



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

Carine Mineto

Estágio na Fundação CPQD - Centro de Pesquisa e
Desenvolvimento em Telecomunicações

Campina Grande, PB
25 de setembro de 2020.

Carine Mineto

Estágio na Fundação CPQD - Centro de Pesquisa e
Desenvolvimento em Telecomunicações

*Relatório de Estágio Integrado 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.

Supervisor:

Tiago Sutili, Dr.

Campina Grande, PB
25 de setembro de 2020.

Carine Mineto

Estágio na Fundação CPQD - Centro de Pesquisa e
Desenvolvimento em Telecomunicações

*Relatório de Estágio Integrado 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

Agradeço ao Tiago, meu supervisor do estágio, por ter tido muita paciência comigo, e ter me ajudado com todas as dúvidas que surgiram, além de todo o acompanhamento durante esse tempo no CPQD. Também ao pessoal da equipe de comunicações ópticas por todo o acolhimento.

Ao professor Helder, pela sua orientação desde o começo da graduação, e também no trabalho de conclusão de curso, além do estágio.

À toda a minha família por me apoiar e entender que, mesmo estando em casa, precisava me dedicar às atividades do estágio.

Resumo

Este relatório descreve as atividades realizadas ao longo do estágio na Divisão de Tecnologias Ópticas da Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD), com duração de Março de 2020 a Agosto de 2020. Essas atividades estão inseridas no âmbito dos projetos de pesquisa e desenvolvimento do CPQD. O foco deste trabalho foi a análise do desempenho sistêmico de um enlace óptico de alta capacidade, a partir do comportamento de componentes integrantes do bloco transmissor. Esse estudo verificou a factibilidade de um sistema óptico de comunicação baseado em canais com uma taxa de transmissão de 1 Tb/s com o esquema de modulação 64-QAM, ao longo de 750 km e, mantendo a mesma taxa, para 256-QAM, um alcance de 250 km. Os resultados foram obtidos via simulação na linguagem Python na plataforma *online* Colab.

Palavras-Chave: Alta capacidade, Colab, CPQD, Python, Sistema Óptico de Transmissão, Simulação, Taxa de Transmissão de Bit, 64-QAM, 256-QAM.

Abstract

This report describes the activities carried out during the internship at the Optical Technologies Division of the Fundation Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD), from March 2020 to August 2020. These activities are part of the research projects and development of CPQD. The focus of this work was the analysis of the systemic performance of a high capacity optical link, based on the behavior of components that are part of the transmitter block. This study verified the feasibility of an optical communication system based on channels with a transmission rate of 1 Tb/s with the 64-QAM modulation scheme over 750 km and, maintaining the same rate, for 256-QAM, for 250 km. The results were obtained via simulation in Python on the platform *online* Colab.

Keywords: Bit Transmission Rate, Colab, CPQD, High capacity, Optical Transmission System, Python, Simulation, 64-QAM, 256-QAM.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Cenário para validação do Simulador em Python.	16
Figura 2.2 – Comparativo entre as BERs resultantes da simulação em Octave e Python.	18
Figura 2.3 – Diagrama de blocos do cenário de simulação considerando a fibra. . . .	19
Figura 2.4 – Impacto sistêmico dos efeitos deletérios do modulador conforme esquema de modulação utilizado.	20

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Parâmetros empregados nas simulações sistêmicas.	17
---	----

Lista de Siglas

- ADC – *Analog-to-Digital Converter* conversor analógico-digital
- BER – *Bit Error Rate* taxa de erro por bit
- BPS – *Blind Phase Search* busca cega de fase
- CD – *Chromatic Dispersion* dispersão cromática
- CMA – *Constant Modulus Algorithm* algoritmo de módulo constante
- DAC – *Digital-to-Analog Converter* conversor digital-analógico
- DD – *Direct Detection* detecção direta
- DML – *Directly Modulated Laser* laser diretamente modulado
- DMT – *Discrete Multi-Tone* multi-tons discretos
- DSP – *Digital Signal Processing* processamento digital de sinais
- EAM – *Electro-Absorption Modulator* modulador de eletro-absorção
- EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifier* amplificador a fibra dopada com érbio
- EML – *Externally Modulated Laser* laser modulado externamente
- ER – *Extinction Ratio* razão de extinção
- FEC – *Forward Error Correction* códigos corretores de erro
- IQM – *In-Phase and Quadrature Modulator* modulador em fase e quadratura
- KKD – *Kramers-Kroning Detector* detector de Kramers-Kroning
- MZM – *Mach-Zehnder Modulator* modulador de Mach-Zehnder
- OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio* relação sinal-ruído óptica
- PAM – *Pulse Amplitude Modulation* modulação de amplitude de pulso
- 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

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CPQD	11
1.2	Objetivos do Estágio	11
1.3	Organização do Relatório	12
2	ATIVIDADES REALIZADAS	13
2.1	Revisão Bibliográfica	14
2.2	Simulador Computacional em Python	15
2.2.1	Análise do Impacto de Efeitos Deletérios	17
2.3	Atividades Complementares	19
3	CONCLUSÃO	21
	REFERÊNCIAS	22

1 Introdução

1.1 CPQD

Criado em 1976 como Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebras, com a missão de dar suporte às políticas públicas na área de telecomunicações, o CPQD tornou-se uma fundação de direito privado em 1998, com a privatização desse setor. Desde então, ampliou seu foco inovador para outros segmentos, tais como telecomunicações, agronegócio, financeiro, *utilities*, indústrias, cidades, varejo e serviços, defesa e segurança. Esses segmentos são beneficiados por um programa de pesquisa e desenvolvimento que, atualmente, é o maior da América Latina na área de tecnologia da informação e comunicação [1].

A fundação está estruturada por um conjunto de plataformas tecnológicas, as quais agregam todo o conhecimento adquirido no escopo dos projetos desenvolvidos: computação cognitiva, computação avançada, comunicações ópticas, comunicações sem fio, redes de dados, sensoriamento, segurança da informação e comunicação, sistemas de energia e sistemas eletrônicos embarcados. Mantém as pesquisas com recursos próprios e também com o apoio de fundos de fomento e diversos outros mecanismos de incentivo à ciência, tecnologia e inovação, além de realizar projetos juntamente com a iniciativa privada [1].

O CPQD contribui para a sociedade com tecnologias de produtos, sistemas, consultorias, fornecimento de capital intelectual e pesquisas. Com foco na experiência do usuário, na reinvenção do negócio, na excelência operacional, na segurança e conformidade, gera soluções que aceleram a geração de valor no processo de transformação digital [1].

Antecipar-se às necessidades da sociedade da informação faz parte do papel de vanguarda tecnológica que o CPQD tem exercido ao longo da sua existência [1].

1.2 Objetivos do Estágio

- Fazer revisão bibliográfica visando aprofundamento teórico sobre sistemas ópticos de transmissão de alta capacidade;
- Usar simulador computacional em Python para modelagem de um sistema óptico de alta capacidade;
- Analisar o impacto de efeitos deletérios no desempenho sistêmico de enlace óptico de alta capacidade;
- Obter familiaridade com equipamentos e montagens experimentais em ambiente laboratorial de sistemas ópticos ponto-a-ponto.

1.3 Organização do Relatório

Neste relatório é apresentado no Capítulo 2 as atividades desenvolvidas ao longo do estágio, tais como treinamentos, revisão bibliográfica, validação de simulador computacional, otimização de sistemas ópticos e atividades complementares. Por fim, no Capítulo 3 é realizada uma ponderação sobre os estudos efetuados e sobre os resultados obtidos.

2 Atividades Realizadas

Devido ao fato das simulações, ao longo do estágio, terem sido desenvolvidas na linguagem Python, inicialmente foram feitos cursos de introdução à linguagem Python [2, 3, 4], visando uma maior familiarização com a linguagem de modo a facilitar a realização dessas atividades.

Ao longo do estágio, houveram treinamentos internos sobre comunicações ópticas, para apresentar o funcionamento detalhado dos equipamentos presentes no laboratório da instituição, para que no momento das montagens laboratoriais houvesse uma melhor compreensão dos resultados obtidos, ou até mesmo adversidades que precisassem ser contornadas. Entretanto, as montagens laboratoriais não puderam ser feitas devido o estágio ter ocorrido em *home-office*, mas os treinamentos continuaram para possíveis posteriores necessidades.

Além disso, houveram oficinas de desenvolvimento com o intuito de integrar o estagiário na empresa, bem como o aperfeiçoamento e qualificação dos estudantes.

Participou-se do congresso sobre Lasers e Electro-Óptica, que teve a programação focada no mercado. Foi possível aprender sobre avanços inovadores, pesquisa e novas tecnologias da indústria da ciência do laser com foco nas comunicações ópticas. Essa conferência reuniu vários aspectos das tecnologias eletro-ópticas [5].

Assim como do congresso sobre Fotônica Avançada [6] que abordou avanços em materiais com ganho óptico, materiais ópticos não lineares, novos vidros ópticos e cristais e cerâmicas, últimos avanços em interconexões ópticas, tecnologias de comutação, processamento de sinais, diodos emissores de luz e virtualização de rede, que foram os tópicos de interesse do congresso.

Além do *Webinar* sobre Medições de integridade de Sinal e Análise de Rede [7], que abordou brevemente os fundamentos da linha de transmissão e, nas maneiras práticas de solucionar problemas e melhorar os componentes da camada física dentro da infraestrutura da Internet, por meio dos parâmetros S diferenciais, como a conversão de modo se relaciona com o *crosstalk* e métodos práticos de desincorporação para aumentar a precisão. Bem como, uma demonstração de estudo de caso de projeto de *backplane* usando um analisador de rede vetorial multi-porta.

Por fim, complementarmente, do Curso de *Machine Learning*: introdução à classificação com SKLearn [8], com o intuito de posteriormente implementar essa tecnologia no simulador para otimizar o processo de previsão do comportamento de sistemas ópticos.

2.1 Revisão Bibliográfica

Sistemas de alta capacidade são caracterizados por altas taxas de transmissão e, para que sejam alcançadas, tecnologias robustas são aplicadas [9]. A fibra óptica como meio de transmissão permite essa situação, acompanhada de processamento digital de sinais (DSP – *Digital Signal Processing*), formatos de modulação de alta complexidade, dentre outras tecnologias [10].

Sabendo-se da necessidade por atender a demanda por altas taxas de transmissão nos sistemas atuais, estudou-se a respeito da modulação em fase e amplitude para recepção coerente clássica e auto-homódina para os seguintes cenários: (1) transmissão de longa distância; (2) transmissão metropolitana; (3) interconexão de *Data Centers*; (4) intraconexão de *Data Centers*. Analisou-se também as taxas de transmissão de bit propostas para modulação em intensidade com detecção direta para cenários de: (5) interconexão de *data centers* e (6) intraconexão entre *data centers*. Tendo em vista ambos os modos de recepção, verificou-se algumas possibilidades para sua ação efetiva nessa demanda, tal como aumento na taxa de símbolos, o emprego de formatos de modulação avançada de ordem superior e uso de supercanais.

Para o Cenário 1, na recepção coerente clássica, os esquemas de modulação comumente empregados são o 16-QAM e QPSK, pelo fato de formatos de maior ordem serem mais sensíveis aos ruídos inseridos pelo transmissor que acaba influenciando no alcance do sistema pela redução no valor da OSNR [11, 12]. Enquanto, a recepção auto-homódina de banda lateral única é uma candidata para essa demanda por dispor da possibilidade de atuar com formatos de modulação de alta ordem e conseguir compensar eletronicamente a dispersão cromática da fibra [13].

Em cenários de transmissão metropolitana, (Cenário 2), a recepção coerente clássica já apresenta taxas de bits por subportadoras superiores a 1000 Gb/s e, sua tecnologia de amplificação se concentra no amplificador a fibra dopada com érbio (EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifier*) [14, 15]. Para o mesmo cenário com recepção auto-homódina, o equipamento que se destaca é o detector de Kramers-Kroning (KKD – *Kramers-Kroning Detector*), por permitir a utilização de menos componentes. Entretanto esse dispositivo requer uma alta taxa de amostragem no DSP devido à recuperação de fase do sinal pela sua informação de intensidade. Ainda assim, esses sistemas apresentam taxas de bits por subportadoras em torno de 112 Gb/s a 450 Gb/s [16, 17].

Quanto às interconexões entre *Data Centers*, (Cenário 3), com recepção auto-homódina, sua capacidade total de transmissão tem uma faixa larga indo de 480 Gb/s a 2550 Gb/s, bem como os formatos de modulação que podem ser 16-QAM, 32-QAM ou 64-QAM, além de diferentes técnicas no DSP de recepção como o KKD, a compensação da dispersão cromática (CD – *Chromatic Dispersion*), filtro passa faixa [18, 19, 20]. Já a recepção coerente clássica nesse cenário destaca-se pelas altas taxas, tais como 150,3 Tb/s e 44 Tb/s.

Entretanto esses bits são transmitidos em várias subportadoras que possuem taxas de bits de 630 Gb/s e 384 Gb/s, respectivamente. Todavia, como é necessário um número maior de subportadoras, é utilizado a extensão da banda C, transmitindo também na banda L e S, com formatos de modulação de alta ordem como 128-QAM e 256-QAM [21, 22].

Ao levar em conta a recepção coerente clássica para intraconexão em *Data Centers*, (Cenário 4), as taxas de bits totais alcançadas se concentram em valores por volta de 400 Gb/s com esquemas de modulação similares ao Cenário 1 [23, 24].

Verificando-se os cenários para (5), percebe-se o uso de laser diretamente modulado (DML – *Directly Modulated Laser*), além dos usuais modulador de Mach-Zehnder (MZM – *Mach-Zehnder Modulator*) e IQM. Ao aplicar o DML foi possível usar um esquema de modulação de alta ordem, 512-QAM, mas também o simplista 4-PAM, com taxas de 31,5 Gb/s e 320 Gb/s, respectivamente [25, 26]. Com o MZM e 256-QAM atingiu-se 554 Gb/s, já com o IQM e 4-PAM a taxa foi de 240 Gb/s [27, 28]. Por outro lado, no cenário (6), além da modulação de amplitude de pulso (PAM – *Pulse Amplitude Modulation*) é possível também usar o multi-tons discretos (DMT – *Discrete Multi-Tone*) e o 16-QAM e, obter capacidades de 560 Gb/s com um MZM e 608 Gb/s com quatro modulador de eletro-absorção (EAM – *Electro-Absorption Modulator*), respectivamente [29, 30]. Assim como, ao aplicar 8-PAM com um laser modulado externamente (EML – *Externally Modulated Laser*) a capacidade total de taxa de bits foi 318 Gb/s [31].

2.2 Simulador Computacional em Python

Com o intuito de analisar o funcionamento de sistemas ópticos de alta capacidade de transmissão de dados, um simulador computacional foi desenvolvido para posteriormente serem feitas montagens laboratoriais que validarão os resultados obtidos e, eventualmente, transferir as tecnologias desenvolvidas para a iniciativa privada.

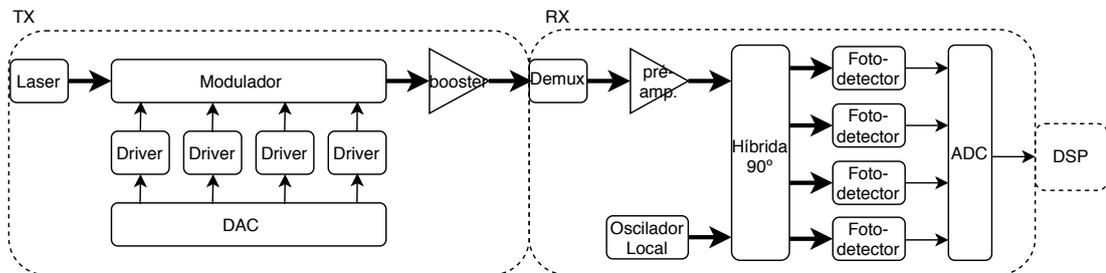
Inicialmente, o simulador foi desenvolvido para a plataforma Octave. Entretanto, o elevado tempo de simulação para cenários simples, que consideram a transmissão pela fibra óptica, a qual é descrita por equações matemáticas complexas que demandam um alto processamento computacional, foi o fator determinante para a mudança de linguagem/plataforma. Com a adaptação para a linguagem Python, tornou-se possível a execução dos cenários de simulação propostos na nuvem com alto nível de paralelização, um exemplo é o servidor da Google [32] que oferece acelerador de *hardware*, permitindo reduzir em até 50 vezes o tempo de execução.

Todavia, como houve a mudança de linguagem, foi necessário validar o simulador devido à transição manual dos códigos entre plataformas. Para isso foram executados os mesmos cenários, descritos na Figura 2.1, em ambas as plataformas e os resultados comparados. Foram avaliados os valores da taxa de erro por bit (BER – *Bit Error Rate*) em função da relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*). As compa-

rações podem ser verificadas a partir da Figura 2.2, sendo as curvas identificadas com M os resultados do Octave e P do Python.

Na Figura 2.1 é representado o cenário simulado em que não foi considerada a transmissão pela fibra, mas sim a conexão direta entre transmissor e receptor (b2b – *back-to-back*), permitindo analisar o impacto dos dispositivos do sistema com maior detalhes. No transmissor, utiliza-se laser, gerador da portadora óptica; modulador em fase e quadratura (IQM – *In-Phase and Quadrature Modulator*), que insere as informações transmitidas na portadora; *drivers*, que amplificam os sinais elétricos modulantes; conversor digital-analógico (DAC – *Digital-to-Analog Converter*), que gera os sinais analógicos modulantes a partir da sequência de bits a ser transmitida e; o *booster*, amplificador óptico de potência que aumenta a potência do sinal lançado. 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*). A recuperação das informações transmitidas é realizada através de algoritmos de DSP adequados, como por exemplo, conforme a taxa de símbolos ou o formato de modulação utilizado há a necessidade de substituir os algoritmos de equalização do algoritmo de módulo constante (CMA – *Constant Modulus Algorithm*) para o equalizador direcionado ao raio (RDE – *Radially Directed Equalizer*) [33].

Figura 2.1 – Cenário para validação do Simulador em Python.



Outrossim, para as simulações de validação do simulador em Python, algumas características sistêmicas foram consideradas, tais como segue na Tabela 2.1, em que r_{off} define o formato do pulso óptico no domínio do tempo, tal que 0 terá o comportamento de uma *sinc* e 1 de uma onda quadrada. O parâmetro razão de extinção (ER – *Extinction Ratio*) do modulador é a razão entre a potência de portadora óptica na saída do modulador em máxima e mínima transmitância [34].

Assim, ao verificar o comportamento das curvas nas Figuras 2.2(a), 2.2(b), 2.2(c), 2.2(d) e 2.2(e), foi possível concluir que as respostas do simulador na linguagem Python se mantiveram próximas à Octave, sendo assim validado para posteriores simulações.

Comparar com precisão o custo computacional entre as plataformas Octave e Python se torna injusto, devido à diferença de *hardwares* disponíveis, já que os códigos do Octave eram executados nas próprias máquinas do CPQD, sem aceleradores de *hardware*, dife-

Tabela 2.1 – Parâmetros empregados nas simulações sistêmicas.

Parâmetro	Símbolo	64-QAM	256-QAM
Fator de <i>Roll-off</i> do Pulso de Nyquist	r_{off}	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)

Fonte: Do próprio autor.

rentemente do Google Colab que dispõe de um alto nível de paralelização na execução das simulações.

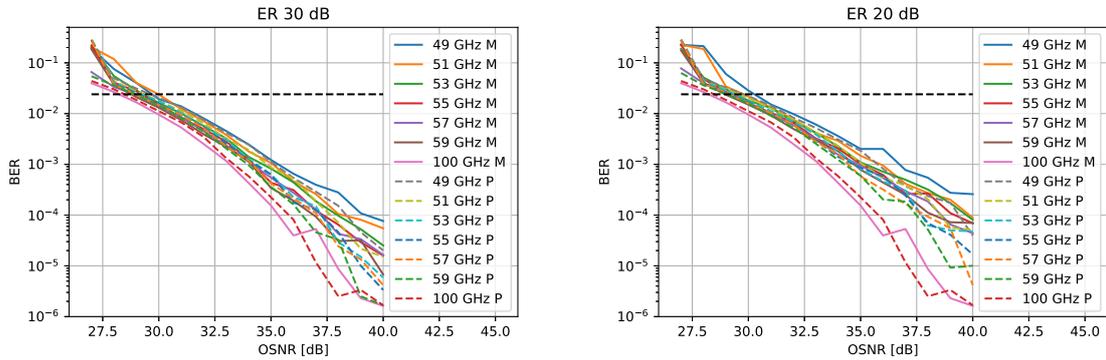
2.2.1 Análise do Impacto de Efeitos Deletérios

Após a validação do simulador e busca na literatura por trabalhos similares, foi possível realizar análises para sistemas de alta capacidade, que aplicam tecnologias similares ou até inovadoras, para se obter resultados que permitam melhorias nos sistemas ópticos de transmissão instalados.

A partir de cenários que consideram até mesmo a passagem da luz pela fibra, não só um cenário *back-to-back*, é possível extrapolar-se as características e limitações de tais sistemas em cenários de maior complexidade. Sendo assim, considerou-se na simulação a inserção do enlace óptico, analisando o comportamento por meio dos valores da taxa de erro por bit e o alcance da transmissão. Na Figura 2.3 é possível verificar o diagrama de blocos do cenário implementado. Em relação à Figura 2.1, a Figura 2.3 apresenta o enlace óptico, composto pela combinação de n trechos (*spans*) de 50 km de fibra monomodo padrão (SSMF – *Standard Single Mode Fiber*) e amplificadores de linha, bem como o bloco do DSP mais detalhado, no qual o sinal digital do ADC é ortonormalizado, então, é compensada a CD causada pela fibra para passar no RDE e, por fim, a busca cega de fase (BPS – *Blind Phase Search*) nesse sinal para compensar uma possível distorção do raio. Nas simulações, o modelo considerado foi o EDFA.

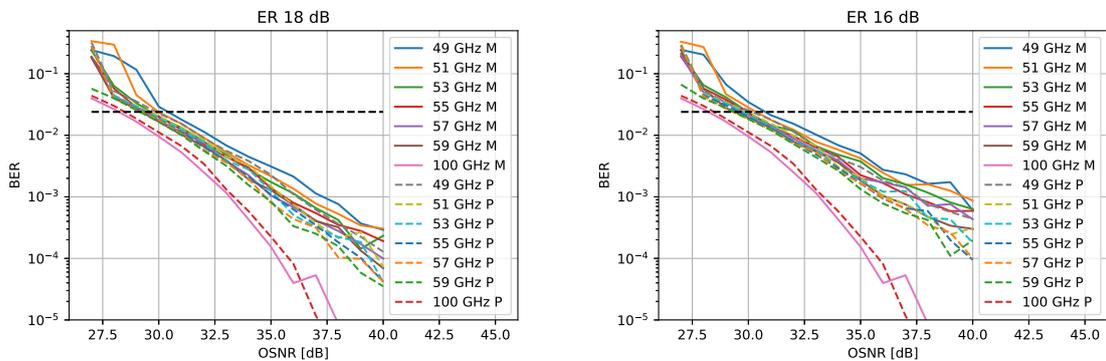
Para tal diagrama, foram implementados diferentes cenários em que se considerou dois formatos de modulação distintos. Houveram parâmetros sistêmicos que precisaram

Figura 2.2 – Comparativo entre as BERs resultantes da simulação em Octave e Python.



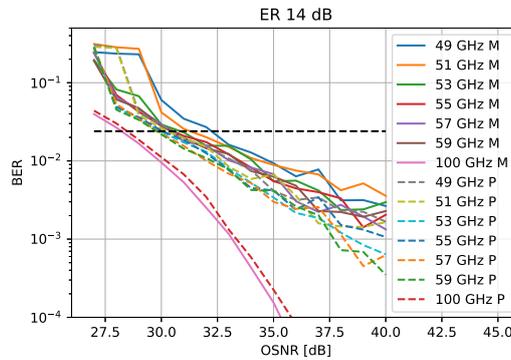
(a) Razão de Extinção de 30 dB.

(b) Razão de Extinção de 20 dB.



(c) Razão de Extinção de 18 dB.

(d) Razão de Extinção de 16 dB.

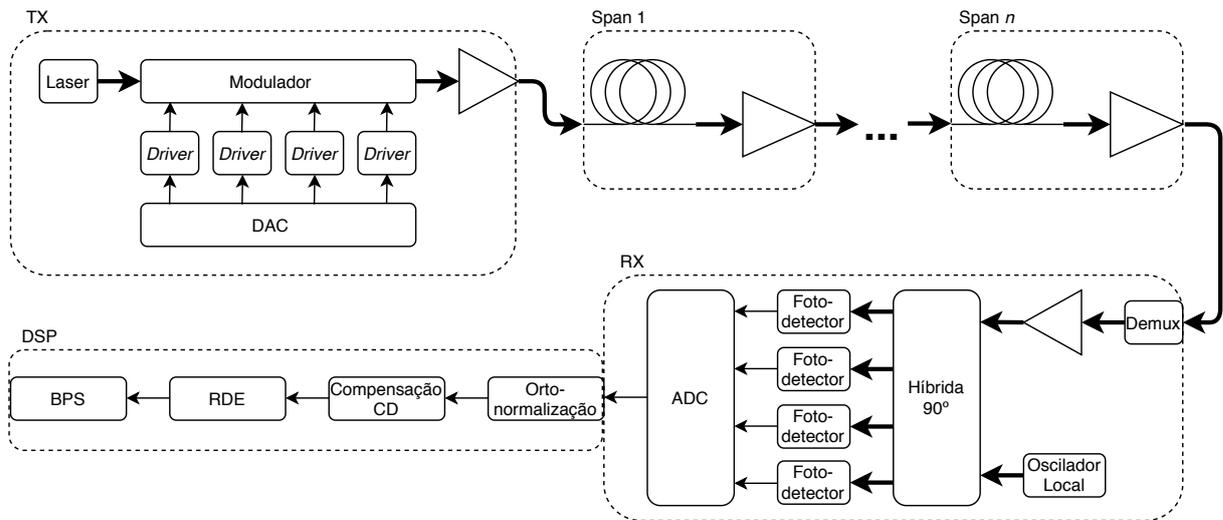


(e) Razão de Extinção de 14 dB.

ser ajustados para se adequarem ao comportamento requerido pelo formato de modulação. Tais implementações resultaram nas curvas da Figura 2.4.

Dessa forma, por meio das curvas da Figura 2.4, percebe-se o maior alcance para o esquema de modulação 64-QAM. Esse menor alcance em 256-QAM é devido ao maior número de símbolos na constelação que demanda uma robustez maior nos dispositivos de recuperação do sinal.

Figura 2.3 – Diagrama de blocos do cenário de simulação considerando a fibra.

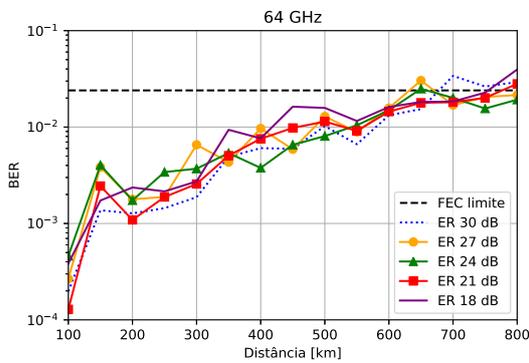


2.3 Atividades Complementares

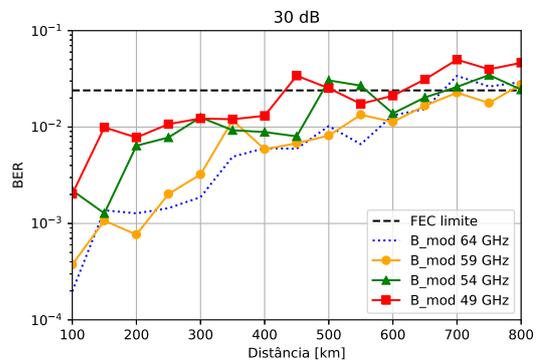
Além das atividades propostas no plano de estágio, realizou-se estudos sobre amplificação em banda estendida. Essa tecnologia está em desenvolvimento devido ao contínuo aumento na demanda por transmissão de dados, e o limitado espectro disponível na banda convencional (C). Assim, busca-se transmitir canais também nas bandas longa (L) e curta (S), que são adjacentes à banda C [35, 36]. Enquanto a banda C suporta 116 canais em uma faixa de frequência de 4,36 THz, a capacidade da banda L é 126 canais em 4,73 THz e da banda S é 134 canais e 5,04 THz [37]. Entretanto, para fazer essa extensão, é necessário fazer algumas considerações quanto ao sistema, tal como a dopagem da fibra que é dependente da banda, devido ao perfil de ganho do laser de bombeio na banda desejada, por exemplo na banda S o elemento de dopagem é o túlio diferente da banda C que é o érbio [38, 39].

Outra consideração, que precisa ser feita ao optar por essa tecnologia, são os equipamentos que em sua grande maioria são desenvolvidos para a banda C, o que ocasiona perdas consideráveis ao usá-los em outras bandas. Entretanto os equipamentos desenvolvidos para a junção dessa tecnologia ainda acrescentam altas perdas, como, por exemplo, o divisor de banda que acrescenta 1 dB de perdas no sistema [40]. Sendo assim, uma tecnologia promissora mas que ainda carece de aprofundados estudos para sua consolidação comercial.

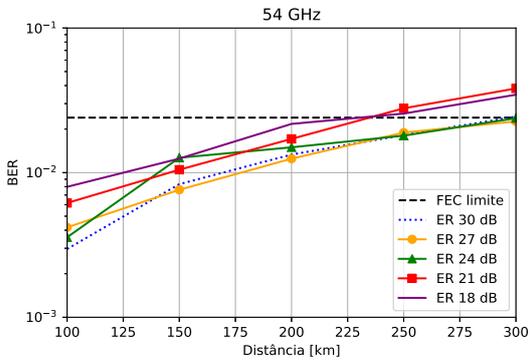
Figura 2.4 – Impacto sistêmico dos efeitos deletérios do modulador conforme esquema de modulação utilizado.



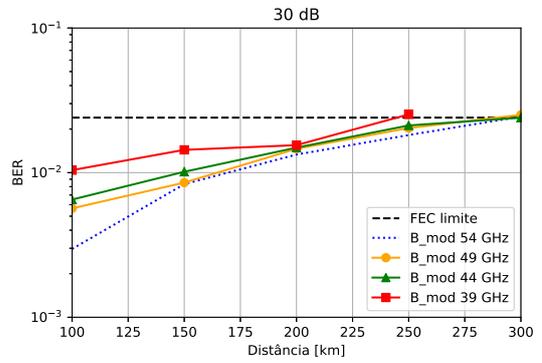
(a) Impacto da banda eletro-óptica para 64-QAM.



(b) Impacto da razão de extinção para 64-QAM.



(c) Impacto da banda eletro-óptica para 256-QAM.



(d) Impacto da razão de extinção para 256-QAM.

3 Conclusão

O estágio, que teve início em 17 de março e se prolongou até dia 24 de agosto de 2020, teve seu planejamento afetado devido ao atual cenário pandêmico, tal que as atividades laboratoriais não puderam ser desenvolvidas pelo fato do estágio ter acontecido em *home-office*. Todavia, as demais atividades foram realizadas, tais como a revisão bibliográfica apresentada na Seção 2.1, que possibilitou propor cenários de simulação que contribuíssem com o atual estado da arte. O uso do simulador computacional, que inicialmente requereu estudos para familiarização com a linguagem Python, e que posteriormente decorreu na validação do simulador, conforme a Seção 2.2, em que foi feita a comparação entre os resultados obtidos em plataformas distintas. Bem como a análise do impacto de efeitos deletérios no desempenho sistêmico, na Seção 2.2.1, que resultou em simulações que demonstraram a possibilidade de transmitir com taxa de bits de 1 Tb/s com um esquema de modulação 64-QAM, ao longo de 750 km e, mantendo a mesma taxa, alterando o formato de modulação para 256-QAM, o alcance se reduziu para 250 km. Além disso, foi feito um estudo complementar sobre extensão da banda convencional para as adjacentes, com o intuito de atender a demanda por mais espectro pelo crescente tráfego de dados, conforme a Seção 2.3.

Por fim, os estudos e trabalhos feitos ao longo do estágio permitiram uma interação que, ao longo da graduação é limitada apenas à construção dos conhecimentos e na instituição CPQD permitiu-se aplicar esses aprendizados na prática diária de empresa. Prática essa que instiga o estudante a continuar a busca por mais conhecimento e aplicação de engenharia melhorando de certa forma as tecnologias disponíveis à sociedade.

Referências

- [1] Sobre - CPQD. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento. Acessado em: 20 de abril de 2020. [Online]. Available: <https://www.cpqd.com.br/sobre/>
- [2] Python 3 parte 1: Introdução à nova versão da linguagem. alura. Acessado em: 20 de abril de 2020. [Online]. Available: <https://www.alura.com.br/curso-online-python-3-introducao-a-nova-versao-da-linguagem>
- [3] Python 3 parte 2: Avançando na linguagem. alura. Acessado em: 20 de abril de 2020. [Online]. Available: <https://www.alura.com.br/curso-online-python-3-avancando-na-linguagem>
- [4] Python 3: Introdução à Orientação a objetos. alura. Acessado em: 20 de abril de 2020. [Online]. Available: <https://www.alura.com.br/curso-online-python-3-intro-orientacao-objetos>
- [5] CLEO - Science to Photonic Application. OSA - Optical Society of America. Acessado em: 15 de maio de 2020. [Online]. Available: <https://www.cleoconference.org/home/>
- [6] Advanced Photonics Congress. OSA - Optical Society of America. Acessado em: 14 de julho de 2020. [Online]. Available: https://www.osa.org/en-us/meetings/osa_meetings/advanced_photonics_congress/about/
- [7] Virtual Seminar Series – High-Speed Digital Back to Basics. Keysight Technologies. Acessado em: 20 de maio de 2020. [Online]. Available: <https://event.on24.com/eventRegistration/EventLobbyServlet?target=reg20.jsp&mode=login&loginemail=carine%40cpqd.com.br&eventid=2292373&sessionid=1&key=2B5DD810F6F79860D8A2B743E0819934®Tag=&sourcepage=register>
- [8] Machine Learning: Introdução a classificação com SKLearn. Alura. Acessado em: 20 de abril de 2020. [Online]. Available: <https://www.alura.com.br/curso-online-machine-learning-introducao-a-classificacao-com-sklearn>
- [9] M. van den Hout, S. van der Heide, and C. Okonkwo, “Digital Resolution Enhancer Employing Clipping for High-Speed Optical Transmission,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 11, pp. 2897–2904, 2020.
- [10] 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.
- [11] M. Y. Sowailem, 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.
- [12] 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.
- [13] S. T. Le, K. Schuh, M. Chagnon, F. Buchali, and H. Buelow, “1.6 Tb/s virtual-carrier assisted WDM direct detection transmission over 1200 km,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 418–424, 2018.
- [14] F. Hamaoka, M. Nakamura, M. Nagatani, T. Kobayashi, A. Matsushita, H. Wakita, H. Yamazaki, H. Nosaka, and Y. Miyamoto, “120-GBaud 32QAM Signal Generation Using Ultra-Broadband Electrical Bandwidth Doubler,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2019, pp. M2H–6.
- [15] D. S. Millar, L. Galdino, R. Maher, M. Pajovic, T. Koike-Akino, G. Saavedra, D. J. Elson, D. Lavery, K. Shi, M. S. Erkilinc *et al.*, “A simplified dual-carrier DP-64QAM 1 Tb/s transceiver,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2017, pp. 1–3.
- [16] K. Schuh, S. T. Le, R. Dischler, and F. Buchali, “Transmission of 90 Gbd 32 QAM over 480 km of SSMF with Kramers-Kronig detection,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [17] T. Bo and H. Kim, “Toward practical Kramers-Kronig receiver: resampling, performance, and implementation,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 461–469, 2019.
- [18] X. Chen, C. Antonelli, S. Chandrasekhar, G. Raybon, A. Mecozzi, M. Shtaif, and P. Winzer, “Kramers-Kronig receivers for 100-km datacenter interconnects,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 79–89, 2018.
- [19] S. T. Le, K. Schuh, R. Dischler, F. Buchali, L. Schmalen, and H. Buelow, “5x510 Gbps Single-Polarization Direct-Detection WDM Transmission over 80 km of SSMF,” in *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*. Optical Society of America, 2019, p. Tu2B.1.

- [20] T. M. Hoang, M. Y. Sowailem, Q. Zhuge, Z. Xing, M. Morsy-Osman, E. El-Fiky, S. Fan, M. Xiang, and D. V. Plant, “Single wavelength 480 Gb/s direct detection over 80km SSMF enabled by Stokes vector Kramers Kronig transceiver,” *Optics Express*, vol. 25, no. 26, pp. 33 534–33 542, 2017.
- [21] F. Hamaoka, K. Minoguchi, T. Sasai, A. Matsushita, M. Nakamura, S. Okamoto, E. Yamazaki, and Y. Kisaka, “150.3-Tb/s Ultra-Wideband (S, C, and L Bands) Single-Mode Fibre Transmission over 40-km Using $> 519\text{Gb/s/A}$ PDM-128QAM Signals,” in *European Conference on Optical Communication (ECOC)*. IEEE, 2018, pp. 1–3.
- [22] M. Mazur, J. Schröder, A. Lorences-Riesgo, T. Yoshida, M. Karlsson, and P. A. Andrekson, “11.5 bits/s/Hz PM-256QAM comb-based superchannel transmission by combining optical and digital pilots,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*. IEEE, 2018, pp. 1–3.
- [23] J. Cheng, C. Xie, Y. Chen, X. Chen, M. Tang, and S. Fu, “Comparison of coherent and IMDD transceivers for intra datacenter optical interconnects,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [24] E. Ibragimov, H. Jiang, P. Xu, and X. Li, “Coherent Analog Low Power, Small Size 400/200/100Gb/s Receiver Based on Bipolar SiGe Technology,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2018, pp. Th1A–5.
- [25] F. Li, X. Li, L. Chen, Y. Xia, C. Ge, and Y. Chen, “High-level QAM OFDM system using DML for low-cost short reach optical communications,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 9, pp. 941–944, 2014.
- [26] H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, M. Nakamura, S. Kanazawa, M. Ida, T. Hashimoto, H. Nosaka, and Y. Miyamoto, “160-GBd (320-Gb/s) PAM4 transmission using 97-GHz bandwidth analog multiplexer,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 20, pp. 1749–1751, 2018.
- [27] X. Chen, S. Chandrasekhar, J. Cho, and P. Winzer, “Single-wavelength and single-photodiode entropy-loaded 554-Gb/s transmission over 22-km SMF,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2019, pp. Th4B–5.
- [28] T. Gui, L. Yi, C. Guo, C. Lu, and A. P. T. Lau, “120 GBaud PAM-4 transmission over 80-km SSMF using optical band interleaving and Kramers-Kronig detection,” *Optics Express*, vol. 26, no. 20, pp. 25 934–25 943, 2018.
- [29] K. Zhong, X. Zhou, Y. Wang, L. Wang, J. Yuan, C. Yu, A. P. T. Lau, and C. Lu, “Experimental demonstration of 608Gbit/s short reach transmission employing half-

- cycle 16QAM Nyquist-SCM signal and direct detection with 25Gbps EML,” *Optics express*, vol. 24, no. 22, pp. 25 057–25 067, 2016.
- [30] F. Li, J. Yu, Z. Cao, J. Zhang, M. Chen, and X. Li, “Experimental demonstration of four-channel WDM 560 Gbit/s 128QAM-DMT using IM/DD for 2-km optical interconnect,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 4, pp. 941–948, 2016.
- [31] J. Zhang, J. Yu, L. Zhao, K. Wang, J. Shi, X. Li, M. Kong, W. Zhou, X. Pan, B. Liu *et al.*, “Demonstration of 260-Gb/s single-lane EML-based PS-PAM-8 IM/DD for datacenter interconnects,” in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [32] Welcome To Colaboratory. Google. Acessado em: 09 de junho de 2020. [Online]. Available: <https://colab.research.google.com/drive/>
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] A. Pilipetskii, “High capacity submarine transmission systems,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2015, pp. W3G–5.
- [36] A. Ferrari, A. Napoli, J. K. Fischer, N. M. S. da Costa, A. D’Amico, J. Pedro, W. Forysiak, E. Pincemin, A. Lord, A. Stavdas *et al.*, “Assessment on the Achievable Throughput of Multi-band ITU-T G. 652. D Fiber Transmission Systems,” *Journal of Lightwave Technology*, 2020.
- [37] S. Okamoto, K. Minoguchi, F. Hamaoka, K. Horikoshi, A. Matsushita, M. Nakamura, E. Yamazaki, and Y. Kisaka, “A study on the effect of ultra-wide band WDM on optical transmission systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1061–1070, 2020.
- [38] V. Lopez, B. Zhu, D. Moniz, N. Costa, J. Pedro, X. Xu, A. Kumpera, L. Dardis, J. Rahn, and S. Sanders, “Optimized Design and Challenges for C&L Band Optical Line Systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 1080–1091, 2020.
- [39] A. Ferrari, A. Napoli, N. Costa, J. K. Fischer, J. Pedro, W. Forysiak, A. Richter, E. Pincemin, and V. Curri, “Multi-band optical systems to enable ultra-high speed

- transmissions,” in *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*. Optical Society of America, 2019, p. ci_2_3.
- [40] J. D. Downie, “Maximum submarine cable capacity analysis with C-band, C+ L-band, and multicore fiber C-band,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2018, pp. W4C–5.