

# Estratégias de Qualidade de Transmissão Sob Ocupação Máxima em Redes Ópticas Elásticas

Matheus L. Santos, André V. S. Xavier e Raul C. Almeida Jr

**Resumo**— Este trabalho investiga configurações *Fully-Loaded* em Redes Ópticas Elásticas Multibanda (EONs), considerando os impactos da amplificação em cascata com múltiplos spans. São analisadas três estratégias de amplificação (ideal, média e de pior canal) aplicadas a cenários de obtenção de pior caso para redes ópticas elásticas. A razão sinal-ruído generalizada (GSNR) é avaliada utilizando simulações com a biblioteca GNPY. Os resultados demonstram que abordagens mantêm margens de qualidade próximas às obtidas por alocação incremental realista, mesmo em cenários com maior complexidade física. Conclui-se que a modelagem proposta é robusta e aplicável ao planejamento conservador de EONs.

**Palavras-Chave**— *Fully-Loaded*, redes ópticas elásticas, ocupação máxima.

**Abstract**— This study investigates *Fully-Loaded* configurations in Multiband Elastic Optical Networks (EONs), taking into account the impacts of cascaded amplification across multiple spans. Three amplification strategies—ideal, average, and worst-channel based—are evaluated in scenarios aimed at identifying worst-case conditions for elastic optical networks. The Generalized Signal-to-Noise Ratio (GSNR) is assessed through simulations using the GNPY library. The results show that these approaches maintain quality margins comparable to those obtained through realistic incremental allocations, even under scenarios with increased physical complexity. It is concluded that the proposed modeling is robust and suitable for conservative EON planning.

**Keywords**— *Fully-Loaded*, elastic optical networks, maximum occupancy.

## I. INTRODUÇÃO

Diversos estudos têm sido conduzidos com o objetivo de aprimorar a eficiência das redes ópticas, buscando reduzir o consumo energético e melhorar o aproveitamento dos recursos disponíveis. Uma das formas de avaliar a eficiência dessas redes consiste em compará-las com a condição de pior caso, na qual a rede opera sob a condição mais severa de degradação física, decorrente da ocupação máxima do espectro [1], [2]. Essa condição recebe o nome de *Fully-Loaded* na literatura e no decorrer deste trabalho. As empresas provedoras de internet utilizam dessa condição como referência operacional, garantindo que, após o estabelecimento das conexões, seja possível atender às demandas de tráfego sob qualquer carga ou esquema de alocação, o que facilita o gerenciamento dos recursos [2]. Algumas redes também operam com canais fictícios no espectro disponível, mantendo constantemente uma configuração *Fully-Loaded* durante sua operação.

Matheus Lôbo dos Santos, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, e-mail: matheus.lobo@ufpe.br; André Victor Silva Xavier, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE; Raul Camelo de Andrade Almeida Júnior, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. Este trabalho foi parcialmente financiado por CNPq, FACEPE e UFPE.

A premissa central da abordagem *Fully-Loaded* em redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é que, uma vez que a relação GSNR (*Generalized Signal-to-Noise Ratio*) de um canal é determinada sob essa configuração, a qualidade de transmissão (QoT, *Quality of Transmission*) desse canal estará garantida, considerando as interações espectrais específicas daquela posição no espectro. Alcançar a condição *Fully-Loaded* em redes WDM é relativamente simples, visto que cada canal possui um comprimento de onda fixo, o que permite uma segmentação clara e previsível dos recursos espectrais disponíveis. Além disso, um cálculo único de GSNR para cada canal bem definido é suficiente para inferir a situação de pior caso em redes WDM [1].

Nas redes ópticas elásticas (EONs, *Elastic Optical Networks*), por sua vez, essa tarefa torna-se consideravelmente mais complexa, devido à alocação espectral flexível. Nessas redes, os canais apresentam larguras espectrais variáveis e bandas de guarda são atribuídas dinamicamente entre eles. Essa flexibilidade resulta em níveis de degradação física que dependem do arranjo espectral dos canais ativos e das demandas de conexões presentes sob a representação espectral [3]. Modelos de propagação em EONs devem fornecer estimativas conservadoras de QoT, de forma a assegurar a viabilidade dos caminhos ópticos. Em redes operacionais, é comum realizar tais estimativas sob a situação de pior caso, uma vez que o conhecimento preciso sobre os canais em co-propagação pode não estar disponível em tempo de operação [4].

A GSNR é um parâmetro crucial para determinar a qualidade do sinal na rede. Ela considera a razão entre a potência do sinal e o ruído total, sendo afetado por interferências não lineares (NLI, *Nonlinear Interference*) na fibra óptica e o ruído de emissão espontânea amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) nos amplificadores. Além disso, em sistemas multibanda, torna-se imprescindível a consideração do espalhamento Raman estimulado (SRS, *Stimulated Raman Scattering*), o qual promove a transferência de potência dos canais de maior frequência (menor comprimento de onda) para canais de menor frequência, o que impacta significativamente a distribuição de potência do sinal propagado [1], [5].

A interferência não linear refere-se às distorções decorrentes das interações não lineares no meio óptico, intensificada em sistemas com alta densidade de canais. A NLI é composta principalmente por dois componentes: a interferência intra-canal (SCI, *Self-Channel Interference*), relacionada à interferência não linear gerada no próprio canal óptico, e a interferência entre canais (XCI, *Cross-Channel Interference*), que envolve a interação não linear entre canais ópticos distintos, destacadamente os adjacentes [6]. O ruído ASE é gerado pelos amplificadores ópticos ao longo do trajeto de transmissão e

depende do ganho de potência provido pelo amplificador e da sua figura de ruído (*noise figure*), ou seja, de aspectos de projeto da rede e a sua característica de construção [7].

O cálculo da GSNR dos canais ativos é realizado por meio da biblioteca de código aberto GNPY [8], uma ferramenta amplamente testada e reconhecida na comunidade científica. Essa biblioteca proporciona uma implementação precisa dos modelos de ruído, possibilitando simulações detalhadas do desempenho de redes ópticas. Fatores como dispersão, não linearidades, amplificação e efeitos de espalhamento Raman são incluídos na ferramenta [9]. Embora alguns estudos [10], [11] adotem a hipótese simplificadora de operação *Fully-Loaded*, assumindo um valor uniforme de GSNR independente da posição espectral ou da demanda de largura de banda, é amplamente estabelecido na literatura que a GSNR apresenta variação significativa em função da posição espectral, especialmente sob a influência dos efeitos não lineares de XCI e espalhamento Raman em sistemas multibanda. Em EON, essa variabilidade torna-se ainda mais pronunciada devido à diversidade de larguras de banda e à forma como os canais são alocados ao longo do espectro [12].

Neste contexto, este trabalho propõe uma abordagem mais realista e abrangente para análise da GSNR em EONs, inspirada na metodologia aplicada por [2] em sistemas WDM. Considerando a crescente complexidade dessas redes e os desafios associados à hipótese de operação *Fully-Loaded*, o presente estudo amplia as discussões iniciadas em [13], propondo uma reavaliação crítica de diferentes configurações de preenchimento espectral. A GSNR dos canais de interesse, denominados *Channel Under Test* (CUT), distribuídos ao longo das bandas C, L e S, é estimada a partir das simulações realizadas com a GNPY, sendo considerada como métrica central de desempenho. As configurações espectrais propostas originalmente em [13], detalhadas na Seção II, são aqui submetidas a simulações mais complexas, envolvendo transmissões em cascata com múltiplos *spans*. Para isso, diferentes perfis de ganho dos amplificadores ópticos foram analisados, conforme descrito na Seção III. Espera-se que os resultados obtidos contribuam para o aprofundamento da compreensão sobre os cenários críticos de degradação física em EONs, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento robusto de redes ópticas em regimes de *Fully-Loaded*.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em princípio, para determinar uma configuração de operação segura em EON, é preciso empregar o limiar mínimo de GSNR de um canal sob qualquer condição de carga máxima. Essa avaliação deve ser realizada para toda combinação de demandas de tráfego e suas alocações espectrais. Contudo, a elevada complexidade combinatória torna essa tarefa impraticável em EONs reais, devido ao tempo necessário para avaliar todas as combinações possíveis. Assim, é imprescindível desenvolver uma abordagem genérica e eficiente que, por meio de um número limitado de cenários *Fully-Loaded* simulados, permita estabelecer um valor robusto de GSNR para as diferentes posições espectrais e classes de tráfego.

Em EON as requisições que chegam a rede podem assumir diferentes tipos de demandas, ocupando quantidades variadas

de unidades de *slots* de frequência (FSUs, *Frequency Slots Unity*) a depender da configuração adotada. Essas demandas são categorizadas por uma taxa de transmissão solicitada e o formato de modulação, os quais determinam a ocupação espectral para o canal. Em [13], os autores colocaram luz sobre a dificuldade da obtenção do pior caso para EON e propuseram duas abordagens suficientemente robusta para sua obtenção.

- **Homogêneo Total:** todos os canais, exceto o CUT, são atribuídos a uma única classe em todas as bandas. Dado  $n$  classes distintas, identificar o cenário de pior caso requer  $n$  simulações, sendo o pior caso aquele que apresenta o menor valor de GSNR. Contudo, essa estratégia não considera os diferentes impactos causados pelas distintas classes de canais em um ambiente multibanda;
- **Homogêneo Por Banda:** mantém-se o mesmo tipo de canal dentro de cada banda, mas permite-se que ele difira entre as bandas L, C e S. Sejam  $B$  o número de bandas e  $n$  o número de classes, essa configuração resulta em  $n^B$  combinações possíveis, o que pode ser significativamente maior que no caso Homogêneo Total. Caso  $n^B$  torne-se impraticável, pode-se recorrer a meta-heurísticas para aproximar-se da solução de menor GSNR.

Para investigar se algum dos cenários analisados pode representar uma suposição *Fully-Loaded* em operações práticas – nas quais conexões chegam sequencial até formar a condição *Fully-Loaded* –, desenvolve-se um simulador de alocação espectral para EONs em configuração multibanda. O objetivo é gerar uma variedade de cenários *Fully-Loaded* incrementais, baseados em tráfego com taxas de transmissão e formatos de modulação pré-definidos. Como o estudo considera apenas um único *span* óptico, o roteamento torna-se desnecessário; entretanto, a alocação espectral segue o algoritmo SAR [14], isto é, para cada nova requisição seleciona-se a banda com o menor índice de FSU capaz de acomodar a demanda. Esse processo repete-se até a ocupação completa do espectro, garantindo assim a condição de carga completa. Ao coletar esses cenários incrementais heterogêneos, é possível estimar o menor GSNR alcançável para o CUT quando a rede opera em condição *Fully-Loaded* natural. Assim, os dois modelos propostos podem ser comparados ao cenário incremental de pior caso, a fim de inferir se oferecem margem de GSNR suficiente para adoção em uma configuração em EON.

## III. METODOLOGIA

Em [13], a análise foi conduzida considerando um único *span* óptico, composto por uma fibra e um amplificador idealizado, cuja função era restaurar integralmente a potência dos canais ópticos ao nível original de entrada, independentemente das perdas acumuladas. Embora tal abordagem tenha permitido uma avaliação inicial do impacto da propagação em um cenário controlado, ela desconsidera efeitos acumulativos e variações entre canais ao longo de uma rede em cascata. No presente trabalho, propõe-se uma extensão desse modelo para um ambiente de múltiplos *spans*, incorporando três estratégias distintas de amplificação. A primeira estratégia corresponde ao modelo ideal ( $AMP_{ideal}$ ) utilizado em [13]. A segunda estratégia aplica um ganho uniforme a todos os

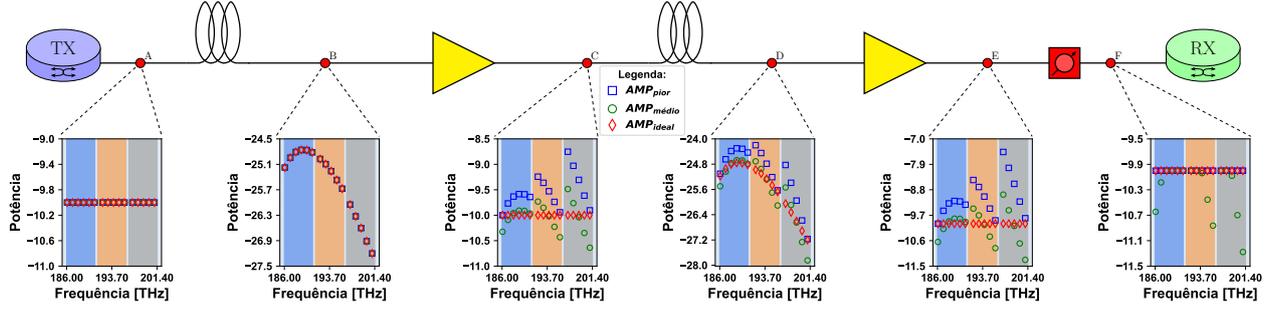


Fig. 1: Representação das potências dos canais ao longo do enlace ao considerar os tipos de amplificadores.

canais, baseado no ganho médio necessário para compensar as perdas do *span* ( $AMP_{\text{médio}}$ ), enquanto a terceira estratégia replica o ganho necessário do canal com pior desempenho para todos os demais ( $AMP_{\text{pior}}$ ). Essa abordagem visa capturar de forma mais precisa os impactos da amplificação heterogênea na qualidade do sinal ao longo da rede óptica, considerando variações espectrais e efeitos acumulativos entre os *spans*.

O espectro de cada banda é representado por um vetor  $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^k$ , com  $k$  posições correspondentes às potências em Watts dos canais. O ganho aplicado é descrito por um vetor  $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^k$ , calculado de acordo com a estratégia do amplificador. As modelagens matemáticas dos três tipos de amplificadores são descritas a seguir:

**Amplificador ideal:**

$$G_i = P_{\text{in},i}/P_{\text{out},i}, \quad \mathbf{G} = [G_1, G_2, \dots, G_k] \quad (1)$$

em que cada componente  $G_i$  compensa exatamente a perda do respectivo canal  $i$ ;

**Amplificador de ganho médio:**

$$G_{\text{médio}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (P_{\text{in},i}/P_{\text{out},i}), \quad \mathbf{G} = [G_{\text{médio}}, \dots, G_{\text{médio}}] \quad (2)$$

ou seja, aplica-se o mesmo ganho médio a todos os canais.

**Amplificador de pior canal:**

$$G_{\text{pior}} = \max_i (P_{\text{in},i}/P_{\text{out},i}), \quad \mathbf{G} = [G_{\text{pior}}, \dots, G_{\text{pior}}] \quad (3)$$

compensando todos os canais com base no canal de maior perda.

A Figura 1 ilustra as potências de canais ao longo de 2 spans. Cada gráfico apresenta os valores de potência após cada um dos dispositivos indicados. É possível observar que todas as potências de lançamentos foram definidas iguais para os três cenários, as penalidade das fibras são iguais e consideram a transferência de potência das frequências mais altas para mais baixas devido ao efeito Raman. Após o primeiro amplificador há uma alteração da potência conforme o perfil de amplificação adotado. No final da transmissão, o sinal é atenuado por um VOA (*Variable Optical Attenuator*), que retomam todos os sinais aos seus respectivos valores de origem.

#### IV. CONFIGURAÇÕES DA SIMULAÇÃO

As simulações relacionadas à operação em sistemas multibanda foram realizadas por meio da biblioteca GNPY. O modelo de camada física adotado é o *ISRS GN Model Analytic*,

apresentado em [6]. Nele, os autores derivaram uma expressão analítica em forma fechada para a estimativa da potência de NLI, incorporando explicitamente os efeitos do SRS. Esse modelo permite uma avaliação rápida da GSNR sem a necessidade de simulações computacionalmente intensivas, como integrais duplas ou métodos *split-step*. O modelo foi validado experimentalmente por meio de comparações numéricas, bem como simulações *split-step* [15], [16].

Cada uma das três bandas, C+L+S, dispõem de 4,8 THz de espectro útil, dividido em 384 unidades de alocação espectral (FSUs - *Frequency Slot Unit*) com 34 FSUs entre as bandas. A definição da potência de lançamento ( $P_{\text{in}}$ ) leva em consideração a largura de banda do canal, representada pela densidade espectral de potência (PSD - *Power Spectral Density*). A PSD expressa a potência por unidade de frequência, usualmente em Watts por Hertz (W/Hz), sendo um parâmetro essencial para a análise da eficiência espectral e dos efeitos físicos que impactam a propagação do sinal óptico na fibra em EON [17]. Devido sua importância, os valores de PSD foram obtidos por um algoritmo genético, conforme [2]. Ele é responsável por obter a PSD de cada banda, bem como sua inclinação ao longo do espectro. A Figura 2 mostra os valores utilizado nesse trabalho. Os demais parâmetros são apresentados na Tabela I.

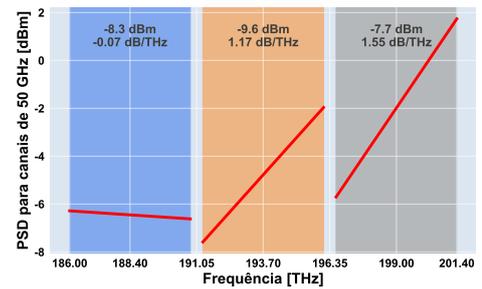


Fig. 2: PSD de lançamento para canais de 50 GHz. Com  $-8.28$ ,  $-9.58$  e  $-7.70$  dBm e  $-0.07$ ,  $1.17$  e  $1.55$  dB/THz para as bandas L, C e S, respectivamente.

Nesse trabalho, os resultados foram simulados para um cenário em cascata com 4 *spans*. A Figura 3 ilustra a disposição dos componentes ao longo do enlace óptico. Os amplificadores das bandas C e L, seguem a tecnologia de fibra dopada com érbio (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifier*) [18], já na banda S, são os amplificadores dopados com túlio (T DFA, - *Thulium-Doped Fiber Amplifier*) [19]. Nesse contexto, além

TABELA I: Parâmetros do simulador.

Parâmetros Gerais		
Descrição	Símbolo	Valor [Unidade]
Largura do FSU	$B_{ref}$	12,5 [GHz]
n° de Polarização	$P$	1
Formatos de Modulação	$m$	BPSK, {4,8,16,32,64}-QAM
Tipos de taxa de bits	$T_x$	{50, 100, 200, 400}[Gbps]
Parâmetros do cenário multibanda		
Nome	Frequência Inicial	Figura de Ruído
L	186.050 [THz]	5.5 [dB]
C	191.275 [THz]	5.0 [dB]
S	196.500 [THz]	6.5 [dB]

do ruído ASE adicionado pelo processo de amplificação, a fibra óptica adiciona os efeitos não-lineares que consideram o efeito de espalhamento Raman. Esse efeito será de suma importante na etapa de entendimento dos resultados.

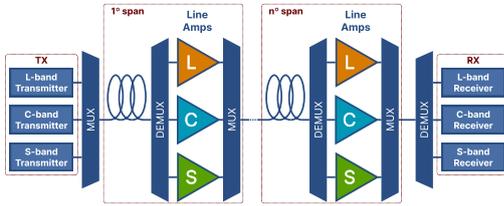


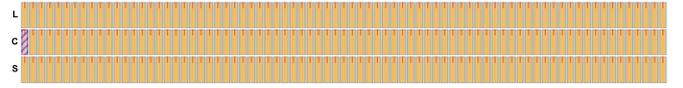
Fig. 3: Dispositivos ao longo do enlace óptico.

Dentro dos cenários considerados nesse estudo, combinando os formatos de modulação com as taxas de bits transmitidas, formam-se 24 classes de largura de banda, das quais somente 15 são distintas quanto à largura efetiva – parâmetro que as diferencia no cálculo do GSNR pelo GNP<sub>y</sub>. Para evitar redundâncias de análises, apenas essas 15 classes foram consideradas para os possíveis canais existentes. Nas simulações deste artigo, a configuração do CUT foi fixada em 32-QAM e 200 Gbps, ocupando 40 GHz distribuídos em 4 FSUs.

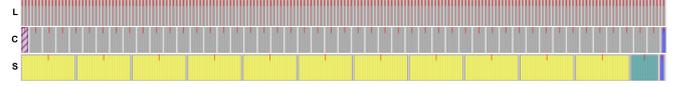
A Figura 4a apresenta uma ilustração da representação do espectro para a heurística de Homogêneo Total. Nela somente canais de 50 Gbps são dispostos em todas as bandas, separados por uma banda de guarda de 12,5 GHz. O CUT está marcado por linhas diagonais, sendo somente seus valores de GSNR considerado para o cálculo de análise do cenário. A Figura 4b apresenta um exemplo, dos 3375 possíveis para o Homogêneo por banda. Nessa configuração, a banda L é preenchida com canais criados pela combinação da modulação 16-QAM com a taxa de 50 GHz. A banda C formada por 32-QAM e 400 GHz e a banda S por BPSK e 400 GHz. É importante observar que cada banda está sendo representada na ordem de frequência, com canais mais a direita contendo as maiores frequências. Nas maiores frequências de cada banda, contém alguns canais diferentes dos mencionados, isso ocorre pois é necessário preencher o espectro com canais menores de forma a garantir a condição de *Fully-Loaded*.

## V. RESULTADOS

Na literatura especializada, é comum a adoção de um modelo idealizado de amplificador óptico, aqui denotado por  $AMP_{ideal}$ , cuja principal característica reside na capacidade



(a) Representação espectral de um cenário Homogêneo Total.



(b) Representação espectral de um cenário Homogêneo por Banda.



(c) Legenda para as 15 configurações de canais disponíveis.

Fig. 4: Exemplo de representações das heurísticas propostas.

de restaurar, na saída, a potência do sinal ao mesmo nível existente antes das penalidades introduzidas pela propagação no meio físico. Embora amplamente empregado em análises preliminares devido à sua simplicidade, esse modelo apresenta limitações importantes quando considerado em topologias compostas por múltiplos *spans*, dada a previsibilidade do comportamento acumulado do ruído. A relação GSNR ao longo de uma cascata de  $n$  *spans* pode ser estimada a partir da Equação 4.

$$GSNR_{nspan} = GSNR_1 - 10 \log_{10}(nspan), \quad (4)$$

em que  $GSNR_1$  representa o valor obtido para um único *span*.

A estratégia de amplificação por ganho médio apresenta desempenho satisfatório em termos de compensação global das perdas, no entanto, conforme ilustrado na Figura 1, não é capaz de restaurar individualmente a potência de cada canal aos seus respectivos níveis originais. Essa limitação compromete sua aplicabilidade em cenários de redes com topologia em malha, nos quais a estimativa da GSNR total de um caminho óptico baseia-se no somatório dos inversos das GSNRs parciais. Nessas situações, a ausência de uma correspondência precisa entre os níveis de entrada e saída dos canais inviabiliza o uso direto dessa modelagem de amplificador.

Neste trabalho, contudo, optou-se por uma modelagem mais realista, adotando-se o modelo de amplificação  $AMP_{pior}$ , conforme descrito na Seção III, a fim de incorporar os efeitos acumulativos de degradação física típicos de sistemas operacionais. Os experimentos computacionais foram conduzidos a partir da configuração do CUT com base em um cenário *Fully-Loaded*. Para isso, selecionaram-se nove posições espectrais para o CUT — três por banda (L, C e S) — uniformemente distribuídas ao longo do espectro.

O número total de simulações foi de 3375 para a estratégia Homogêneo por Banda (Hom. Band) e de 15 para a estratégia Homogênea Total (Hom. Total), por frequência simulada. Os resultados obtidos pelas estratégias Heterogêneo Incremental (Het. Incr.), Homogêneo por Banda e Homogênea Total são apresentados na Figura 5, que ilustra as margens observadas entre o melhor e o pior caso de GSNR para cada configuração avaliada. Na banda L, observou-se que o intervalo entre o menor e o maior valor de GSNR, para a estratégia Hom. Band, foi em média de  $0,64 \pm 0,12$  dB. A estratégia Het. Incr.

apresentou, em média, margens correspondentes a 44,64% desse intervalo. Para as bandas C e S, as margens relativas da estratégia Het. Incr. em relação ao intervalo da Hom. Band foram de 47,06% e 22,95%, respectivamente.

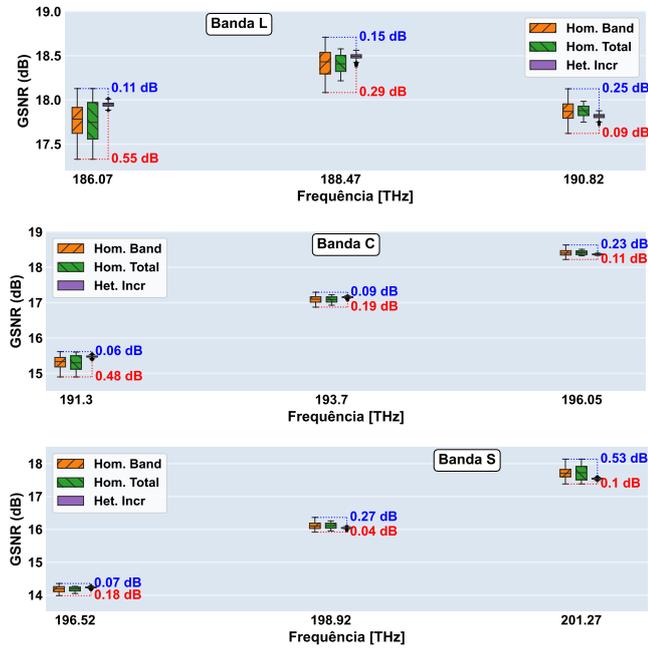


Fig. 5: Comparação entre as bandas L+C+S e suas posições com respectivas margens de pior caso.

Esses resultados evidenciam a robustez da abordagem proposta por [13] quando aplicada a cenários mais exigentes, com múltiplos *spans* e modelos de amplificação menos idealizados. A preservação das margens de qualidade em configurações com maior complexidade física respalda a aplicabilidade da metodologia em redes ópticas elásticas reais, consolidando sua validade como estimador conservador da QoT.

## VI. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma extensão da análise de condições *Fully-Loaded* para Redes Ópticas Elásticas (EONs), incorporando a avaliação de múltiplos *spans* com diferentes perfis de amplificação. Ao utilizar novas estratégias de amplificação foi possível caracterizar o impacto cumulativo da degradação física na relação GSNR. Os resultados obtidos demonstraram que a estratégia Homogênea por Banda apresenta desempenho seguro para estimar uma margem operacional entre os cenários Heterogêneo Incremental, mesmo sob a complexidade de configurações multibanda e efeitos acumulativos de ruído. A menor margem percentual de GSNR observada na banda S está diretamente associada à inclinação negativa da PSD adotada e aos efeitos do espalhamento Raman, o que evidencia a necessidade de um ajuste mais refinado desse parâmetro, a ser explorado em trabalhos futuros.

Conclui-se que a metodologia proposta é adequada para o planejamento conservador de EONs, oferecendo uma base sólida para estimativas realistas de QoT sob cenários operacionais. Essa abordagem contribui para o aprimoramento do

projeto de redes em EONs, especialmente em redes multi-banda que exigem garantias de desempenho mesmo sob carga máxima.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq, FACEPE e UFPE pelo apoio à publicação.

## REFERÊNCIAS

- [1] Z. Huang, L. Dou, J. Cheng, C. Xie, C. Lu, and A. P. T. Lau, "Performance improvements by dynamic amplifier reconfigurations for c+l-band optical networks in the presence of stimulated raman scattering," *Journal of Optical Communications and Networking*, 2023.
- [2] B. Correia, *Optimization of Launch Power in Optical Line Systems and Design of Optical Networks for Multi-band Transmission*. PhD thesis, School of Politecnico di Torino (ScuDo), 2023.
- [3] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. J. Yoo, "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?," *IEEE Com. Magazine*, 2012.
- [4] A. Mahajan, K. Christodouloupolous, R. Martínez, S. Spadaro, and R. Muñoz, "Modeling edfa gain ripple and filter penalties with machine learning for accurate qot estimation," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 9, pp. 2616–2629, 2020.
- [5] A. Ferrari, M. Filer, K. Balasubramanian, Y. Yin, E. L. Rouzic, J. Kundrat, G. Grammel, G. Galimberti, and V. Curri, "Gnpy: An open source application for physical layer aware open optical networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020.
- [6] D. Semrau, R. I. Killely, and P. Bayvel, "A closed-form approximation of the gaussian noise model in the presence of inter-channel stimulated raman scattering," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, 5 2019.
- [7] I. Roberts, J. M. Kahn, J. Harley, and D. W. Boertjes, "Channel power optimization of wdm systems following gaussian noise nonlinearity model in presence of stimulated raman scattering," *Journal of Lightwave Technology*, 2017.
- [8] "Github repository of gnpy." <https://github.com/Telecominfraproject/oopt-gnpy>, 2024. Accessed: 2024-08-20.
- [9] V. Curri, "Gnpy model of the physical layer for open and disaggregated optical networking," *Journal of optical communications and networking*, vol. 14, no. 6, pp. C92–C104, 2022.
- [10] F. Calderón, A. Lozada, P. Morales, D. Bórquez-Paredes, N. Jara, R. Olivares, G. Saavedra, A. Beghelli, and A. Leiva, "Heuristic approaches for dynamic provisioning in multi-band elastic optical networks," *IEEE Communications Letters*, 2022.
- [11] 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.
- [12] J. Muller, S. K. Patri, T. Fehenberger, H. Griesser, J. P. Elbers, and C. Mas-Machuca, "Qot estimation using egn-assisted machine learning for multi-period network planning," *Journal of Optical Communications and Networking*, 2022.
- [13] M. L. dos Santos, R. C. Almeida, K. D. Assis, and R. Boutaba, "Analysis of fully-loaded conditions in multiband elastic optical networks using gsnr," in *2024 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*, pp. 1–3, IEEE, 2024.
- [14] H. A. Dinarte, G. Teixeira, R. C. Almeida Jr., K. D. R. Assis, H. Waldman, and D. A. Chaves, "Multipath provisioning for survivable elastic optical networks with optimized rsa ordering selection," in *Int. Conf. Transparent Opt. Netw. (ICTON)*, 2023.
- [15] H. Buglia, M. Jarmolovičius, L. Galdino, R. I. Killely, and P. Bayvel, "A closed-form expression for the gaussian noise model in the presence of raman amplification," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 42, no. 2, pp. 636–648, 2023.
- [16] 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.
- [17] D. D. Sundararajan, *Digital Signal Processing: An Introduction*. Cham: Springer International Publishing, 2024.
- [18] X. Liu, "Enabling optical network technologies for 5g and beyond," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 358–367, 2022.
- [19] Z. Li, A. M. Heidt, J. M. Daniel, Y. Jung, S.-U. Alam, and D. J. Richardson, "Thulium-doped fiber amplifier for optical communications at 2  $\mu\text{m}$ ," *Optics Express*, vol. 21, no. 8, pp. 9289–9297, 2013.