

# Análise Sistêmica do Impacto de Limitações do Modulador em Transmissões Ópticas a 1 Tb/s

Carine Mineto, Tiago Sutili, Lucas Silva Schanner e Helder Alves Pereira

**Resumo**—O impacto de efeitos deletérios decorrentes da inserção de ruído óptico e de limitações do modulador eletro-óptico em canais com taxas de transmissão de 1 Tb/s são estudados com base em simulações numéricas, considerando a transmissão sistêmica de tais sinais. Os resultados indicam que os canais são altamente impactados por limitações na banda eletro-óptica dos moduladores empregados em sua geração, mas ainda é possível alcançar distâncias superiores a 750 km.

**Palavras-Chave**—Sistemas Ópticos de Transmissão Ponto-a-Ponto, Amplificação Óptica, Modulador Eletro-Óptico.

**Abstract**—The impact of deleterious effects resulting from the insertion of optical noise and limitations of the electro-optical modulator in channels with transmission rates of 1 Tb/s are studied based on numerical simulations, considering the systemic transmission of such signals. The results indicate that channels are impacted by limitations in the electro-optical bandwidth of the modulators used in their generation, but it is still possible to reach distances greater than 750 km.

**Keywords**—Optical Point-to-Point Transmission Systems, Optical Amplification, Electro-Optical Modulator.

## I. INTRODUÇÃO

Sistemas de transmissão ópticos têm sido uma solução largamente empregada e desenvolvida nos últimos anos, uma vez que permitem a transmissão de maiores volumes de dados quando comparados às conexões via rádio ou condutores metálicos [1]. Em grande medida, isso é possibilitado pela alta eficiência espectral dos canais ópticos advinda das tecnologias aplicadas, tais como [2, 3]: formatos de modulação de alta complexidade, altas taxas de símbolos, supercanais e avançadas técnicas de processamento digital de sinais.

Para que o desempenho demandado seja atingido, estudos, análises e experimentos vêm sendo feitos objetivando verificar as capacidades e limitações de sistemas ópticos de alta capacidade por canal, e o seu nível de degradação dadas limitações dos dispositivos empregados [4]. Neste artigo, investiga-se, por meio de simulações, o impacto da banda eletro-óptica e da razão de extinção dos moduladores ópticos no desempenho sistêmico de canais com capacidade de 1 Tb/s, parâmetros esses que são cruciais para o projeto de tais dispositivos.

Carine Mineto, Tiago Sutili e Lucas Silva Schanner estão com a divisão de Soluções de Comunicações Ópticas, CPQD, Campinas-SP, e-mail: carine@cpqd.com.br; tsutili@cpqd.com.br; e, schanner@cpqd.com.br.

Helder Alves Pereira está com a Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, e-mail: helder.pereira@dee.ufcg.edu.br.

O presente trabalho foi financiado pelos órgãos brasileiros MCTI e FUNTTEL-Finep. Os autores agradecem ainda o apoio institucional da Universidade Federal de Campina Grande e do CPQD.

## II. METODOLOGIA

O diagrama sistêmico considerado nas simulações realizadas, objetivando avaliar o alcance de sistemas ópticos de transmissão com capacidade de 1 Tb/s, é apresentado na Fig. 1, cujos componentes têm seus parâmetros apresentados na Tabela I. Nele, o transmissor é composto por um laser, responsável por gerar a portadora óptica; um modulador em fase e em quadratura (IQM – *In-Phase and Quadrature Modulator*) de niobato de lítio, responsável por inserir as informações transmitidas em tal portadora; amplificadores de microondas, responsáveis por amplificar os sinais modulantes; um conversor digital-analógico (DAC – *Digital-to-Analog Converter*), responsável por gerar a sequência de bits a ser transmitida; e um amplificador óptico de potência (*booster*), responsável por aumentar a potência do sinal lançado no enlace. O canal óptico transmitido é composto por portadora única com taxa de transmissão de 1 Tb/s, utilizando modulação de amplitude em quadratura (QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*) com constelação composta por 64 símbolos, resultando em uma taxa de símbolos de 100 GBd.

O enlace óptico é composto pela combinação de  $n$  trechos (*spans*) de 50 km de fibra monomodo padrão (SSMF – *Standard Single-Mode Fiber*) e amplificadores de linha. No receptor, o canal óptico é filtrado por um demultiplexador (demux) e amplificado por um pré-amplificador. Em seguida é misturado na híbrida de 90° com o oscilador local, sendo convertido para o domínio elétrico por fotodetectores e amostrado por um conversor analógico-digital (ADC – *Analog-to-Digital Converter*). Nas simulações o modelo de amplificação considerado foi o amplificador a fibra dopada com érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*). A recuperação das informações transmitidas é

TABELA I  
PARÂMETROS EMPREGADOS NAS SIMULAÇÕES SISTÊMICAS.

Parâmetro	Símbolo	64 QAM
Fator de Roll-off do Pulso de Nyquist	$\alpha$	0,1
Quantização do DAC e ADC	$N_{DAC/ADC}$	8 bits
Largura de Banda (-3dB) do DAC e ADC	$B_{DAC/ADC}$	55 GHz
Taxa de Amostragem do DAC e ADC	$R_{DAC/ADC}$	200 GSa/s
Comprimento de Onda Central do Canal	$\lambda_{ch}$	1550 nm
Largura de Linha do Laser	$\Delta\nu$	100 kHz
Largura de Banda (-3dB) do Modulador	$B_{mod}$	variável
Razão de Extinção do Modulador	$ER_{mod}$	18 dB
Potência de Lançamento	$P_L$	3 dBm
Comprimento do Enlace	$L$	variável
Largura de Banda (-3dB) do Demux	$B_{demux}$	110 GHz
Largura de Banda (-3dB) do Fotodetector	$B_{pd}$	100 GHz
Figura de Ruído do Amplificador	$NF_{EDFA}$	5 dB
Potência de Saída do Amplificador	$P_{outEDFA}$	-3 dBm
Atenuação da Fibra	$\alpha_{SSMF}$	0,25 dB/km
Dispersão da Fibra	$disp_{SSMF}$	16 ps/(nm · km)

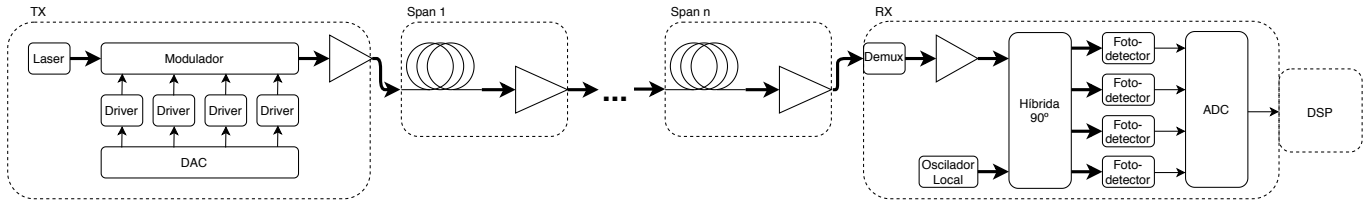


Fig. 1. Diagrama sistêmico considerado nas simulações realizadas objetivando avaliar o alcance de sistemas ópticos com capacidade de 1 Tb/s por canal.

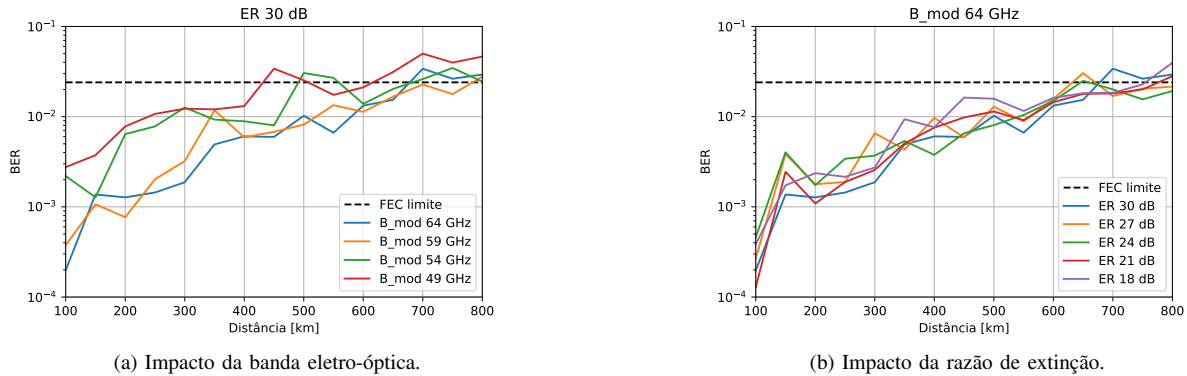


Fig. 2. Resultados comparando o impacto sistêmico de limitações no modulador eletro-óptico no alcance de canais a 1 Tb/s.

realizada através de algoritmos de processamento digital de sinais adequados (ortonormalização, compensação de dispersão cromática, equalizador direcionado ao raio e busca cega da fase) [5].

A análise dos resultados foi realizada por meio da estimação da taxa de erro de bits (BER – *Bit Error Rate*) em função do comprimento do enlace, analisando-se o alcance máximo do sistema no qual o sinal óptico ainda pode ser recuperado dentro do limite de  $2,4 \times 10^{-2}$  dos códigos corretores de erro (FEC – *Forward Error Correction*) considerados. Para isso, foram analisados dois cenários: (1) desempenho variando-se a largura de banda do modulador, mantendo-se a razão de extinção fixa e (2) desempenho variando-se a razão de extinção, mantendo-se a largura de banda do modulador fixa.

### III. RESULTADOS

A Fig. 2(a) ilustra a BER em função da distância, considerando uma razão de extinção de 30 dB, variando-se a largura de banda do modulador (49 GHz a 64 GHz, com passo de 5 GHz). Observa-se um aumento nos valores da BER ao se reduzir a largura de banda do modulador, bem como ao aumentar-se o comprimento do enlace. No primeiro caso, tem-se o impacto de distorções no espectro do sinal óptico por tal limitação de banda, enquanto que no segundo o efeito deletério dominante é a inserção de ruído óptico em cada estágio de amplificação inserido no sistema.

Por conseguinte, a Fig. 2(b) ilustra a BER em função da distância, considerando a largura de banda do modulador de 64 GHz, variando-se a razão de extinção (18 dB a 30 dB, com passo de 3 dB), a qual representa a razão entre as potências mínima e máxima na saída do modulador [6]. Assim, nota-se um menor impacto de tal parâmetro em comparação com a banda eletro-óptica do mesmo componente. Adicionalmente, os resultados obtidos permitem vislumbrar a possibilidade de que tais sistemas, com capacidade de transmissão de 1 Tb/s,

atingam distâncias de propagação superiores a 750 km antes de serem severamente impactados pela degradação de sua relação sinal-ruído.

### IV. CONCLUSÃO

A análise realizada, baseada em simulações computacionais, permitiu investigar o impacto de penalidades físicas em um sistema óptico de transmissão ponto-a-ponto. Os resultados indicam o significativo impacto da banda eletro-óptica do modulador no desempenho de sistemas ópticos de alta capacidade, fato constatado pelo aumento nos valores da BER ao reduzir-se tal parâmetro enquanto a razão de extinção se manteve fixa ( $ER = 30$  dB), obtendo-se um alcance máximo de aproximadamente 700 km ( $B_{mod} = 59$  GHz). Ademais, verificou-se que a razão de extinção do mesmo componente apresenta uma limitação menos pronunciada em tais condições. Não obstante, os resultados indicam que tais sistemas são opções viáveis para transmissões de alta capacidade entre regiões metropolitanas.

### REFERÊNCIAS

- [1] A. Ehrhardt, “Next generation optical networks and new services: an operator’s point of view,” in *International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 1. IEEE, 2007, pp. 323–326.
- [2] O. V. et al., “Enabling Technologies for Fiber Nonlinearity Mitigation in High Capacity Transmission Systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 50–60, 2019.
- [3] J. D. D. et al., “Optical fibers for flexible networks and systems [invited],” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 7, pp. A1–A11, 2016.
- [4] R. C. F. et al., “Advances and Perspectives Towards Tb/s Optical Transmission : (Invited Paper),” in *SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*, 2019, pp. 1–6.
- [5] S. J. Savory, “Digital coherent optical receivers: Algorithms and subsystems,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, no. 5, pp. 1164–1179, Sep. 2010.
- [6] A. V. T. et al., “Extinction ratio improvement of lithium niobate modulators for quantum communication systems,” in *International Conference Laser Optics (ICLO)*, 2018, pp. 438–438.