



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Carine Mineto

Avaliação de Desempenho de um Sistema Óptico de
Comunicação com Transmissão Ponto-a-Ponto

Campina Grande, PB
25 de setembro de 2020.

Carine Mineto

Avaliação de Desempenho de um Sistema Óptico de
Comunicação com Transmissão Ponto-a-Ponto

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador:
Helder Alves Pereira, Dr.

Campina Grande, PB
25 de setembro de 2020.

Carine Mineto

Avaliação de Desempenho de um Sistema Óptico de Comunicação com Transmissão Ponto-a-Ponto

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Telecomunicações

Aprovado em ____/____/____

Raquel Aline Araújo Rodrigues Felix, Dra.

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Helder Alves Pereira, Dr.

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador

Agradecimentos

São tantos agradecimentos que devem ser feitos, não só pela realização deste trabalho, mas de toda a caminhada ao longo da graduação, que me levaram a escolher essa área de atuação e esse tema de defesa.

Início meus agradecimentos ao professor Helder, por estar me orientando, incentivando, acompanhando, acreditando, desde o meu 3º período na UFCG, em que fui bolsista de PIBIC. Sendo ao meu ver o melhor professor da UFCG, devido à sua compreensão com o aluno em todas as suas limitações e angústias com provas e trabalhos paralelamente às demandas do projeto. Além de ter se concretizado como mestre e amigo, por todo o apoio alheio à situação acadêmica.

Ao professor Gutemberg Lira por ter sido meu orientador de monitoria no Laboratório de Eletrônica, que me fez mais confiante quanto aos meus conhecimentos básicos e práticos laboratoriais.

À Adail Paz por ter sido em todos os momentos muito solícita às minhas demandas, e muito carinhosa com todos os que dela precisam. Ao Tchai Oliveira, tendo sido meu primeiro contato na UFCG, recebendo a mim e ao meu pai tão calorosamente, um dos responsáveis por conquistar meu pai a me apoiar na loucura de morar na Paraíba sem nunca ter estado lá antes do dia da matrícula.

À equipe do projeto Parahybaja pela experiência inconfundível de por a mão na massa e ver que o circuito de bancada na maioria das vezes não se comporta da mesma forma quando exposto a condições extremas de poeira, lama e tudo o que a vida real tem a nos desafiar. Além da habilidade desenvolvida de responder rápida e eficientemente a problemas inesperados.

A todos os amigos do curso que de alguma forma contribuíram para a persistência na luta de chegar ao fim do curso, concluir com êxito todas as cadeiras. Cito alguns nomes que tiveram maior destaque como Victoria Fernandes, Lais Souto, Elias Gabriel, José Lucas, Antônio Francisco, Rômulo Amorim, Sávio Pessoa, Camila Machado, João Marcos, Elton Brasil, Rodrigo Raynton. Em especial à Lais e sua família por terem me acolhido em momentos de tristeza pela saudade de casa.

À instituição que me deu a oportunidade de estagiar e desenvolver esse trabalho de conclusão do curso. Nesse agradecimento incluo especialmente meu supervisor, Tiago Sutili, por toda a paciência e atenção em sanar, e às vezes repetir, todas as minhas dúvidas (que não são poucas). E à cada integrante da equipe de Comunicações Ópticas em 2020, que me acolheu de forma calorosa, à Márcia que cuida das minhas plantinhas. Também agradecer ao pessoal do RH que sempre foi muito paciente comigo, com todo o meu imediatismo.

À Lumena Duda por ter me apoiado em todos os momentos enquanto estive em Campina Grande, fazendo o papel de família continuamente. Não me deixando desistir de

cadeiras e estudos, me impulsionando a estudar quando não tinha mais forças.

Em memória ao majestoso Severino Alves da Nobrega por ter sido um avô emprestado tão incrível.

Ao João Batista e familiares por terem me acolhido e me tratado como integrante da família, em momentos de profunda saudade do Mato Grosso.

À Equipe de Jovens de Nossa Senhora de Fátima, que estiveram comigo desde o começo da minha fase na Paraíba, por me ouvirem, instruírem, me levarem para as Graças de Deus. Também tendo papel de família na cidade.

E por fim, e incontestavelmente importante à minha família, Vilma, Gilson, Caroline, Onofrio e Lurdes Mineto, por todo o apoio, compreensão, impulso, orações. Sem eles nada disso teria se concretizado, a força que me transmitiram foi sem igual, a confiança de me permitir ir pra tão longe sabendo que conseguiria foi inestimável.

À Deus, por ter me presenteado com todos esses seres humanos maravilhosos e muitos mais que fizeram parte dessa história. Sou muito grata por ser agraciada com tantas famílias, com tanto amor, em tantos lugares. E por todas as conquistas que foram alcançadas e que ainda serão galgadas.

Resumo

A transmissão por fibra óptica tem sido largamente utilizada devido à possibilidade de alcançarem-se altas taxas de transmissão de bits, quando comparada a sistemas de cabo coaxiais ou redes sem fio. Além de vantagens como baixa dispersão, imunidade a interferência eletromagnética, atenuação baixa e constante, redução de peso, tamanho e custo. Entretanto, há efeitos inerentes à estrutura que limitam a capacidade de sistemas de comunicação ópticos. Dada à crescente demanda por taxas de transmissão elevadas, analisar o impacto desses fenômenos em tais sistemas torna-se imprescindível para sua implementação. Assim, neste trabalho, o impacto de efeitos degradantes devido à inserção de ruído óptico e de limitações do modulador eletro-óptico em canais com taxas de transmissão de 1 Tb/s é avaliado por meio de simulações numéricas, pelas métricas BER e OSNR, analisando os parâmetros do modulador tal como banda e razão de extinção do componente. Os resultados dessas simulações indicam que os canais são altamente impactados por limitações na banda eletro-óptica dos moduladores empregados em sua geração. Ainda assim é possível alcançar distâncias superiores a 750 km para um esquema de modulação de 64-QAM e 250 km para um esquema de modulação de 256-QAM.

Palavras-chave: Análise de Desempenho, Formato de Modulação, Simulações Numéricas, Sistema de Transmissão Óptico.

Abstract

Optical fiber transmission has been widely used due to the possibility of achieving high bit rates, when compared to coaxial cable systems or wireless networks. In addition to advantages such as low dispersion, immunity to electromagnetic interference, low and constant attenuation, reduced weight, size and cost. However, there are inherent effects on the structure that limit the capacity of optical communication systems. Due to growing demand for high transmission rates, analyzing the impact of these phenomena on such systems is essential for their implementation. Thus, in this work, the impact of degrading effects due to the insertion of optical noise and limitations of electro-optical modulator on channels with transmission rates of 1 Tb/s is evaluated through numerical simulations, by BER and OSNR metrics, analyzing the modulator parameters such as band and extinction rate of the component. The results of these simulations indicate that the channels are highly impacted by limitations in the electro-optical band of the modulators used in their generation. Although, it is still possible to reach distances greater than 750 km for 64-QAM modulation scheme and 250 km for 256-QAM modulation scheme.

Keywords: Modulation Format, Numerical Simulations, Optical Transmission System, Performance Analysis.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Diagrama simplificado de um sistema óptico ponto a ponto.	16
Figura 2.2 – Diagrama simplificado de um transmissor óptico (Tx).	17
Figura 2.3 – Diagramas simplificados para comparação entre estrutura de rede e ponto a ponto para transmissão óptica.	18
Figura 2.4 – Diagrama de blocos simplificado de um sistema óptico ponto-a-ponto. .	19
Figura 2.5 – Modulador de Mach-Zehnder.	21
Figura 2.6 – Modulador em fase e quadratura.	22
Figura 4.1 – Diagrama sistêmico considerado nas simulações, objetivando avaliar o alcance de sistemas ópticos com capacidade de 1 Tb/s por canal. . . .	26
Figura 4.2 – Resultados comparando o impacto sistêmico de limitações no modula- dor eletro-óptico no alcance de canais a 1 Tb/s com modulação 64-QAM. 28	28
Figura 4.3 – Resultados comparando o impacto da banda eletro-óptica do modula- dor no alcance de canais a 1 Tb/s com modulação 64-QAM.	29
Figura 4.4 – Resultados comparando o impacto sistêmico de limitações no modula- dor eletro-óptico no alcance de canais a 1 Tb/s com modulação 256-QAM. 30	30
Figura 4.5 – Resultados comparando o impacto da razão de extinção do modulador no alcance de canais a 1 Tb/s com modulação 256-QAM.	31

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Contribuições do presente trabalho.	15
Tabela 3.1 – Resumo das contribuições da literatura.	25
Tabela 4.1 – Parâmetros empregados nas simulações sistêmicas.	27

Lista de Siglas

- ADC – *Analog-to-Digital Converter* conversor analógico-digital
- ASE – *Amplified Spontaneous Emission* emissão espontânea amplificada
- BER – *Bit Error Rate* taxa de erro por bit
- BPS – *Blind Phase Search* busca cega de fase
- CD – *Chromatic Dispersion* dispersão cromática
- CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor* semicondutor de óxido de metal complementar
- DAC – *Digital-to-Analog Converter* conversor digital-analógico
- DD – *Direct Detection* detecção direta
- DFE – *Decision Feedback Equalization* equalização de decisão por realimentação
- DMT – *Discrete Multi-Tone* multi-tons discretos
- DP – *Dual Polarization* dupla polarização
- DSP – *Digital Signal Processing* processamento digital de sinais
- EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifier* amplificador a fibra dopada com érbio
- ER – *Extinction Ratio* razão de extinção
- FEC – *Forward Error Correction* códigos corretores de erro
- IM/DD – *Intensity Modulation / Direct Detection* modulação de intensidade com detecção direta
- IQM – *In-Phase and Quadrature Modulator* modulador em fase e quadratura
- MI – *Mutual Information* informação mútua
- MZM – *Mach-Zehnder Modulator* modulador de Mach-Zehnder
- OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* multiplexação por divisão ortogonal de frequência
- OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio* relação sinal-ruído óptica
- OXC – *Optical Cross-Connect* roteador óptico

- PAM** – *Pulse Amplitude Modulation* modulação de amplitude de pulso
- PM** – *Phase Modulator* modulador de fase
- PMD** – *Polarization Mode Dispersion* dispersão por modo de polarização
- PBS** – *Polarization Beam Splitter* divisor de feixe de polarização
- QAM** – *Quadrature Amplitude Modulation* modulação de amplitude em quadratura
- RDE** – *Radially Directed Equalizer* equalizador direcionado ao raio
- SSMF** – *Standard Single Mode Fiber* fibra monomodo padrão
- SVDD** – *Stokes Vector Direct Detection* detecção direta por vetor de Stokes
- WDM** – *Wavelength Division Multiplexing* multiplexação por divisão de comprimento de onda

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Metodologia	14
1.4	Contribuições	15
1.5	Organização do Trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Sistemas Ópticos de Transmissão	16
2.2	Transmissão Ponto a Ponto	17
2.3	Modulador	19
2.4	Avaliação de Desempenho	20
2.5	Considerações Finais	22
3	ESTADO DA ARTE	23
3.1	Considerações Finais	25
4	SISTEMA ÓPTICO DE COMUNICAÇÃO COM TRANSMISSÃO PUNTO-A-PUNTO	26
4.1	Cenários de Simulação	27
4.2	Resultados e Discussões	28
4.2.1	Modulação 64-QAM	28
4.2.2	Modulação 256-QAM	29
4.3	Considerações Finais	31
5	CONCLUSÃO	32
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	32
5.2	Publicações	33
	REFERÊNCIAS	34

1 Introdução

O fato da luz poder ser guiada, dadas condições específicas de diferença de índice de refração, foi demonstrado por John Tyndall em 1870 ao projetar um feixe de luz em um tanque com água na direção de um orifício e a luz viajar dentro da água em queda, princípio que foi utilizado para construção de fibras ópticas [1]. Em meados do século seguinte, na década de 1960, as comunicações ópticas se tornaram viáveis com o advento do laser, inicialmente empregado para transmissões na atmosfera como uma alternativa aos sistemas de micro-ondas [2]. Posteriormente, a partir de 1970, as fibras ópticas permitiram guiar sinais luminosos em cabos adequados para transmissão de dados, surgindo como uma alternativa aos cabos coaxiais [3].

Considerando a comunicação por luz e vidro, desde o advento dos primeiros componentes ópticos na década de 1960, estabeleceu-se um contínuo processo de aprimoramentos tecnológicos tornando-os uma opção atrativa comercialmente a partir da década de 1980. Alguns dos fatores decisivos para tal competitividade comercial se relacionam com a fabricação de fibras com menores valores de atenuação conforme o comprimento de onda da luz, tornando possível a transmissão de dados por longas distâncias a altas taxas [2, 4], bem como a sua ampla largura de banda disponível, quando comparada aos sistemas de cabo de cobre, e sua baixa susceptibilidade a interferências eletromagnéticas [5].

Na primeira demonstração, com o uso de fibra óptica como guia de onda, as perdas se aproximavam a 20 dB/km, ainda inviabilizando a transmissão de dados por longas distâncias [2]. Entretanto, através de estudos subsequentes e melhorias no processo de fabricação, as perdas foram continuamente reduzidas, chegando a valores menores que 0,2 dB/km nos últimos anos [6]. A utilização da fibra óptica como guia de onda apresenta algumas vantagens significativas se comparada com os sistemas convencionais, baseados em condutores de cobre, tais como [2]: baixas perdas de propagação, larga banda de transmissão, tamanho e peso reduzidos, isolamento elétrica e matéria prima abundante.

Os primeiros sistemas de transmissão ópticos utilizavam fibras multimodo, o que limitava a capacidade e o alcance devido ao aparecimento de efeitos de dispersão intermodal. Posteriormente, essas foram substituídas por fibras monomodo, que não apresentavam tal problema, além de apresentarem baixas perdas em comprimentos de onda em torno de 1550 nm [6, 7]. Todavia, as fibras monomodo ainda apresentam o problema da dispersão cromática, que degrada a qualidade do sinal e limita a taxa de transmissão do sistema [2]. Algumas soluções para esse problema foram implementadas, por exemplo, baseadas na utilização de fibras com dispersão deslocada, as quais, entretanto, tornaram evidentes os problemas relacionados a efeitos não lineares, inerentes à propagação de sinais ópticos por fibras ópticas [6]. Atualmente, em situações específicas, são utilizados módulos de compensação de dispersão ou, de maneira mais geral, realiza-se a sua compensação no estágio de processamento digital de sinais [8].

1.1 Motivação

A partir da percepção de diversos efeitos deletérios, que limitam a capacidade de sistemas de comunicação ópticos, e dada à crescente demanda por taxas de transmissão elevadas [4, 9], faz-se crucial analisar o impacto desses fenômenos em tais sistemas. A abordagem proposta permite avaliar os parâmetros sistêmicos de maior impacto no desempenho de um enlace óptico, indicando possíveis abordagens para sua otimização. Para tanto, por meio dos resultados de uma transmissão óptica ponto-a-ponto, pode-se verificar o desempenho do sistema fazendo-se uso do formato de modulação e das configurações de canal desejados. Com isso, é possível analisar o impacto dos parâmetros de interesse com base em métricas de desempenho como, por exemplo, taxa de erro por bit (BER – *Bit Error Rate*), relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*) ou informação mútua (MI – *Mutual Information*).

Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar o desempenho da transmissão óptica ponto-a-ponto, utilizando as métricas BER e OSNR, para sistemas ópticos com capacidade de 1 Tb/s por canal fazendo uso de formatos de modulação de amplitude em quadratura com 64 e 256 símbolos por constelação. A configuração de canal adotada é promissora para aplicações em sistemas de alta capacidade de próxima geração [4].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho de um sistema óptico de comunicação com transmissão ponto-a-ponto.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1 Definir um cenário de simulação de sistemas ópticos ponto-a-ponto;
- 2 Escolher formatos de modulação para serem comparados, considerando os já existentes nos sistemas comerciais e os propostos na literatura;
- 3 Comparar o desempenho de tais formatos em termos das métricas BER e OSNR.

1.3 Metodologia

Realizou-se revisão bibliográfica para verificar o estado da arte em relação a sistemas ópticos de comunicações com transmissão ponto-a-ponto, com o intuito de definir cenários de simulação que permitissem a comparação entre os diferentes formatos de modulação, por meio das métricas BER e OSNR. Os cenários de simulação foram

implementados em simulador de código privado. A partir dos cenários definidos, foram realizadas simulações verificando o impacto de parâmetros específicos do modulador eletro-óptico, tais como, banda eletro-óptica e razão de extinção (ER – *Extinction Ratio*). Esses parâmetros foram selecionados por meio de simulações iniciais as quais foram variados diferentes parâmetros disponíveis no simulador no âmbito do transmissor óptico, por exemplo a largura de linha e a potência de bombeio do laser, a largura de banda do conversor digital-analógico (DAC – *Digital-to-Analog Converter*) e amplificadores de microondas (*driver*). Os parâmetros que apresentaram maior influência nas métricas foram, dessa forma, escolhidos para serem analisados com maior afinco. Sendo variados para diferentes comprimentos de enlace, permitindo definir qual o alcance do sistema para diferentes formatos de modulação.

1.4 Contribuições

Na Tabela 1.1 é apresentado os resultados alcançados ao se realizar o presente trabalho, em que a partir da revisão bibliográfica feita, foi possível definir os formatos de modulação para realizar as simulações numéricas e, prever o alcance de um sistema óptico de transmissão ponto a ponto com taxa de 1 Tb/s em uma única portadora a 1550 nm. Ao empregar-se o formato de modulação 64-QAM, o alcance foi de 750 km e, para 256-QAM, o alcance foi de 250 km, isso a uma taxa de símbolos de 100 GBaud e 75 GBaud, respectivamente, sendo em torno de dez vezes mais elevadas que as apresentadas na literatura [10].

Tabela 1.1 – Contribuições do presente trabalho.

Esquema de Modulação	Taxa alcançada [Gb/s]	Taxa de símbolos por portadora [GBaud]	Alcance [km]
64 QAM	1000	100	750
256 QAM	1000	75	250

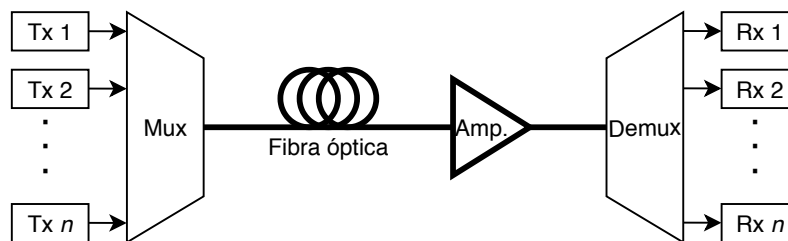
1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho apresentará no Capítulo 2 os conhecimentos básicos necessários para compreender um sistema óptico e como ele será avaliado. O atual estado da arte é apresentado no Capítulo 3 em termos da capacidade e alcance de tais sistemas de telecomunicações, permitindo uma melhor compreensão da contribuição deste trabalho. Na sequência, o Capítulo 4 conterà uma descrição detalhada das simulações realizadas, bem como uma análise de desempenho baseada nos resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 5 será feita uma ponderação sobre os estudos efetuados e sobre os resultados obtidos.

2 Fundamentação Teórica

Na Figura 2.1 é apresentado um diagrama simplificado de um sistema óptico de transmissão, composto por n transmissores, cada um individualmente responsável pela geração de um canal óptico, um multiplexador em comprimento de onda, um canal de transmissão composto por uma fibra e um amplificador óptico, um demultiplexador responsável pela separação dos canais e n receptores para a recuperação dos dados transmitidos. Entretanto, para que se tenha uma visão mais clara dos seus princípios operacionais, faz-se necessário analisar individualmente o princípio de funcionamento dos componentes que compõem tais blocos (como, por exemplo, lasers, moduladores, conectores, chaves, acopladores, amplificadores e fotodetectores) uma vez que são responsáveis pela conversão eletro-óptica dos sinais, acoplamento dos sinais na fibra, dentre outras funções [11, 12]. Assim, as Seções 2.1, 2.2 e 2.3 descrevem os elementos mais relevantes para a análise proposta no Capítulo 4, detalhando o seu princípio operacional e a importância de alguns dos parâmetros de interesse.

Figura 2.1 – Diagrama simplificado de um sistema óptico ponto a ponto.



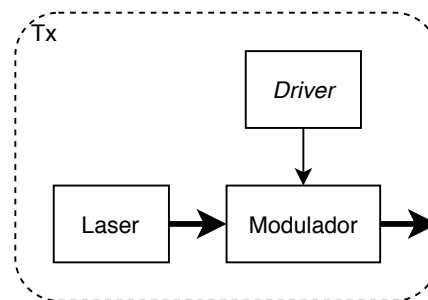
Fonte: Do próprio autor.

2.1 Sistemas Ópticos de Transmissão

Sistemas ópticos, também chamados de sistemas de ondas de luz, foram precedidos por sistemas que utilizavam rudimentarmente a luz ou o vidro como meio de comunicação, tal como espelhos, faróis de fogo e sinais de fumaça [13]. Esses sistemas rudimentares, bem como os sistemas ópticos atuais, compartilham algumas características como transmissor, meio de transmissão e receptor, o que os diferencia são seus componentes em cada um desses blocos. Nos sistemas atuais, empregando fibras ópticas como meio de transmissão, o transmissor é composto por fonte de luz e elementos eletro-ópticos de modulação; enquanto o canal óptico é composto pela fibra óptica, usualmente recoberta por camadas de proteção mecânica, e amplificadores; por fim, o receptor contém fotodetectores e o circuito restaurador de sinal [2].

Dessa forma, utilizando esses sistemas, e tendo como foco o transmissor, que será o objeto de estudo desse trabalho, os componentes que o constituem e podem ser analisados, a partir da Figura 2.2 (setas de maior espessura representam sinais ópticos e a de menor espessura são sinais elétricos), são o laser, que é utilizado como a fonte óptica, o *driver*, que tem o papel de prover potência elétrica para os sinais modulantes em ráiofrequência, enquanto o modulador converte a onda contínua de luz em um trem de pulsos codificado por dados com o formato de modulação adotado [13]. Ao projetá-los, os principais parâmetros a serem levados em conta são: potência de saída, tempo de subida/descida, razão de extinção, formato de modulação, taxa de supressão de modo lateral, ruído de intensidade relativa e estabilidade e precisão do comprimento de onda [5]. As características de todos os componentes do transmissor tem impacto direto no desempenho sistêmico, sendo alvo de constante processo de melhorias tecnológicas [14, 15, 16]. Neste trabalho, em específico, conforme será detalhado nas Seções 2.2 e 2.3, serão analisadas penalidades relacionadas a parâmetros do modulador eletro-óptico.

Figura 2.2 – Diagrama simplificado de um transmissor óptico (Tx).

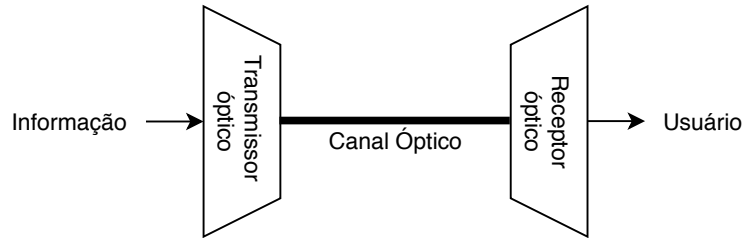


Fonte: Do próprio autor.

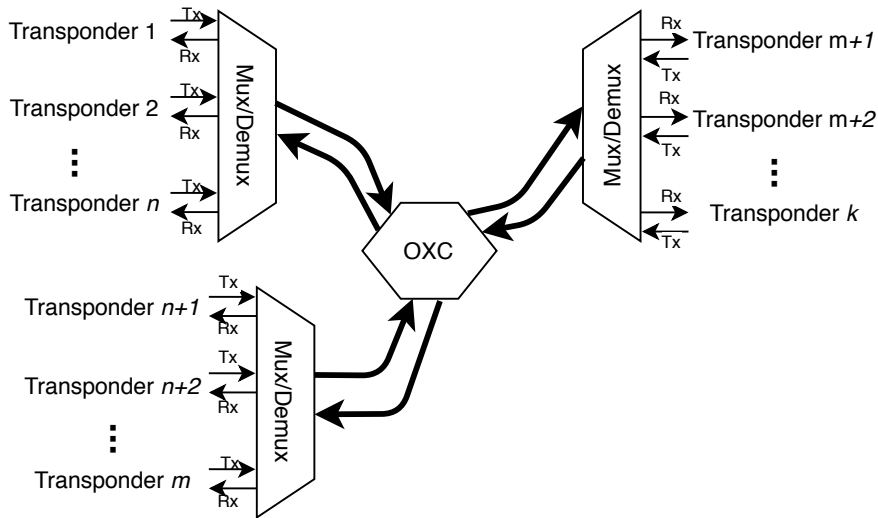
2.2 Transmissão Ponto a Ponto

Quando se referencia à rede de transmissão de dados, remete-se à ideia de uma grande teia com vários nós que se conectam de formas dinâmica e coordenada pela gerência da rede para que haja a conexão e seja possível a comunicação entre diversos usuários, com vários canais, diferentes informações e destinos distintos [17, 18]. Entretanto, há também a possibilidade de sistemas ponto a ponto, em que há apenas uma rota para o sinal seguir entre o transmissor e o receptor, sendo exclusivo para esse tráfego [19, 20, 18]. Na Figura 2.3(a) é apresentado um esquema simplificado do sistema ponto a ponto em que há um único caminho para a informação seguir até o usuário e a Figura 2.3(b) o esquemático de uma rede óptica. Um exemplo de funcionamento dessa estrutura seria a informação do transponder 2 passando pelo dispositivo de roteador óptico (OXC – *Optical Cross-Connect*), que tem a função de chavear cada canal óptico entre diferentes fibras de entrada e de saída, para só daí seguir para o receptor e chegar ao usuário no transponder k .

Figura 2.3 – Diagramas simplificados para comparação entre estrutura de rede e ponto a ponto para transmissão óptica.



(a) Sistema de transmissão óptica ponto a ponto.



(b) Rede de transmissão óptica.

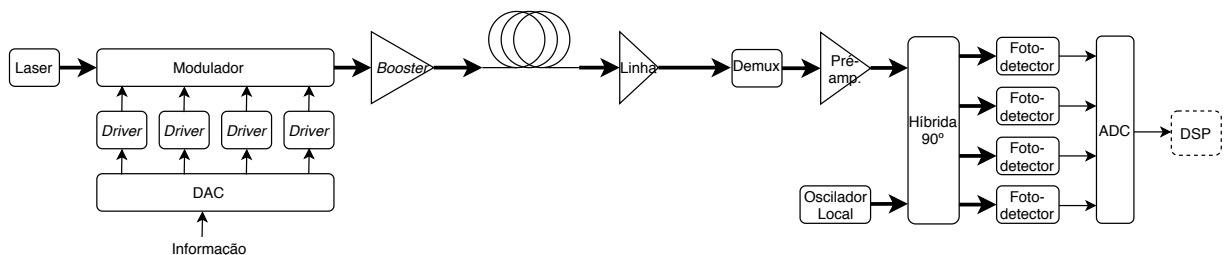
Fonte: Do próprio autor.

O cenário da Figura 2.3(a) é escolhido para ser avaliado por facilitar a análise do comportamento dos componentes individuais dos sistemas quanto ao sinal que é transmitido, e conseqüentemente degradado devido aos efeitos deletérios inerentes à sua geração, propagação e recepção. Dessa forma, é possível prever o impacto de diversos fatores ao se extrapolar tal sistema ponto-a-ponto em uma rede com vários enlaces que transmitem sinais de variados usuários. De modo geral, o projeto de tais redes de maior complexidade, já pressupõem que os componentes ópticos foram projetados e otimizados em nível sistêmico, considerando o seu comportamento como próximo ao ideal [2].

Sendo assim, uma breve descrição do processo, que está ilustrado na Figura 2.4, inclui, inicialmente, a conversão da informação a ser transmitida no sinal elétrico, para o domínio analógico. Essa conversão fica limitada à resposta do conversor em determinada taxa de amostragem. Assim, o sinal é amplificado com uma banda limitada imposta pelo circuito do *driver*, que o entrega para o modulador, que tem limitação de banda e razão de extinção, esse sinal, que é modulado a partir do feixe de luz do laser, que possui determinada potência de saída, largura de linha e comprimento de onda de emissão determinados por suas características construtivas e condição operacional. Na seqüência, o amplificador de potência (*booster*) deve aumentar a amplitude do sinal luminoso, o que não deve ser

feito de forma arbitrária, pois isso pode inserir efeitos não lineares que não são eliminados no processamento desse sinal antes de ser entregue ao usuário. A seguir, o sinal óptico é propagado pelo canal, considerando-se sua dispersão, bem como a atenuação da fibra empregada. Em sistemas de longo alcance, deve-se também considerar a figura de ruído e a potência de saída dos amplificadores de linha. Ao receber o sinal, a primeira variável considerada é a largura de banda de atuação do demultiplexador, para em seguida se certificar da figura de ruído do pré-amplificador, a potência do sinal e a banda do oscilador local, a simetria dos braços da híbrida de 90° , largura de banda do fotodetector, taxa de amostragem e largura de banda do conversor analógico/digital. Após isso, é preciso levar em conta os códigos de processamento digital de sinais (DSP – *Digital Signal Processing*) que, para tornar o sistema viável, precisam fazer o processamento dos sinais simultaneamente na sua recepção, o que demanda uma alta complexidade e robustez de *hardware*, pois esses códigos precisam compensar a dispersão da fibra e distorções na fase do sinal decorrentes de efeitos não lineares. Por fim, conhecendo cada um desses elementos limitantes, é possível analisá-los detalhadamente, com a intenção de mitigar o seu efeito degradante, ou prever o impacto sistêmico que irão causar.

Figura 2.4 – Diagrama de blocos simplificado de um sistema óptico ponto-a-ponto.



Fonte: Do próprio autor.

2.3 Modulador

Dispositivo integrante do transmissor, o modulador tem o papel de converter os sinais elétricos modulantes em um sinal óptico modulado [21], conforme ilustrado na Figura 2.2. Há diferentes estruturas de moduladores, tal como modulador em fase e quadratura (IQM – *In-Phase and Quadrature Modulator*), modulador de fase (PM – *Phase Modulator*), modulador de Mach-Zehnder (MZM – *Mach-Zehnder Modulator*) [22]. E, conforme o substrato e tecnologia aplicados em sua fabricação, o modulador terá características diferentes, que o tornam elegível para determinadas aplicações e sistemas [23, 24].

Devido à consolidada integração entre moduladores na plataforma de silício com os demais componentes do sistema [24], será abordado o funcionamento do MZM nessa plataforma. O fenômeno que descreve o funcionamento desse tipo de modulador é a interferência entre portadoras ópticas. Na plataforma de silício, o fenômeno físico no

qual tal princípio de funcionamento se baseia é o efeito de dispersão de plasma, em que os índices de refração e de absorção dependem da concentração de portadores em uma junção de materiais com diferentes dopagens. Assim, a partir da alteração da dimensão da região de depleção no guia de onda, a variação do índice de refração é ocasionada [22].

Para o MZM em silício, a abordagem empurra-puxa (*push-pull*) em série aumenta a largura de banda, diminui a atenuação dos sinais elétricos e reduz a capacitância do dispositivo [24]. Entretanto, quando acontecem defeitos de fabricação, que causam diferença de fase não previstas, há uma redução na ER, a qual representa a razão entre as potências mínima e máxima na saída do modulador [25], que impacta no desempenho do sistema. Uma forma de evitar esse problema é acrescentar aquecedores em um dos braços do MZM que, pelo efeito termo-óptico, são capazes de alterar a fase da portadora óptica. Quanto à banda eletro-óptica do MZM (representa a faixa de frequência antes que a resposta do modulador apresente uma queda de 3 dB de intensidade [26]), parâmetro de grande interesse sistêmico, os fatores que precisam ser considerados são, especialmente, a resistência e a capacitância da junção PN.

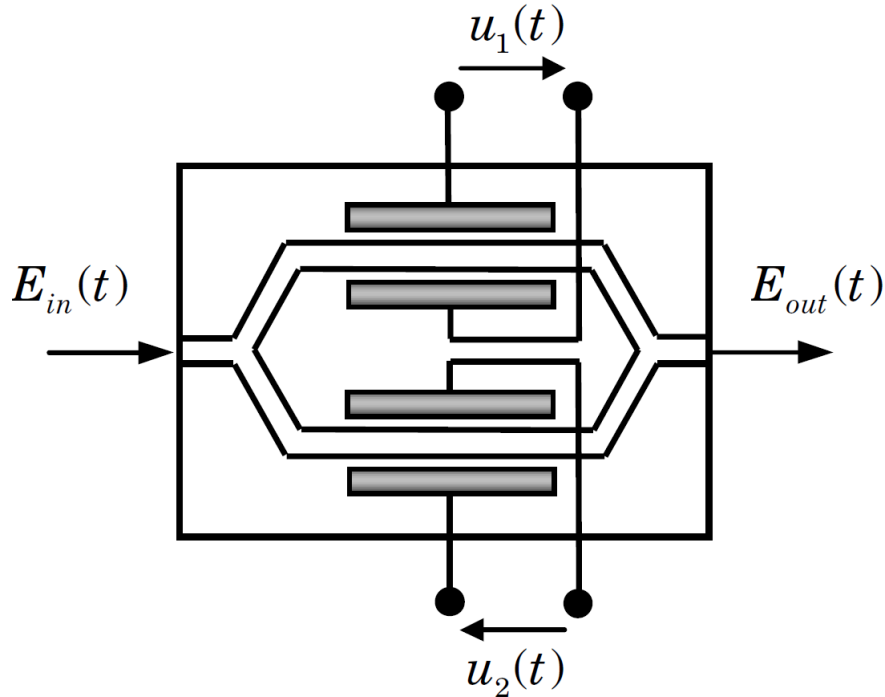
Ao utilizar o fato de que o índice de refração de um material pode ser alterado aplicando uma tensão externa através de um eletrodo revestido devido à alteração da dimensão da região de depleção, o campo elétrico da portadora óptica de entrada pode ser modulado em fase [22]. Baseada em tal princípio, na Figura 2.5 é apresentado o esquema de um MZM em que se aplica o sinal óptico na entrada $E_{in}(t)$ e sinais elétricos de determinadas amplitudes em $u_1(t)$ e $u_2(t)$, que alteram a fase do sinal óptico. Essa alteração pode resultar em uma interferência construtiva ou destrutiva no sinal novamente recombinado na saída, $E_{out}(t)$, dependendo da amplitude aplicada a $u_1(t)$ e $u_2(t)$.

Na Figura 2.6 apresenta-se o modulador IQM utilizado nas simulações do presente trabalho. Pela análise da Figura 2.6, percebe-se que esse modulador é composto por dois MZM e um PM, que tem o funcionamento conforme um dos braços do MZM, em que se aplica uma tensão externa de intensidade constante e a partir dela ocorre a alteração de fase pela mudança no índice de refração, que modula o sinal de entrada. A amplitude $-V_\pi/2$ é aplicada para se obter um deslocamento de $\pi/2$ radianos no sinal. Sendo assim, ao ser dividida em duas partes iguais, a luz do braço superior é submetida a uma tensão de amplitude $u_I(t)$, adicionando a diferença de fase referente a essa tensão. Quanto ao braço inferior, é adicionada uma fase extra pelo PM, além da inserida pelo MZM, com tensão $u_Q(t)$. Na saída $E_{out}(t)$ do IQM, é possível obter qualquer ponto da constelação devido à combinação da luz de ambos os braços no plano real e imaginário [22].

2.4 Avaliação de Desempenho

Métricas de desempenho visam mostrar o quanto determinado sistema está sendo efetivo no seu papel de transmitir sinais do transmissor ao receptor [5]. Existem diversas

Figura 2.5 – Modulador de Mach-Zehnder.



Fonte: Baseada em Seimetz [22].

métricas propostas na literatura, dentre elas, a BER segue sendo largamente aceita como uma das métricas de maior confiabilidade, uma vez que representa de modo direto a quantidade de erros associada à determinada transmissão. Ou seja, ao se transmitir bits 0's e 1's, quantos, devido a efeitos deletérios diversos, foram erroneamente identificados na recepção [13]. Tal métrica pode ser baseada ou na contagem direta de bits corretamente e erroneamente recebidos, ou estimada a partir da qualidade do sinal recebido, como, por exemplo, o fator Q , conforme descrito nas Equações (2.1) e (2.2)

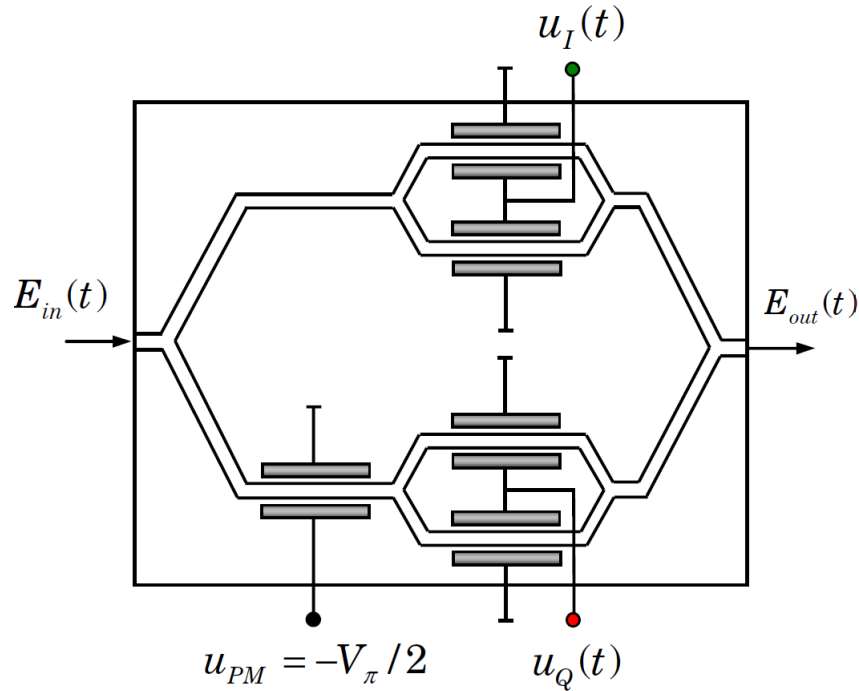
$$BER = Q\left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}\right) \quad (2.1)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2/2} \quad (2.2)$$

em que I_1 é a fotocorrente média para a transmissão do bit 1 e σ_1 é a sua variância, as mesmas variáveis de índice 0 correspondem à transmissão do bit 0 [5]. Já a Equação (2.2) denota a probabilidade de que uma variável aleatória gaussiana de média e variância iguais a zero exceda o valor x [5].

Outra métrica empregada é a OSNR, conforme descrito na Equação (2.3), na qual tem-se a razão entre potência óptica (P_{RX}) e a potência do ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) (P_{ASE}^{tot}). Para a maioria dos sistemas de longo alcance, os quais fazem uso de amplificação óptica, tal fator é limitante para que a transmissão seja efetuada, uma vez que, se o sistema não for corretamente

Figura 2.6 – Modulador em fase e quadratura.



Fonte: Baseada em Seimetz [22].

projetado, a inserção de ruído acumulada nos diversos estágios de transmissão poderá inviabilizar a recepção dos dados transmitidos [13].

$$OSNR = \frac{P_{RX}}{P_{ASE}^{tot}} \quad (2.3)$$

2.5 Considerações Finais

A partir do conhecimento exposto nesse capítulo, verifica-se os componentes presentes em um sistema óptico, bem como parâmetros a serem levados em consideração em um projeto sistêmico, métricas que auxiliam nesse projeto, um esquema de transmissão em que é possível avaliar estreitamente os componentes do sistema conforme os efeitos inerentes que podem afetar no seu desempenho, além do detalhamento de um dos dispositivos presente nesse esquema, e a busca na literatura por trabalhos realizados que puderam contribuir para o desenvolvimento desta composição. Com isso, o Capítulo 4 entrelaça esses conhecimentos para apresentar resultados de simulações que possibilitam prever o comportamento de uma transmissão de médio alcance a altas taxas.

3 Estado da Arte

Hu et al. [16] apresentaram detecção direta por vetor de Stokes (SVDD – *Stokes Vector Direct Detection*) como o esquema que atinge a maior eficiência espectral elétrica para avançados formatos de modulação em redes de curto alcance (entre *Data Centers*). Essas redes demandam capacidades superiores a 100 Gb/s por comprimento de onda. Defende-se que os dispositivos de detecção direta (DD – *Direct Detection*) apresentam vantagens tal como custo reduzido e tecnologias simplificadas nos transceptores. Um experimento foi executado para verificar os algoritmos de mitigação de dispersão por modo de polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*), no qual foi levado em conta um gerador de 3 tons, DAC, modulador, emulador de PMD, divisor de feixe de polarização (PBS – *Polarization Beam Splitter*), híbrida de 90°, detector balanceado e conversor analógico-digital (ADC – *Analog-to-Digital Converter*). Após obtidos os resultados do experimento, os parâmetros foram ajustados nas simulações, e essas resultaram em uma taxa de 160 Gb/s com o esquema de modulação de amplitude em quadratura (QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*) com 16 símbolos no qual é requerido uma OSNR de 27 dB com SVDD.

Zhou et al. [23] estudaram a performance de moduladores de Mach-Zehnder baseados em efeitos de depleção em fotônica de silício com uma fabricação comercial, na qual otimizou-se a dopagem e design do dispositivo. A partir disso, analisaram a taxa de símbolos possibilitada conforme o esquema de modulação utilizado. Os quais são 85 GBaud para 16QAM e 64 GBaud para 64 QAM com BER abaixo do limite dos códigos corretores de erro (FEC – *Forward Error Correction*), (2×10^{-2}), com uma ER superior a 25 dB. Para o QAM, obteve-se uma taxa bruta de 384 Gb/s com uma única portadora em uma polarização e 768 Gb/s com dupla polarização (DP – *Dual Polarization*). Esses resultados foram obtidos com o casamento de velocidade e impedância por dopagem e otimização do MZM usando uma modelagem precisa de conversão óptico-elétrica.

Shi et al. [24] apresentaram resultados experimentais em que para uma DP-32 QAM atingiu-se uma taxa de 72 GBaud (720 Gb/s) por 160 km, DP-16 QAM com 84 GBaud (672 Gb/s) em 720 km e 60 GBaud (400 Gb/s) em 1520 km. Para isso, foi utilizado a tecnologia compatível de semicondutor de óxido de metal complementar (CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) para fabricação do dispositivo. Nesse trabalho, a eficiência espectral alcançada foi de 8,3 bits/Hz. Os resultados foram obtidos por meio do desenvolvimento de um MZM, em que otimizou-se as penalidades de potência do modulador pela atenuação em guias de onda dopadas com sílica, perda de modulação devido a um balanço de tensão menor que V_π , e interferência intersimbólica devido à largura de banda eletro-óptica limitada. Utilizar a variável V_π equivale à aplicar um deslocamento de π radianos no sinal.

André et al. [27] compararam multiplexação por divisão ortogonal de frequência (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e modulação de amplitude de pulso (PAM – *Pulse Amplitude Modulation*) para Ethernet 400G com base na interface de detecção direta com intensidade modulada (IM/DD – *Intensity Modulation / Direct Detection*) de 3 bits de alta taxa de transmissão a 1550 nm. Em resultados experimentais, a taxa alcançada foi de 27 Gb/s com OFDM ao longo de 10 km em fibra monomodo padrão (SSMF – *Standard Single Mode Fiber*). A comparação foi feita por meio de simulações, em que foram extrapolados os valores experimentais e, com essas extrapolações, foi exposta a possibilidade de alcançar 64 Gb/s por mais de 10 km com 4PAM a 32 GBaud com equalização de decisão por realimentação (DFE – *Decision Feedback Equalization*) implementada. Notou-se que a OFDM é fortemente limitada pelo ruído de quantização do DAC. Os resultados foram obtidos por meio de simulações no *VPItransmissionMaker Optical Systems*, a partir de experimentos com comprimentos de fibra limitados que proveram as configurações dos componentes e do sistema para as simulações.

Eiselt et al. [28] investigaram a aplicação da transmissão de IM/DD para a transmissão entre *Data Centers* para fazer uso de componentes de acordo com o padrão IEEE 802.3BS. Assim, indicaram a possibilidade de uma transmissão de curto alcance com uma taxa de 400 Gb/s usando 4PAM, entre 5 km a 6 km. E também 80 Gb/s por 80 km com transmissão multi-tons discretos (DMT – *Discrete Multi-Tone*), a qual tem a vantagem em relação à 4PAM por sofrer menores níveis de degradação em relação a determinados efeitos deletérios e requerer um DSP menos robusto na recepção. Para obterem esses resultados, foram feitas análises da BER em função da OSNR para os dois tipos de transmissão, em cenário sem considerar meio de transmissão, em que o equipamento transmissor é conectado diretamente ao receptor (*back-to-back*), e ao longo de 80 km de fibra SSMF. Para tanto, foram considerados para o 4PAM diferentes combinações de equalização e para a DMT as modulações banda lateral dupla e vestigial.

Silva et al. [29] analisaram, em cenário experimental, a taxa alcançável em sistemas coerentes, empregando formatos de modulação QAM com retropropagação digital, usando o método de Fourier com passos divididos, o qual permite a compensação de efeitos não-lineares decorrentes do efeito Kerr em cada comprimento de onda em um sistema de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*). As constelações utilizaram a formatação probabilística de modo a otimizar a distribuição de probabilidades dos símbolos, dadas às características do canal óptico para as constelações 256 QAM e 1024 QAM. Para uma transmissão com alcance de 1700 km em 5 canais, a taxa para cada canal DP-256 QAM foi de 112 Gb/s e em DP-1024 QAM foi 118 Gb/s.

Klejs et al. [10] consideraram experimentalmente a transmissão de longo alcance com DP-1024 QAM e 8 GBaud para fibra amplificada apenas com Raman usando um conjunto de frequência óptica, por meio da análise das penalidades da interferência entre

canais (*crosstalk*) devido ao espaçamento entre as frequências do conjunto. Foram analisados 3 diferentes formatos de modulação (64 QAM, 256 QAM e 1024 QAM) e obtidos diferentes taxas conforme a variação do comprimento do enlace. Para a taxa mantida em 1 Tb/s com a modulação 1024 QAM, o alcance da transmissão foi 1000 km, enquanto com a 256 QAM foi de apenas 600 km. Em uma segunda análise, considerou-se uma distância de transmissão de 3000 km e obteve-se para o esquema 64 QAM uma taxa de 680 Gb/s, enquanto que para o formato de modulação 1024 QAM a máxima taxa foi de 640 Gb/s.

3.1 Considerações Finais

A Tabela 3.1 apresenta um resumo das contribuições do estado da arte, em que os parâmetros serviram como base para as simulações posteriormente apresentadas no Capítulo 4.

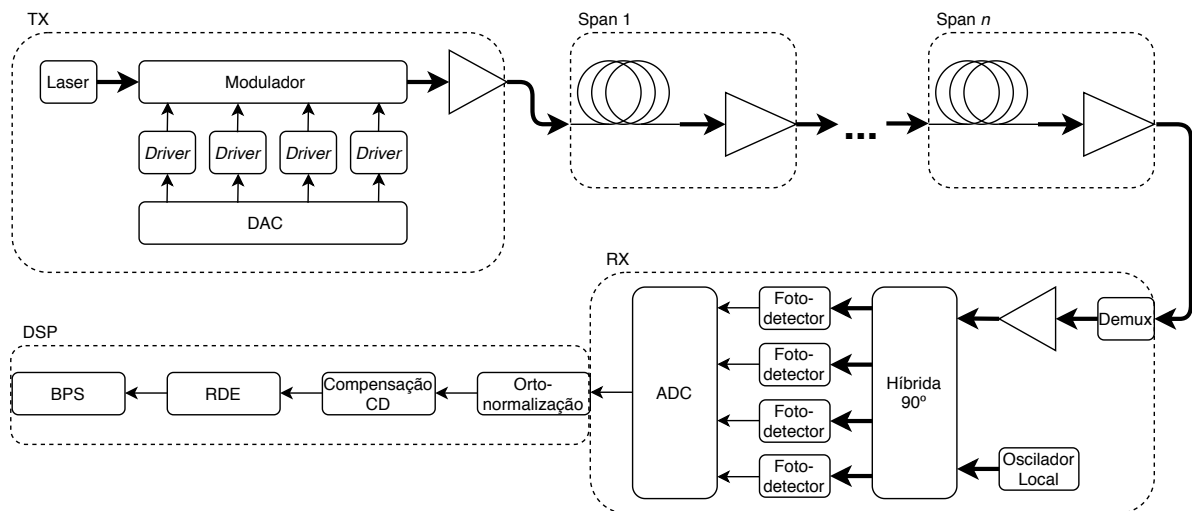
Tabela 3.1 – Resumo das contribuições da literatura.

Referência/Artigo	Esquema de Modulação	Taxa alcançada [Gb/s]	Taxa de símbolos por portadora [GBaud]	Número de portadoras	Alcance [km]
Klejs [10]	1024 QAM	1000	8	8-10	1000
Klejs [10]	256 QAM	1000	8	8-10	600
Klejs [10]	64 QAM	680	8	8-10	3000
Klejs [10]	1024 QAM	640	8	8-10	3000
Hu [16]	16 QAM	160	–	4	–
Zhou [23]	64 QAM	384	64	1	–
Zhou [23]	DP-64 QAM	768	64	1	–
Shi [24]	DP-32 QAM	720	72	1	160
Shi [24]	DP-16 QAM	672	84	1	720
Shi [24]	DP-16 QAM	400	60	1	1520
André [27]	4 PAM	64	32	1	10
André [27]	OFDM	27	–	16	10
Eiselt [28]	4 PAM	400	–	–	80
Eiselt [28]	DMT	80	–	–	80
Silva [29]	DP-256 QAM	560	10	5	1700
Silva [29]	DP-1024 QAM	590	10	5	1700
Presente trabalho	64 QAM	1000	100	1	750
Presente trabalho	256 QAM	1000	75	1	250

4 Sistema Óptico de Comunicação com Transmissão Ponto-a-Ponto

O diagrama sistêmico considerado nas simulações, objetivando avaliar o alcance de sistemas ópticos de transmissão com capacidade de 1 Tb/s, é apresentado na Figura 4.1, cujos componentes tem seus parâmetros apresentados na Tabela 4.1. O transmissor é composto por um laser, responsável por gerar a portadora óptica, um modulador IQM, responsável por inserir as informações transmitidas em tal portadora, *drivers*, responsáveis por amplificar os sinais modulantes, um DAC, 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 sinal óptico transmitido é composto por portadora única com taxa de transmissão de 1 Tb/s, utilizando formato QAM com constelação composta por 64 ou 256 símbolos, resultando em uma taxa de símbolos de 100 GBaud e 75 GBaud, respectivamente.

Figura 4.1 – Diagrama sistêmico considerado nas simulações, objetivando avaliar o alcance de sistemas ópticos com capacidade de 1 Tb/s por canal.



Fonte: Do próprio autor.

O enlace óptico é composto pela combinação de n trechos (*spans*) de 50 km de SSMF e amplificadores de linha. Nas simulações, o modelo considerado foi o amplificador a fibra dopada com érbio (EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifier*). No receptor, o sinal 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 ADC. A recuperação das informações transmitidas é realizada através de algoritmos de DSP adequados [8].

Em que o sinal digital é ortonormalizado, então, é feita a compensação da dispersão cromática (CD – *Chromatic Dispersion*) causada pela fibra, posteriormente passa pelo equalizador direcionado ao raio (RDE – *Radially Directed Equalizer*). Esse raio pode ter sido distorcido e, por fim, é feita a busca cega de fase (BPS – *Blind Phase Search*) nesse sinal para compensar essa possível distorção.

A análise dos resultados foi realizada por meio da estimação da BER 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 $2,4 \times 10^{-2}$ do FEC considerado. Uma segunda investigação é feita por meio da BER em função da OSNR, investigando-se a OSNR mínima requerida para transmissão do sinal tomando como base o mesmo FEC.

Tabela 4.1 – Parâmetros empregados nas simulações sistêmicas.

Parâmetro	Símbolo	64 QAM	256 QAM
Fator de <i>Roll-off</i> do Pulso de Nyquist	α	0,1	0,1
Taxa de Símbolos	R_S	100GBaud	75 GBaud
Quantização do DAC e ADC	$N_{DAC/ADC}$	8 bits	8 bits
Largura de Banda (-3 dB) do DAC e ADC	$B_{DAC/ADC}$	55 GHz	45 GHz
Taxa de Amostragem do DAC e ADC	$R_{DAC/ADC}$	200 GSa/s	150 GSa/s
Comprimento de Onda Central do Canal	λ_{ch}	1550 nm	1550 nm
Largura de Linha do Laser	$\Delta\nu$	100 kHz	50 kHz
Largura de Banda (-3 dB) do Modulador	B_{mod}	variável	variável
Razão de Extinção do Modulador	ER_{mod}	variável	variável
Potência de Lançamento	P_L	3 dBm	3 dBm
Comprimento do Enlace	L	variável	variável
Largura de Banda (-3 dB) do Demux	B_{demux}	110 GHz	82,5 GHz
Largura de Banda (-3 dB) do Fotodetector	B_{pd}	100 GHz	75 GHz
Figura de Ruído do Amplificador	NF_{EDFA}	5 dB	5 dB
Potência de Saída do Amplificador	$P_{outEDFA}$	-3 dBm	-3 dBm
Atenuação da Fibra	α_{SSMF}	0,25 dB/km	0,25 dB/km
Dispersão da Fibra	D_{SSMF}	16 ps/(nm · km)	16 ps/(nm · km)

4.1 Cenários de Simulação

Foram analisados dois cenários para avaliação de desempenho do sistema óptico de transmissão: (1) variando-se a largura de banda do modulador, mantendo-se a ER fixa e (2) variando-se a ER e mantendo-se a largura de banda do modulador fixa. Os dois cenários foram avaliados da mesma forma para ambos os esquemas de modulação, 64-QAM e 256-QAM, somando assim, 4 cenários de simulação.

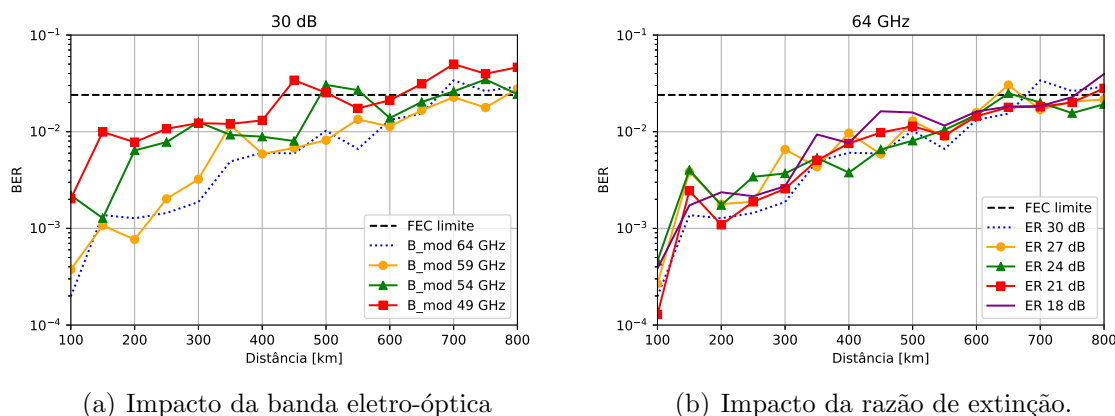
4.2 Resultados e Discussões

4.2.1 Modulação 64-QAM

Na Figura 4.2(a) ilustra-se a BER em função da distância, considerando uma ER de 30 dB, variando-se a largura de banda do modulador (de 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 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 BER em função da distância é ilustrado na Figura 4.2(b), considerando a largura de banda do modulador de 64 GHz, variando-se a ER (de 18 dB a 30 dB, com passo de 3 dB). 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 que, tais sistemas com capacidade de transmissão de 1 Tb/s, atinjam distâncias de propagação superiores a 750 km antes de serem severamente impactados pela degradação de sua relação sinal-ruído óptica.

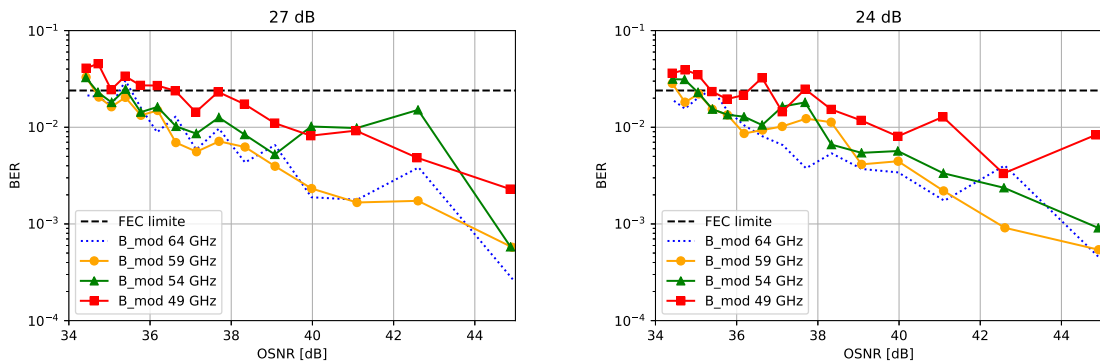
Figura 4.2 – Resultados comparando o impacto sistemático de limitações no modulador eletro-óptico no alcance de canais a 1 Tb/s com modulação 64-QAM.



Fonte: Do próprio autor.

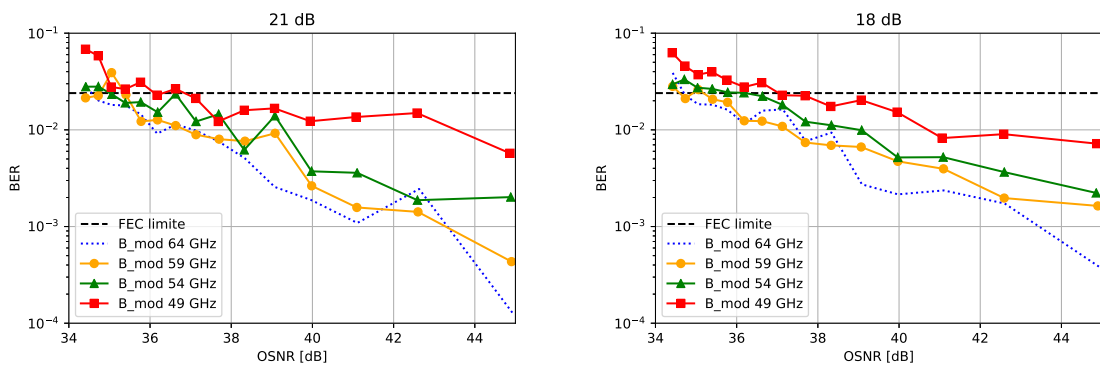
Resultados adicionais são apresentados na Figura 4.3(a), onde tem-se a BER em função da OSNR, considerando uma ER de 27 dB, variando-se a largura de banda do modulador (de 49 GHz a 64 GHz, com passo de 5 GHz), assim como nas Figuras 4.3(b), 4.3(c) e 4.3(d). Entretanto, nesses casos, as razões de extinção variaram para 24 dB, 21 dB e 18 dB, respectivamente. Ao analisá-las, verifica-se que, quanto menor a ER, maior é o valor da OSNR mínima requerida para o sistema. Isso se deve pela menor razão entre as potências de entrada e de saída do sinal, de forma que o ruído aditivo decorrente da amplificação se torna mais prejudicial.

Figura 4.3 – Resultados comparando o impacto da banda eletro-óptica do modulador no alcance de canais a 1 Tb/s com modulação 64-QAM.



(a) Impacto com 27 dB de razão de extinção.

(b) Impacto com 24 dB de razão de extinção.



(c) Impacto com 21 dB de razão de extinção.

(d) Impacto com 18 dB de razão de extinção.

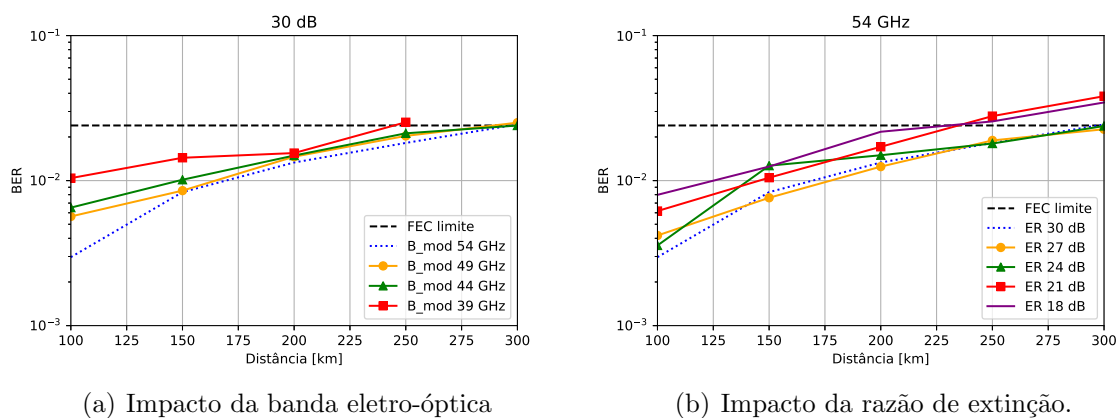
Fonte: Do próprio autor.

4.2.2 Modulação 256-QAM

Ilustra-se a BER em função da distância na Figura 4.4(a), considerando uma ER de 30 dB, variando-se a largura de banda do modulador (de 39 GHz a 54 GHz, com passo de 5 GHz). Observa-se um pequeno acréscimo nos valores da BER ao reduzir a largura de banda do modulador, bem como ao aumentar-se o comprimento do enlace. Observa-se que, para a curva de 39 GHz, o limite da FEC é atingido pouco antes dos 250 km, e que o ponto de 300 km não é representado no gráfico. Isso é devido à não convergência do simulador. Uma melhor convergência pode ser alcançada com o desenvolvimento de códigos de DSP mais robustos.

Ademais, na Figura 4.4(b) é ilustrado a BER em função da distância, considerando a largura de banda do modulador de 54 GHz, variando-se a ER (de 18 dB a 30 dB, com passo de 3 dB). Nota-se um maior impacto de tal parâmetro em comparação com a banda eletro-óptica do mesmo componente, o que permite que tais sistemas com capacidade de transmissão de 1 Tb/s de única portadora com esquema de modulação 256-QAM atinjam distâncias de propagação superiores à 250 km, apenas 1/3 da distância se comparado ao cenário resultante da Figura 4.2(b), na qual considerou-se modulação 64-QAM.

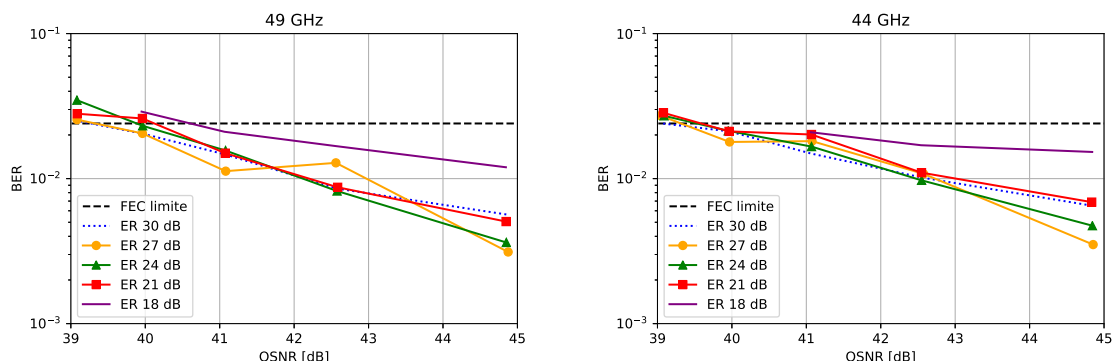
Figura 4.4 – Resultados comparando o impacto sistêmico de limitações no modulador eletro-óptico no alcance de canais a 1 Tb/s com modulação 256-QAM.



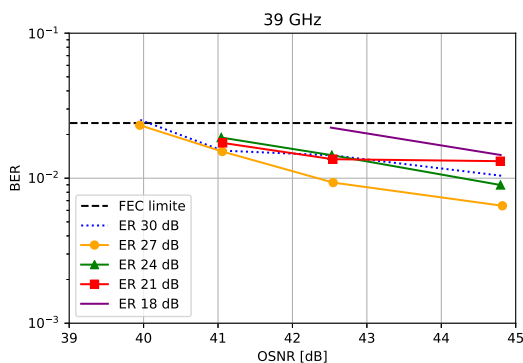
Fonte: Do próprio autor.

Por fim, na Figura 4.5(a) apresenta-se a BER em função da OSNR, considerando uma banda de 49 GHz, variando-se a ER (30 dB a 18 dB, com passo de 3 dB), assim como nas Figura 4.5(b) e Figura 4.5(c), entretanto as bandas variaram para 44 GHz e 39 GHz, respectivamente. Ao analisá-las, verifica-se que, quanto menor a banda, mais próximo do limite do FEC. É também possível verificar que na Figura 4.5(c) as curvas estão com menor quantidade de pontos, isso ocorre devido ao fato dos valores da BER estarem altos, o que demanda mais processamento de dados para convergência do sinal e, para isso, outros códigos de DSP são requeridos. Dada tal dificuldade de convergência, a análise de desempenho do sistema para tal esquema de modulação fica limitada.

Figura 4.5 – Resultados comparando o impacto da razão de extinção do modulador no alcance de canais a 1 Tb/s com modulação 256-QAM.



(a) Impacto com 49 GHz de banda do modulador. (b) Impacto com 44 GHz de banda do modulador.



(c) Impacto com 39 GHz de banda do modulador.

Fonte: Do próprio autor.

4.3 Considerações Finais

A partir do exposto, sistemas a taxas de 1 Tb/s com modulação 64-QAM têm alcance 3 vezes maior quando comparados aos de modulação 256-QAM. Isso ocorre devido à maior complexidade da constelação com maior número de símbolos, requerendo dispositivos eletro-ópticos com melhor desempenho, além de blocos de processamento digital dos sinais mais robustos.

5 Conclusão

Sistemas de alta capacidade se apresentam como uma das possíveis soluções para o cenário atual de vídeo sob demanda, armazenamento na nuvem e desenvolvimento de inteligência artificial em dispositivos remotos [16]. Por isso, a análise da sua aplicabilidade é relevante para atender tal demanda, sendo, portanto, objeto de estudo do presente trabalho.

Ao considerar sistemas de recepção coerente, há na estrutura atual esquemas de modulação de menor ordem, tal como 16-QAM. Quando comparado a esquemas de maior ordem, como o 64-QAM e/ou 256-QAM, apresenta menor complexidade de transmissão e recepção, mas perde em eficiência espectral devido ao tamanho da constelação, e por consequência, o número de bits transmitido por símbolo de constelação [30, 31]. Entretanto, quando comparados aos sistemas de modulações complexas, ainda são vantajosos pela ótica dos donos da infraestrutura por apresentar menores custos de manutenção e operação [32]. Porém, seus sucessores estão em constante desenvolvimento para entregarem desempenho e baixo custo comparável aos instalados [16]. Todavia, sua instalação em larga escala ainda apresenta desafios, uma vez que demandam a troca dos dispositivos já bem estabelecidos, o que gera despesas desestimulantes para os proprietários da rede [33]. Entretanto, a curto/médio prazo, a alta demanda deverá melhorar sua relação custo-benefício, incentivando a transição para esquemas mais complexos que permitem maiores taxas [34, 35].

Assim, para apresentar um possível esquema de transmissão que atenda à reivindicação por altas taxas e confiabilidade sistêmica, esse estudo foi realizado. Para tanto, realizou-se busca no atual estado da arte acerca dos cenários existentes que vislumbram solucionar tal exigência, buscando evoluir tal matéria com simulações computacionais em código próprio. O estudo do desempenho de sistemas de alta capacidade obteve resultados significativos quanto a taxa de 1 Tb/s com única portadora a 1550 nm, sendo mantida essa taxa para transmissão ao longo de 750 km com esquema de modulação 64-QAM. E, para cenários de curto alcance, 250 km, com esquema de modulação 256-QAM. Observou-se o impacto dos parâmetros do modulador, ER e banda eletro-óptica, como expressivos no desempenho sistêmico.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- 1 Implementar algoritmos mais robustos de DSP no simulador que possam permitir maior convergência das simulações;
- 2 Investigar a transmissão a altas taxas com diferentes formatos de modulação, além

de utilizar constelações não uniformes;

- 3 Estudar o sistema de alta capacidade em banda estendida, utilizando as bandas S e L.

5.2 Publicações

- 1 C. Mineto, T. Sutili, L. S. Schanner e H. A. Pereira. "Análise Sistêmica do Impacto de Limitações do Modulador em Transmissões Ópticas a 1 Tb/s". Aceito para *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBrT*.

Referências

- [1] Tyndall's Historical Experiment. Industrial Fiber Optics. Acessado em: 7 de abril de 2020. [Online]. Available: https://i-fiberoptics.com/pdf/12_0120-if_514.pdf
- [2] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics, 2a Ed., McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics, ISBN: 0-07-100785-7, 1983.
- [3] M. J. O'Mahony, C. Politi, D. Klionidis, R. Nejabati, and D. Simeonidou, "Future Optical Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4684–4696, 2006.
- [4] R. C. Figueiredo, A. Felipe, A. L. N. Souza, E. S. Rosa, F. D. Simões, F. L. Della Lucia, G. C. C. P. Simões, G. B. Farias, H. A. de Andrade, J. Hélio da Cruz, T. Sutili, Y. R. R. Bustamante, and S. M. Rossi, "Advances and Perspectives Towards Tb/s Optical Transmission : (Invited Paper)," in *SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*, 2019, pp. 1–6.
- [5] R. Ramaswami, K. Sivarajan, and G. Sasaki, *Optical networks: A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 3a Ed., Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, ISBN: 978-0-12-374092-2, 2010.
- [6] J. D. Downie, M. Li, and S. Makovejs, "Optical Fibers for Flexible Networks and Systems [Invited]," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 7, pp. A1–A11, 2016.
- [7] B. Ainslie, K. Beales, C. Day, and J. Rush, "The design and fabrication of monomode optical fiber," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, no. 4, pp. 514–523, 1982.
- [8] 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, Setembro 2010.
- [9] Q. Chang, J. Gao, Q. Li, and Y. Su, "Simultaneous transmission of point-to-point data and selective delivery of video services in a WDM-PON using ASK/SCM modulation format," in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2008, p. OWH2.
- [10] F. Klejs, E. P. Da Silva, M. Lillieholm, M. P. Yankov, T. Morioka, L. K. Oxenlewe, and M. Galili, "Spectrally Efficient DP-1024QAM 640 Gb/s Long Haul Transmis-

- sion using a Frequency Comb,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2020, pp. 1–3.
- [11] D. Botez and G. J. Herskowitz, “Components for optical communications systems: A review,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 68, no. 6, pp. 689–731, 1980.
- [12] What are the Basic Elements of a Fiber Optic Communication System? Elprocus. Acessado em: 14 de julho de 2020. [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/basic-elements-of-fiber-optic-communication-system-and-its-working/>
- [13] G. D. AGRAWAL, “Fiber-Optic Communication Systems,” 3a Ed., A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, ISBN:0-471-22114-7, 2002.
- [14] S. Jain, L. Singh, S. Rajput, and M. Kumar, “Low Group Index Optical Slot Structure for Efficient Optical Modulation,” in *CLEO: Applications and Technology*. Optical Society of America, 2020, pp. JTu2A–26.
- [15] D. Turan, N. T. Yardimci, P.-K. Lu, and M. Jarrahi, “Telecommunication-Compatible Bias-Free Photoconductive Source with a 5 THz Radiation Bandwidth,” in *CLEO: Applications and Technology*. Optical Society of America, 2020.
- [16] Q. Hu, D. Che, Y. Wang, and W. Shieh, “Advanced modulation formats for high-performance short-reach optical interconnects,” *Optics express*, vol. 23, no. 3, pp. 3245–3259, 2015.
- [17] M. Khanal, C. J. Chae, and R. S. Tucker, “Selective broadcasting of digital video signals over a WDM passive optical network,” *IEEE photonics technology letters*, vol. 17, no. 9, pp. 1992–1994, 2005.
- [18] D. Rusdiyanto, F. F. Adli, N. Mahmudah, C. Apriono, and F. Y. Zulkiffi, “Design of Point-to-Point Optical Fiber for Digital Video Broadcasting Television in Jakarta,” in *International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, 2019, pp. 644–647.
- [19] S. S. Wagner and H. L. Lemberg, “Technology and system issues for the WDM-based fiber loop architecture,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, no. 11, pp. 1759–1768, 1989.
- [20] P. P. Iannone, K. C. Reichmann, and N. J. Frigo, “High-speed point-to-point and multiple broadcast services delivered over a WDM passive optical network,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 9, pp. 1328–1330, 1998.
- [21] Y. Huang, Y. Wang, L. Zhang, Y. Shao, F. Zhang, C. Liao, and Y. Wang, “Tunable Electro-Optical Modulator Based on a Photonic Crystal Fiber Selectively Filled With Liquid Crystal,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 9, pp. 1903–1908, 2019.

- [22] M. Seimetz, *High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission*. Springer, ISBN 978-3-540-93770-8, 2009, vol. 143.
- [23] J. Zhou, J. Wang, L. Zhu, Q. Zhang, and J. Hong, “Silicon Photonics Carrier Depletion Modulators Capable of 85GBaud 16QAM and 64GBaud 64QAM,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2019, pp. 1–3.
- [24] W. Shi, J. Lin, H. Sepehrian, S. Zhalehpour, Z. Zhang, and L. A. Rusch, “Silicon Photonic Modulators for High-Capacity Coherent Transmissions,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2019, pp. 1–3.
- [25] A. V. Tronev, I. V. Ilichev, P. M. Agruzov, M. V. Parfenov, L. V. Shamray, and A. V. Shamray, “Extinction Ratio Improvement of Lithium Niobate Modulators for Quantum Communication Systems,” in *International Conference Laser Optics (ICLO)*, 2018, pp. 438–438.
- [26] P. O. Weigel, J. Zhao, K. Fang, H. Al-Rubaye, D. Trotter, D. Hood, J. Mudrick, C. Dallo, A. T. Pomerene, A. L. Starbuck *et al.*, “Bonded thin film lithium niobate modulator on a silicon photonics platform exceeding 100 GHz 3-dB electrical modulation bandwidth,” *Optics express*, vol. 26, no. 18, pp. 23 728–23 739, 2018.
- [27] N. S. André, H. Louchet, V. Filsinger, E. Hansen, and A. Richter, “OFDM and PAM comparison using a high baudrate low resolution IM/DD interface for 400G Ethernet access,” *Optics express*, vol. 24, no. 11, pp. 11 926–11 931, 2016.
- [28] M. H. Eiselt, N. Eiselt, and A. Dochhan, “Direct detection solutions for 100G and beyond,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2017, pp. Tu3I–3.
- [29] E. P. da Silva, M. P. Yankov, F. Da Ros, S. Forchhammer, M. Galili, L. K. Oxenlowe, and D. Zibar, “Experimental Comparison of Gains in Achievable Information Rates from Probabilistic Shaping and Digital Backpropagation for DP-256QAM/1024QAM WDM,” in *European Conference on Optical Communication (ECOC)*. VDE, 2016, pp. 1–3.
- [30] M. Y. Sowailam, T. M. Hoang, M. Morsy-Osman, M. Chagnon, M. Qiu, S. Paquet, C. Paquet, I. Woods, Q. Zhuge, O. Liboiron-Ladouceur *et al.*, “770-Gb/s PDM-32QAM Coherent Transmission Using InP Dual Polarization IQ Modulator,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 5, pp. 442–445, 2017.
- [31] G. Raybon, A. Adamiecki, P. J. Winzer, S. Randel, L. Salamanca, A. Konczykowska, F. Jorge, J.-Y. Dupuy, L. L. Buhl, S. Chandrashekar *et al.*, “High Symbol Rate Coherent Optical Transmission Systems: 80 and 107 GBaud,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 824–831, 2013.

-
- [32] C. Sun, D. Che, H. Ji, and W. Shieh, “Study of chromatic dispersion impacts on kramers–kronig and ssbi iterative cancellation receiver,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 4, pp. 303–306, 2019.
- [33] M. Cantono, R. Schmogrow, M. Newland, V. Vusirikala, and T. Hofmeister, “Opportunities and challenges of C+ L transmission systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1050–1060, 2019.
- [34] C. Mineto, T. Sutili, L. Silva Schanner, and H. A. Pereira, “Análise Sistêmica do Impacto de Limitações do Modulador em Transmissões Ópticas a 1 Tb/s,” in *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT*, Florianópolis, Brazil, novembro 2020.
- [35] I. Kim, X. Wang, O. Vassilieva, P. Palacharla, and T. Ikeuchi, “SNR-availability Based Provisioning for Optical Networks Employing Fine Tunable Modulation Technologies,” in *OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*. IEEE, 2019, pp. 1–3.