção acima de um limiar pré-estabelecido ( $OSNR_{th}$ ). Caso algum desses três critérios não seja atendido, a chamada é bloqueada. O processo se repete até que o número de chamadas, ou a quantidade de bloqueios, fornecido pelo usuário seja atingido. A rota entre os nós fonte e destino é obtida por meio do algoritmo do caminho mais curto (*shortest path*). Para uma solicitação de chamada, os formatos de modulação são atribuídos a partir do mais eficiente, tentando-se o próximo mais eficiente até que a última tentativa seja realizada com o formato de modulação 4-QAM. Quanto à alocação de espectro, o algoritmo de primeiro encaixe (*first fit*) é utilizado.

Todas as simulações realizadas envolvem tráfego dinâmico. Foram considerados: (1)  $10^3$  bloqueios para análise da probabilidade de bloqueio de chamadas, (2)  $10^5$  chamadas solicitadas e (3) 600 Erlangs para análise da distribuição dos tipos de formatos de modulação atribuídos às chamadas aceitas

pela rede.

## V. RESULTADOS

Fig. 3 ilustra a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga da rede, considerando três cenários para o coeficiente de atenuação da fibra óptica ( $\alpha$ ) e a figura de ruído dos amplificadores ópticos ( $NF$ ): (1)  $\alpha$  e  $NF$  fixos (*CS1* em Fig. 3(a)), (2)  $\alpha$  fixo, ou variável, em combinação com  $NF$  fixa, ou variável, utilizando a fibra óptica G652.A (*CS2* em Fig. 3(b)) e (3)  $\alpha$  fixo, ou variável, em combinação com  $NF$  fixa, ou variável, utilizando a fibra óptica G652.D (*CS3* em Fig. 3(c)).

Em Fig. 3(a), percebe-se que, no cenário em que se considera apenas a diminuição de  $\alpha$ , é possível obter um desempenho da rede óptica em torno de 20,79 vezes melhor quando se compara o resultado, em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, para o valor de carga de 500 Erlangs, utilizando  $\alpha = 0,19$  dB/km ( $\alpha_{ref}$ ) com o geralmente utilizado em simulações para a banda C ( $\alpha = 0,22$  dB/km) [24]–[28]. Obtém-se ainda desempenhos de 9,73 vezes quando se considera  $\alpha = 0,21$  dB/km e 3,48 vezes para  $\alpha = 0,20$  dB/km, ambos resultados comparados com os obtidos para  $\alpha_{ref}$  no valor de carga de 500 Erlangs.

Em Fig. 3(b), percebe-se que a dependência dos parâmetros com o comprimento de onda influencia o desempenho da rede óptica elástica, de modo que, mantendo-se a referência para o melhor resultado obtido ( $\alpha(f)$  e  $NF(f)$ ), em termos de probabilidade de bloqueio de chamadas, os desempenhos foram os seguintes: 8,36 ( $\alpha(f)$  e  $NF(f)$  vs  $\alpha = CTE$  e  $NF = CTE$ ), 3,46 ( $\alpha(f)$  e  $NF(f)$  vs  $\alpha = CTE$  e  $NF(f)$ ) e 3,62 ( $\alpha(f)$  e  $NF(f)$  vs  $\alpha(f)$  e  $NF = CTE$ ), sendo que o primeiro desempenho (8,36) representa o cenário clássico nas simulações de EONs quando se considera apenas a banda C ( $\alpha = CTE$  e  $NF = CTE$ ) [24]–[28]. Em Fig. 3(c), percebe-se que os desempenhos obtidos foram os seguintes: 88,06 ( $\alpha(f)$  e  $NF(f)$  vs  $\alpha = CTE$  e  $NF = CTE$ ), 36,45 ( $\alpha(f)$  e  $NF(f)$  vs  $\alpha = CTE$  e  $NF(f)$ ) e 3,47 ( $\alpha(f)$  e  $NF(f)$  vs  $\alpha(f)$  e  $NF = CTE$ ). O melhor desempenho obtido (88,06) se deve ao comportamento do coeficiente de atenuação da fibra óptica G652.D variar em torno de 0,1906 dB/km, sendo inferior aos valores utilizados nas simulações de Fig. 3(a) e Fig. 3(b), ao longo do espectro considerado (Fig. 1). Além disso,  $NF$  oscila entre 4,1 e 4,4 dB para as considerações de dependência com o comprimento de onda. Isso resulta em menor ruído ao longo dos enlaces, visto que a potência de ruído depende diretamente tanto do fator de ruído quanto da perda na fibra óptica [18].

Fig. 4 ilustra a distribuição dos tipos de formatos de modulação atribuídos às chamadas aceitas pela rede, considerando diversos cenários para o coeficiente de atenuação da fibra óptica e a figura de ruído dos amplificadores ópticos: (a)  $\alpha = 0,22$  dB/km,  $NF = 5$  dB; (b)  $\alpha = 0,21$  dB/km,  $NF = 5$  dB; (c)  $\alpha = 0,20$  dB/km,  $NF = 5$  dB; (d)  $\alpha = 0,19$  dB/km,  $NF = 5$  dB; (e)  $\alpha = 0,22$  dB/km,  $NF = 5$  dB; (f)  $\alpha = 0,22$  dB/km,  $NF(f)$ ; (g)  $\alpha_{G652.A}(f)$ ,  $NF = 5$  dB; (h)  $\alpha_{G652.A}(f)$ ,  $NF(f)$ ; (i)  $\alpha = 0,22$  dB/km,  $NF = 5$  dB; (j)  $\alpha = 0,22$  dB/km,  $NF(f)$ ; (k)  $\alpha_{G652.D}(f)$ ,  $NF = 5$  dB; (l)  $\alpha_{G652.D}(f)$ ,  $NF(f)$ .

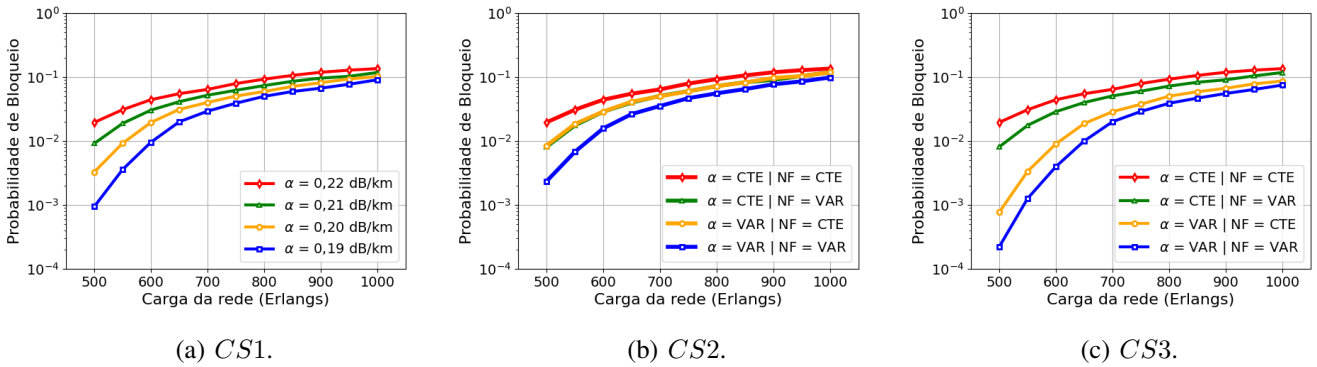


Fig. 3: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga da rede, considerando três cenários para o coeficiente de atenuação da fibra óptica ( $\alpha$ ) e a figura de ruído dos amplificadores ópticos ( $NF$ ): (1)  $\alpha$  e  $NF$  fixos (CS1), (b)  $\alpha$  fixo, ou variável, em combinação com  $NF$  fixa, ou variável, utilizando a fibra óptica G652.A (CS2) e (3)  $\alpha$  fixo, ou variável, em combinação com  $NF$  fixa, ou variável, utilizando a fibra óptica G652.D (CS3).

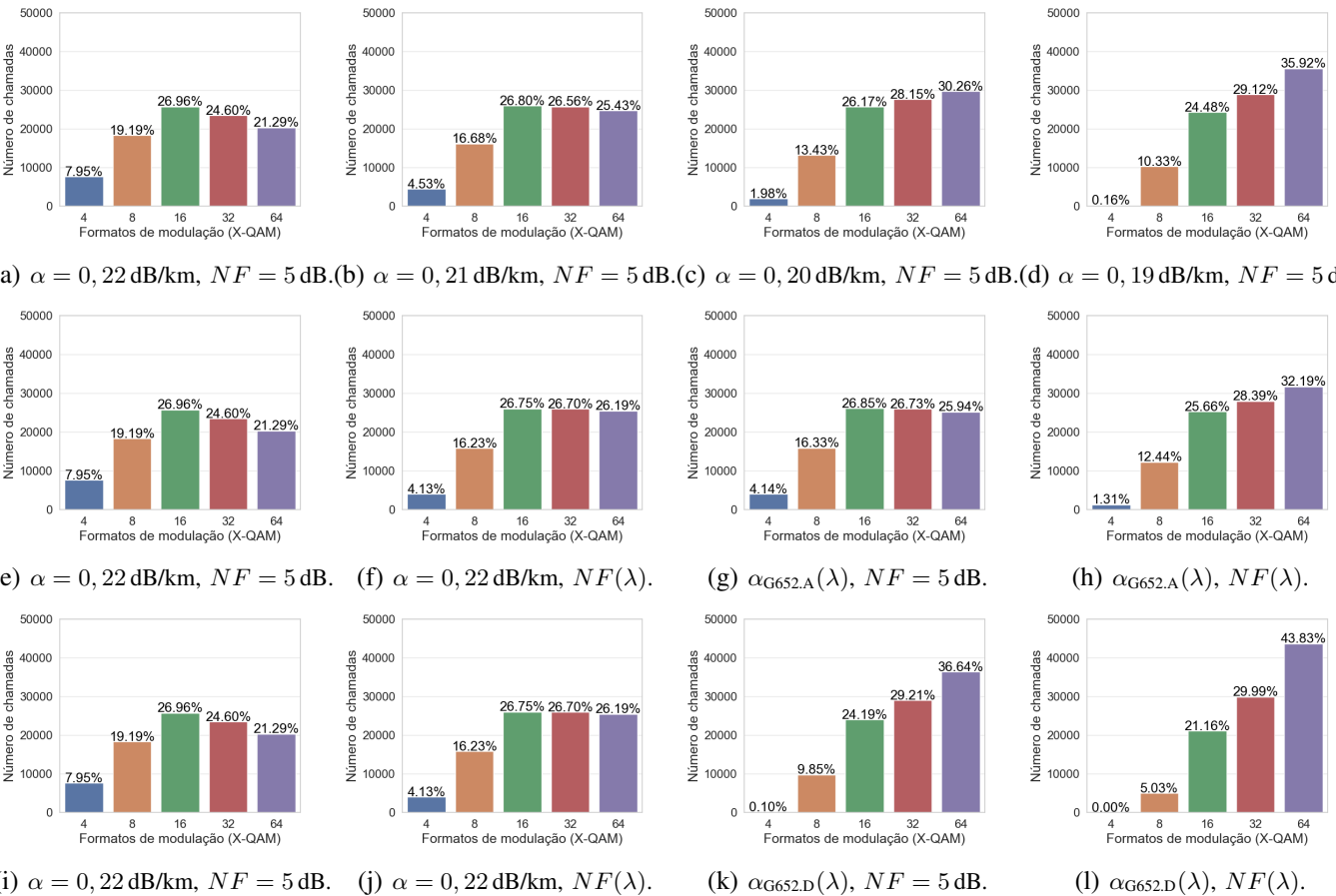


Fig. 4: Distribuição dos tipos de formatos de modulação atribuídos às chamadas aceitas pela rede, considerando diversos cenários para o coeficiente de atenuação da fibra óptica e a figura de ruído dos amplificadores ópticos: (a)  $\alpha = 0, 22 \text{ dB/km}, NF = 5 \text{ dB}$ ; (b)  $\alpha = 0, 21 \text{ dB/km}, NF = 5 \text{ dB}$ ; (c)  $\alpha = 0, 20 \text{ dB/km}, NF = 5 \text{ dB}$ ; (d)  $\alpha = 0, 19 \text{ dB/km}, NF = 5 \text{ dB}$ ; (e)  $\alpha = 0, 22 \text{ dB/km}, NF = 5 \text{ dB}$ ; (f)  $\alpha = 0, 22 \text{ dB/km}, NF(\lambda)$ ; (g)  $\alpha_{G652.A}(\lambda), NF = 5 \text{ dB}$ ; (h)  $\alpha_{G652.A}(\lambda), NF(\lambda)$ ; (i)  $\alpha = 0, 22 \text{ dB/km}, NF = 5 \text{ dB}$ ; (j)  $\alpha = 0, 22 \text{ dB/km}, NF(\lambda)$ ; (k)  $\alpha_{G652.D}(\lambda), NF = 5 \text{ dB}$ ; (l)  $\alpha_{G652.D}(\lambda), NF(\lambda)$ .

Percebe-se que, no cenário referente aos valores fixos de  $\alpha$  e de  $NF$  (Fig. 4(a) a Fig. 4(d)), quanto menor o valor de  $\alpha$ , menor o valor da potência de ruído ASE gerada na rede, o que melhora a  $OSNR_{out}$  e viabiliza a aceitação de

mais chamadas com formatos de modulação mais eficientes em termos espectrais. Desse modo, as chamadas aceitas pela rede passam a ser distribuídas de forma mais acentuada para os formatos de modulação mais eficientes ao longo da diminuição

do valor de  $\alpha$  utilizado nas simulações.

Quando se utiliza a fibra óptica G652.A, o valor de  $\alpha$  varia em torno de 0,2074 dB/km e o de  $NF$  em torno de 4,23 dB. Como a potência de ruído ASE depende diretamente da perda na fibra óptica e do fator de ruído [18], quanto menor a contribuição desses dois parâmetros, mais chamadas podem ser aceitas com formatos de modulação mais eficientes. Esse comportamento se observa quando se compara a distribuição dos tipos de formatos de modulação entre Fig. 4(e) e Fig. 4(f) e entre Fig. 4(e) e Fig. 4(g). A distribuição mais exitosa, em termos de utilização dos formatos de modulação mais eficientes, é obtida quando os dois parâmetros são dependentes do comprimento de onda, conforme observado em Fig. 4(h).

Quando se utiliza a fibra óptica G652.D, o valor de  $\alpha$  varia em torno de 0,1906 dB/km. Dessa forma, os resultados obtidos (Fig. 4(k) e Fig. 4(l)) apresentam melhor usabilidade dos formatos de modulação mais eficientes, culminando nos melhores valores de utilização de todos os cenários avaliados neste artigo (0,00% para 4-QAM, 5,03% para 8-QAM, 21,16% para 16-QAM, 29,99% para 32-QAM e 43,83% para 64-QAM), conforme ilustrado em Fig. 4(l).

## VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, analisou-se o impacto da dependência com o comprimento de onda da atenuação da fibra óptica e da figura de ruído dos amplificadores ópticos em uma rede óptica elástica. Para isso, foram considerados três cenários de simulação, em que  $\alpha$  poderia ser fixo, ou variável, assim como  $NF$ . Esses valores fixos foram considerados conforme utilizados na literatura [24]–[28] e a variação com o comprimento de onda foi a partir de tipos diferentes de fibras ópticas (G652.A e G652.D) e resultados experimentais obtidos na banda C para amplificadores ópticos do tipo EDFA [20], [21].

Os resultados obtidos indicaram que considerar a dependência com o comprimento de onda, cenário mais realístico, resultou em um desempenho, em termos da probabilidade de bloqueio de chamadas, de até 88 vezes melhor quando comparado com a utilização de ambos os valores dos parâmetros fixos e independentes do comprimento de onda, utilizando algoritmos clássicos de roteamento, atribuição de formato de modulação e espectro (SP e FF, por exemplo). Além disso, verificou-se uma melhor utilização dos formatos de modulação mais eficientes, em termos espectrais, entre as chamadas aceitas pela rede para o cenário  $CS3$ .

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- [1] R. Ramaswami, K. Sivarajan, and G. Sasaki, *Optical networks: a practical perspective*. Morgan Kaufmann, 2009.
- [2] 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.
- [3] M. Klinkowski *et al.*, “Survey of resource allocation schemes and algorithms in spectrally-spatially flexible optical networking,” *Optical Switching and Networking*, vol. 27, pp. 58–78, 2018.
- [4] B. Shariati, J. M. Rivas-Moscoso, D. Klonidis, I. Tomkos, S. Ben-Ezra, F. Jiménez, D. M. Marom, P. S. Khodashenas, J. Comellas, and L. Velasco, “Options for cost-effective capacity upgrades in backbone optical networks,” in *European Conference on Networks and Optical Communications (NOC)*. IEEE, 2016, pp. 35–40.
- [5] A. Ferrari *et al.*, “Assessment on the achievable throughput of multi-band it-t g. 652. d fiber transmission systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 16, pp. 4279–4291, 2020.
- [6] N. Sambo *et al.*, “Provisioning in multi-band optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 9, pp. 2598–2605, 2020.
- [7] —, “Provisioning in multi-band optical networks: A c+l+s-band use case,” in *International Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2019, pp. 1–4.
- [8] —, “Provisioning in multi-band optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 9, pp. 2598–2605, 2020.
- [9] —, “Beyond c-band in optical networks,” in *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2020, pp. 1–4.
- [10] M. Nakagawa, H. Kawahara, T. Seki, and T. Miyamura, “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.
- [11] D. Uzunidis *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.
- [12] R. Sadeghi, B. Correia, A. Souza, N. M. S. da Costa, J. Pedro, A. Napoli, and V. Curri, “Transparent vs translucent multi-band optical networking: Capacity and energy analyses,” *Journal of Lightwave Technology*, 2022.
- [13] 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.
- [14] F. Calderón *et al.*, “Heuristic approaches for dynamic provisioning in multi-band elastic optical networks,” *IEEE Communications Letters*, 2021.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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, 2012, pp. Tu–3.
- [18] M. A. Cavalcante *et al.*, “Análise do impacto do ruído ase em redes ópticas elásticas transparentes usando múltiplos formatos de modulação,” in *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, vol. 1, 2015, pp. 1–5.
- [19] R.-J. Essiambre *et al.*, “Capacity limits of optical fiber networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 662–701, 2010.
- [20] “Optical fiber attenuation,” Disponível em: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052294-optical-fiber-attenuation>. Acesso em: 07 de fevereiro 2022, 2009.
- [21] A. D’Amico *et al.*, “Scalable and disaggregated ggn approximation applied to a c+ l+ s optical network,” *Journal of Lightwave Technology*, 2022.
- [22] 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.
- [23] G. B. Guerra Jr *et al.*, “Simulador de código livre aplicado em redes Óticas com multiplexação por divisão espacial,” in *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, 2021, pp. 1–5.
- [24] M. A. Cavalcante *et al.*, “Evolutionary multiobjective strategy for regenerator placement in elastic optical networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 8, pp. 3583–3596, 2018.
- [25] —, “Optimizing the cost function of power series routing algorithm for transparent elastic optical networks,” *Optical Switching and Networking*, vol. 29, pp. 57–64, 2018.
- [26] —, “An auxiliary-graph-based methodology for regenerator assignment problem optimization in translucent elastic optical networks,” *Optical Fiber Technology*, vol. 53, p. 102008, 2019.
- [27] E. F. Silva *et al.*, “Assessment of novel regenerator assignment strategies in dynamic translucent elastic optical networks,” *Photonic Network Communications*, vol. 39, no. 1, pp. 54–69, 2020.
- [28] M. M. Alves *et al.*, “Impairment-aware fixed-alternate bsr routing heuristics applied to elastic optical networks,” *The Journal of Supercomputing*, vol. 77, no. 2, pp. 1475–1501, 2021.