

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES



PEDRO GOMES DE SOUZA

PREDIÇÃO DE ENLACES SUBMARINOS UTILIZANDO O MÉTODO
NUMÉRICO PERTURBATIVO DO RUÍDO GAUSSIANO

PATOS DE MINAS - MG

2022

PEDRO GOMES DE SOUZA

PREDIÇÃO DE ENLACES SUBMARINOS UTILIZANDO O MÉTODO
NUMÉRICO PERTURBATIVO DO RUÍDO GAUSSIANO

Trabalho apresentado como um dos requisitos parciais para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa.

PATOS DE MINAS - MG

2022

PEDRO GOMES DE SOUZA

PREDIÇÃO DE ENLACES SUBMARINOS UTILIZANDO O MÉTODO
NUMÉRICO PERTURBATIVO DO RUÍDO GAUSSIANO

Trabalho apresentado como um dos requisitos parciais para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Patos de Minas.

Patos de Minas, 01 de abril de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa
Universidade Federal de Uberlândia
Orientador

Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini
Universidade Federal de Uberlândia
Examinador

Prof^a. Dr^a. Karine Barbosa Carbonaro
Universidade Federal de Uberlândia
Examinador

Resumo

O processo de predição do desempenho óptico de sistemas ópticos submarinos, são bastante complexos, devido ao fato de que são levados em consideração diversos parâmetros da rede. Mas esse é um processo de importância fundamental, tendo em vista que os links ópticos estão em constante evolução e expansão. Isso ocorre porque o tráfego de dados nas redes de telecomunicações vem aumentando exponencialmente ao longo dos anos, devido aos surgimentos de serviços que exigem taxas cada vez mais altas. Neste contexto, o presente trabalho de conclusão de curso propõe a utilização de um modelo numérico perturbativo do ruído gaussiano (GN, *Gaussian Noise*) como uma solução, para predições de sistemas ópticos submarinos que utilizam modulação coerente e spans igualmente espaçados. O método GN tem como principal fundamento, expressar o efeito linear da dispersão cromática e os efeitos não lineares da auto modulação de fase (SPM, *Self-Phase Modulation*) e da modulação cruzada de fase (XPM, *Cross Phase Modulation*), por meio de um ruído gaussiano. Dessa forma, as equações aplicadas são simplificadas o que proporciona ganhos no processamento desses dados. Diante dos resultados obtidos, verificou-se que a utilização do método GN apresentou uma aproximação satisfatória, no cálculo da OSNR e da penalidade introduzida pela rede óptica, quando comparada aos mesmos resultados adquiridos em simulações realizadas no software OptiSystem®. Portanto o modelo perturbativo do ruído gaussiano é uma solução nos projetos de planejamento de redes ópticas submarinas, para predição do desempenho óptico de tais sistemas.

Palavras-chave: Ruído Gaussiano; Sistema Óptico Submarino; DP M-QAM.

Abstract

The process of predicting the optical performance of underwater optical systems is quite complex, due to the fact that several parameters of the network are taken into account. But this is a process of fundamental importance, given that optical links are constantly evolving and expanding. This happens because data traffic on telecommunications networks has been increasing exponentially over the years, due to the emergence of services that demand higher and higher rates. In this context, this course conclusion work proposes the use of a numerical model of Gaussian noise (GN) as a solution for predictions of underwater optical systems that use coherent modulation and equally spaced spans. The GN method is mainly based on expressing the linear effect of chromatic dispersion and the non-linear effects of self-phase modulation (SPM) and cross-phase modulation (XPM), through a Gaussian noise. Thus, the applied equations are simplified which provides gains in the processing of these data. In view of the results obtained, it was verified that the use of the GN method presented a satisfactory approximation, in the calculation of the OSNR and the penalty introduced by the optical network, when compared to the same results acquired in simulations carried out in the OptiSystem® software. Therefore, the Gaussian noise perturbative model is a solution in the planning projects of underwater optical networks, to predict the optical performance of such systems.

Keyword: Gaussian Noise; Submarine Optical System; DP M-QAM.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa, por estar sempre ao meu lado me ensinando, orientando e com muito respeito e paciência ao longo deste período. Também agradeço ao André pelo suporte e me acompanhar no meu ingresso ao mercado de trabalho na área de comunicações ópticas.

Agradeço aos meus professores por todo ensinamento e experiências compartilhados ao longo desses anos e pelo apoio e incentivo em me capacitar cada vez mais.

Agradeço aos meus colegas de curso com quem tive a felicidade de conviver durante esta graduação.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, pelo ambiente criativo e de alta tecnologia proporcionado durante esses anos. A UFU me proporcionou diversas oportunidades de me desenvolver e de contribuir para a comunidade.

Sumário

Resumo	iv
Abstract.....	v
Agradecimentos	vi
Sumário.....	vii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Problematização	6
1.2 Hipótese	6
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivos Gerais	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
1.4 Justificativa	7
1.5 Proposta e Organização do Trabalho	7
Capítulo 2	9
Sistemas Submarinos de Comunicações Ópticas	9
2.1 Transmissor	10
2.2 Receptor	12
2.3 Fibra Óptica Submarina	15
2.4 Amplificador	16
Capítulo 3	19
Modelo Analítico do Ruído Gaussiano	19
3.1 Fórmula de Referência do Modelo Analítico Gaussiano	20
3.2 Relação Sinal Ruído Óptica	22
Capítulo 4	24
Resultados e Discussões	24
4.1 Simulações do sistema óptico submarino	24
4.1.1 Setup de Simulação	24
4.1.2 Comparação entre as simulações do sistema óptico submarino e o método analítico do ruído Gaussiano	25
4.2 Fibra óptica	30
4.3 BER x Potência por canal	32
4.4 Distância total do enlace	38
Capítulo 5	42
Conclusão e Estudos Futuros	42
5.1 Conclusões	42
5.2 Estudos Futuros	43
Referências	44

Lista de Figuras

Figura 1 – Demanda por dados em exabytes por ano.....	2
Figura 2 – Estimativa de smartphones conectados ao 5G.	3
Figura 3 - Elementos principais em um sistema de comunicações ópticos.....	9
Figura 4 - Diagrama de um transmissor óptico de alta ordem DP 16-QAM.....	10
Figura 5 - Constelação 16-QAM utilizando codificação Gray.....	12
Figura 6 - Diagrama de um receptor óptico coerente de alta ordem DP 16-QAM.....	12
Figura 7 – Configuração Híbrido Óptico 2x4 de 90°.....	13
Figura 8 – Configuração de um DSP.....	14
Figura 9 – Diagrama de um amplificador óptico submarino EDFA bidirecional.	17
Figura 10 - Geração de GNLI(f) devido ao processo de mistura de quatro ondas.....	21
Figura 11 – Esquema proposto para criação dos cenários de transmissão óptica.	24
Figura 12 – Comparação da OSNR e penalidade em função da Potência para 40 canais DP-16QAM.....	27
Figura 13 - Comparação da OSNR e penalidade em função da Potência para 40 canais DP-QPSK.....	28
Figura 14 - Comparação da OSNR e penalidade em função da Potência para 20 canais DP-16QAM.....	28
Figura 15 - Comparação da OSNR e penalidade em função da Potência para 80 canais DP-16QAM.....	29
Figura 16 – Comparação da OSNR em função da Potência por canal, para diferentes tipos de fibras.	30
Figura 17 – OSNR (dB / 0,1 nm) x Potência por canal (dBm): 20 Canais e 20 Amplificadores.	31
Figura 18 - BER x Potência por canal (dBm): DP-16QAM, 20 Canais.....	33
Figura 19 - BER x Potência por canal (dBm): DP-QPSK, 20 Canais.....	34
Figura 20 - BER x Potência por canal (dBm): DP-16QAM, 40 Canais.....	35
Figura 21 - BER x Potência por canal (dBm): DP-QPSK, 40 Canais.....	35
Figura 22 - BER x Potência por canal (dBm): DP-16QAM, 80 Canais.....	36
Figura 23 - BER x Potência por canal (dBm): DP-QPSK, 80 Canais.....	37
Figura 24 – Distância (m) x Potência por canal (dBm): DP-16QAM, span de 60 km.....	39
Figura 25 - Distância (m) x Potência por canal (dBm): DP-QPSK, span de 60 km.....	40

Lista de Siglas e Abreviações

5G	Quinta Geração - (<i>Fifth Generation</i>)
BER	Taxa de Erro de Bit - (<i>Bit Error Rate</i>)
D2D	Dispositivo Para Dispositivo - (<i>Device To Device</i>)
DC	Duas Portadoras - (<i>Dual Carrier</i>)
DCF	Fibras Compensadoras de Dispersão (<i>Dispersion Compensation Fiber</i>)
DP	Duas Polarizações - (<i>Dual Polarization</i>)
DWDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Denso - (<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>)
FOM	Figura de Mérito - (<i>Figure-of-Merit</i>)
FWM	Mistura de Quadro Ondas - (<i>Four Wave Mixing</i>)
GN	Ruído Gaussiano - (<i>Gaussian Noise</i>)
GNRF	Formula Referente do Modelo GN - (<i>GN-Model Reference Formula</i>)
GVD	Dispersão de Velocidade de Grupo - (<i>Group Velocity Dispersion</i>)
IoT	Internet das Coisas - (<i>Internet of Things</i>)
ITU	União Internacional de Telecomunicações - (<i>International Telecommunication Union</i>)
LED	Diodo Emissor de Luz - (<i>Light Emitting Diode</i>)
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
M2M	Máquina para Máquina - (<i>Machine to Machine</i>)
OFDM	Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais - (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>)
OLT	Linhas Ópticas Terminais - (<i>Optical Line Terminals</i>)
OSNR	Relação Sinal-Ruído Óptico - (<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>)
OTN	Rede de Transporte Óptico - (<i>Optical Transport Network</i>)
OXCs	Comutadores Ópticos - (<i>Optical Crossconnectors</i>)

PMD	Dispersão do Modo de Polarização - (<i>Polarization Mode Dispersion</i>)
QAMs	Modulação Por Amplitude e Quadratura - (<i>Quadrature Amplitude Modulations</i>)
QoS	Qualidade de Serviço - (<i>Quality of Services</i>)
QPSK	Chaveamento em Fase e Quadratura - (<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>)
ROADMs	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Network</i>
SPM	Auto Modulação de Fase - (<i>Self-Phase Modulation</i>)
SSMF -	Fibra Monomodo Padrão - (<i>Standard Singlemode Fiber</i>)
STDF	Fibra Padrão - (<i>Standard Fiber</i>)
UHD	Ultra-Alta Definição - (<i>Ultra-High Definition</i>)
VR	Realidade Virtual - (<i>Virtual Reality</i>)
VS	Serie de Volterra - (<i>Volterra Series</i>)
WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda - (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)
XPM	Modulação Cruzada de Fase - (<i>Cross Phase Modulation</i>)

Capítulo 1

Introdução

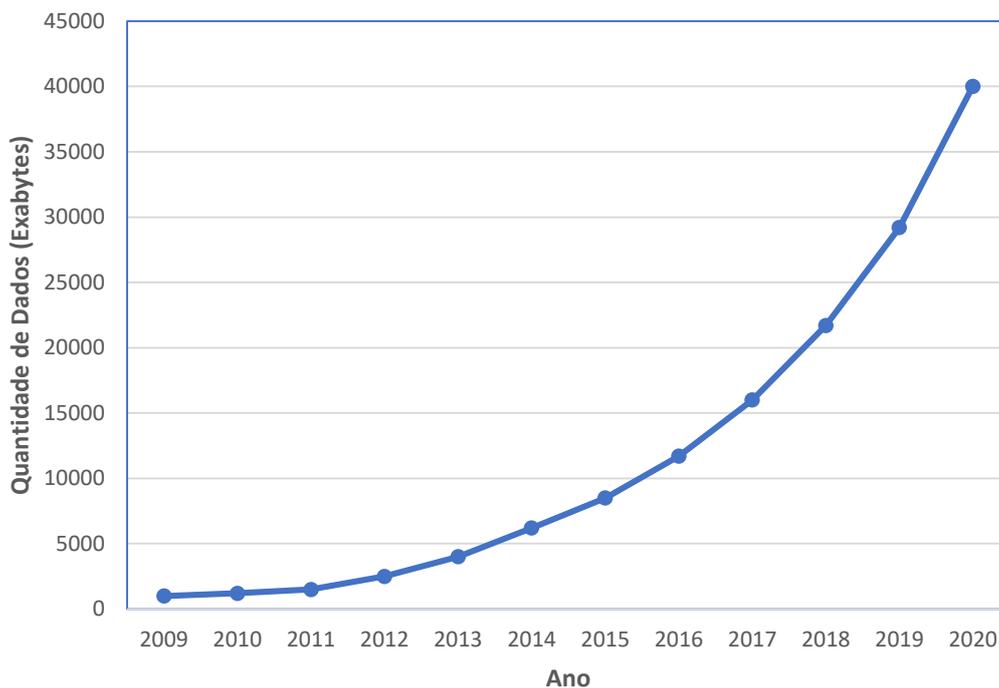
A perpetuação e evolução das diversas espécies de animais e plantas em nosso planeta é em grande parte devido a um dos princípios mais importantes na natureza: a comunicação. Com o ser humano não é diferente, pois grande parte de seu avanço foi devido à grande capacidade que de criar, de registrar e de passar conhecimento para outras pessoas [1].

O estilo de vida em sociedade do ser humano vem sendo influenciado com o avanço da tecnologia, por meio do consumo cada vez maior de informações, gerando a necessidade por formas de comunicações melhores e mais eficientes [1]. Nas últimas décadas por meio da evolução das tecnologias, dos métodos da aplicação de técnicas digitais, conseguiu-se implementar redes de comunicações abrangentes, o que proporcionou o envio de informações para locais remotos do planeta em questões de segundos [2]. As tecnologias de comunicações com grande capacidade, alta qualidade e grande alcance permitiu a melhora na qualidade e quantidade das informações, o que torna possível a implantação e melhoria em serviços como: realidade virtual (VR, *Virtual Reality*), serviços em ultra-alta definição (UHD, *Ultra-High Definition*), cidades inteligentes, dentre outros [3 - 4].

Devido a globalização o número de usuários nas redes de telecomunicações aumenta exponencialmente, tornando-se necessário a otimização da largura de banda passante [2 - 3]. O consumo de eletrônicos conectáveis, tais como telefones móveis inteligentes, computadores portáteis e computadores de mesa menores e mais compactos, tornou-se também um parâmetro no aumento na demanda [5]. Segundo Mohanty e Routray em 2017 mais de 3 bilhões de pessoas e empresas estão interligadas por meio de tais dispositivos [5]. De acordo com a Figura 1 pode ser observado o crescimento exponencial da demanda de dados nos últimos anos e a projeção desse crescimento até 2020 [2] [5].

Com essa grande quantidade de dispositivos móveis e a enorme demanda por mais banda, é intuitivo perceber a necessidade de melhorar as tecnologias de comunicações móveis por meio da utilização de novas técnicas de codificações de canais, modulações, múltiplo acesso e os protocolos. A quarta geração das redes de comunicações móveis (LTE, *Long Term Evolution*) surgiu como uma grande evolução, na qual apresentava como prioridade a transmissão de dados, sendo capaz de alcançar taxas transmissão de pico da ordem de 1 Gpbs ou 10 Mbp por usuário [6].

Figura 1 – Demanda por dados em exabytes por ano.

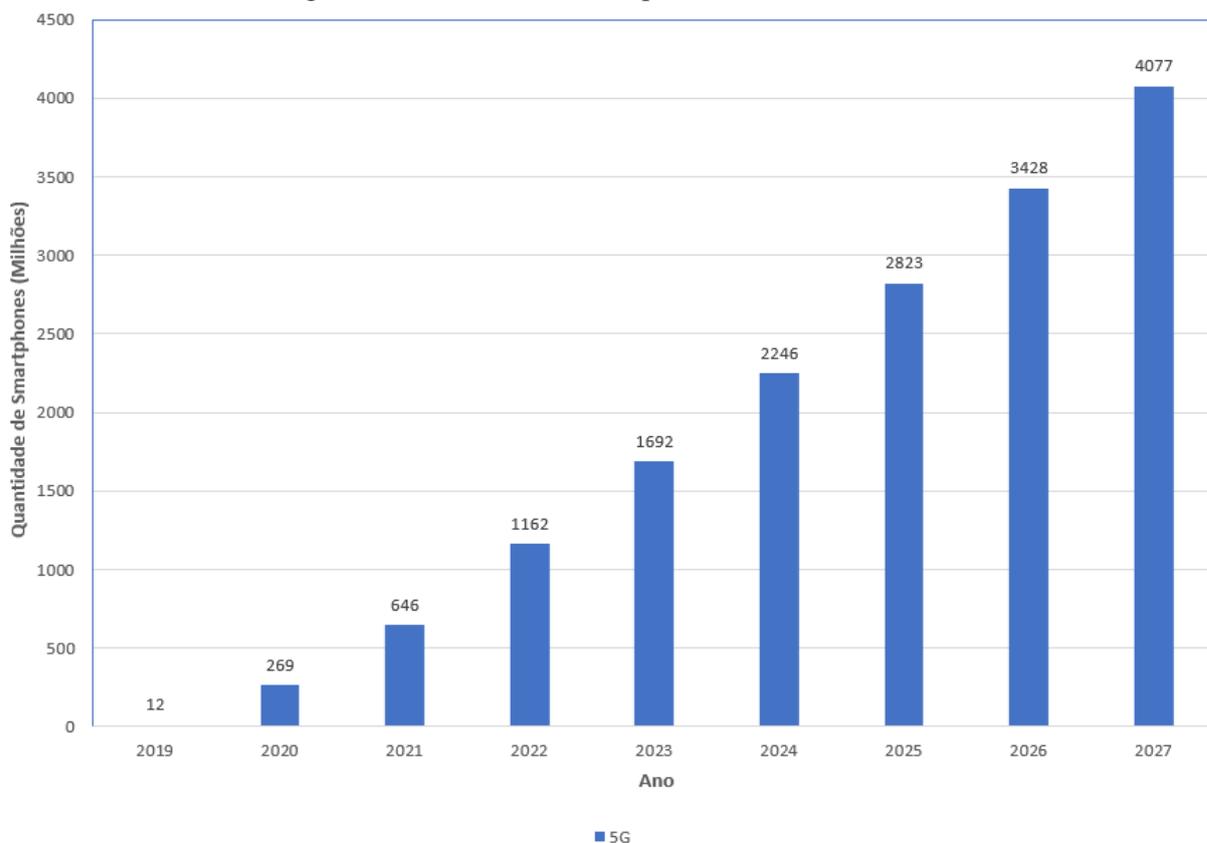


Fonte: Modificada pelo autor de [5].

A tecnologia LTE tem foco em prover serviços de dados aos usuários com alta qualidade. Entretanto, com o surgimento de novos serviços como: compartilhamento de conteúdo dispositivo para dispositivo (D2D, *Device To Device*), comunicação entre máquinas (M2M, *Machine to Machine*), internet das coisas (IoT, *Internet of Things*), internet tátil, realidade aumentada e virtual, dispositivos inteligentes, dentre outros [4] [7 - 8]. Torna-se necessário a evolução da tecnologia wireless, dessa forma a quinta geração das redes de comunicações móveis (5G, *Fifth Generation*) surgem como alternativa capaz de atender todos os requisitos dos serviços citados anteriormente. As especificações finais do 5G foram propostas pela União Internacional de Telecomunicações (ITU, *International Telecommunication Union*) e a padronização está sendo realizada por meio de uma cooperação entre a indústria e a academia [7].

No momento a banda do 5G usará as ondas milimétricas (mm) em diferentes janelas, o que aumentará quase que de forma automática a banda passante. Algumas das características dessa tecnologia são: alta taxa de pico de 20 Gbps, latência menor que 1 ms, aumento de mais de 10 vezes no número de dispositivos interconectados, maior duração e eficiência das baterias e a melhoria da eficiência espectral [7]. Apesar do 5G ser uma tecnologia que ainda está sendo trabalhada e desenvolvida, segundo a Ericsson Mobility Report, em 2024 o 5G estará presente em 1480 milhões de smartphones ao redor do planeta, como mostra a Figura 2 [9].

Figura 2 – Estimativa de smartphones conectados ao 5G.



Fonte: Modificada pelo autor de [9].

Para garantir a qualidade de serviços (QoS, *Quality of Services*) no tráfego de informações nas redes de acesso aos usuários, é preciso uma estrutura de redes eficaz e capaz de conectar tais redes de acesso, ao núcleo das redes de telecomunicações. Esta estrutura é conhecida pelo termo em inglês por *backhauls* ou ainda podem ser classificadas como redes metropolitanas, se tomar a definição de redes de telecomunicações devido ao comprimento e alcance [3].

Já o núcleo das redes de telecomunicações citado no parágrafo anterior pode ser entendido como as redes de grande alcance e de grandes áreas de cobertura, uma vez que são capazes de conectarem cidades a cidades, países a países e até mesmo continentes a continentes. Para estas redes usa-se o termo em inglês *backbone* [3].

As redes *backbones* foram originalmente projetadas para suprir conexões de voz e taxa de bit constante de baixa velocidade (até 51 Mbps). Com o surgimento de novos serviços e tecnologias, os backbones suportam redes de tráfego de pacotes de dados, que podem alcançar links com taxa de transmissão de dezenas de Terabits por segundo [3]. As linhas ópticas terminais (OLT, *Optical Line Terminals*), multiplexadores reconfiguráveis (ROADMs, *Reconfigurable Optical Add/Dropp Multiplexers*) e o comutadores ópticos (OXC, *Optical*

Crossconnecters) são os principais dispositivos que compõe as redes de *backbones*. Tais redes utilizam comutação por pacote (OTN, *Optical Transport Network*) como uma solução para a transmissão de protocolos como IP e Ethernet, além de protocolos legados como Redes Ópticas Síncronas (SONET, *Synchronous Optical Networking*) e a Hierarquia Digital Síncrona (SDH, *Synchronous Digital Hierarchy*). As redes OTN também facilitam em muito o gerenciamento e manutenção [3] [10].

Em concordância com esses fatos estudos e aplicações de modelos matemáticos com a finalidade de prever e analisar o desempenho óptico, por meio de parâmetros como a Relação Sinal Ruído Óptica (OSNR, *Optical Signal-to-Noise Ratio*) e a taxa de erro de bit (BER, *Bit Error Rate*) tem avançado nos últimos anos, uma vez que as redes de telecomunicações têm se tornado mais complexa e mais tecnológicas para atender a crescente demanda por dados. A utilização desses modelos surgiu como uma proposta de facilitar o planejamento e análises de redes ópticas, sem a necessidade de montar um setup físico para caracterizar um sistema e obter esses dados, dessa forma a implementação desses cálculos agregam muito valor, tornando mais prático e rápido a prestação de serviços e no processo de desenvolvimento de *links* de telecomunicações [11] [12].

Vários dos modelos que foram desenvolvidos são baseados na nos efeitos não lineares que ocorrem durante a transmissão de sinais ópticos, como o modelo proposto em 1993 baseado nas equações do efeito de mistura de quatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*). Em 1997 foi estudado uma outra solução tendo como referência a Serie de Volterra (VS, *Volterra Series*) que trabalha na equação não linear de Schroedinger, vale ressaltar que ambas propostas apresentadas possuem uma aproximação ou é similar as equações do modelo de ruído gaussiano que será estruturado a seguir [11].

Neste documento será apresentado um modelo de Ruído Gaussiano (GN, *Gaussian Noise*) estabelecido em 2002, que consiste em aproximar a perturbação provocada em um sistema óptico de transmissão não compensada, na forma de um ruído não linear gaussiano e aditivo. Uma das principais vantagens em empregar esse método é a simplificação nas equações necessárias para calcular o desempenho da rede, uma vez que essas são representadas como uma única interferência acumulada ao sinal transmitido [11] [12].

A utilização dessas técnicas matemáticas combinadas com a utilização de fibras submarinas de grande área efetiva, tem se mostrado muito promissoras principalmente quando aplicadas em redes *backbones* de longas distâncias ou com uma grande complexidade, tendo em vista que esses sistemas são projetados para durarem muitos anos sem alterações drásticas

e necessitam de uma otimização quanto ao desempenho do sistema considerando a degradação com o tempo e as previsões de suportarem mais dados devido a sempre demanda por mais dados [12].

O primeiro modelo de fibras ópticas com baixa atenuação (20 dB/km para 632 nm), foi desenvolvido em 1970 por pesquisadores da *Corning Glass Works* [13]. Tal desenvolvimento só foi possível por meio da inovação no processo de purificação do vidro utilizado para a fabricação de tais fibras. Desta forma, rapidamente fibras com atenuações da ordem de 2,0; 0,5 e 0,25 dB/km foram desenvolvidas para os comprimentos de ondas de 850, 1310 e 1550 nm [14] respectivamente, chegando finalmente na fibra (STDF, *Standard Fiber*) descrita pela recomendação G. 652 do ITU-T [15].

Ainda no intuito de desenvolver fibras ópticas com atenuações ainda menores, em 1986 surgem as fibras ópticas de sílica com núcleo livres de Germânio. Tais fibras apresentam perdas iguais a 0,154 dB/km no comprimento de onda de 1550 nm para os protótipos desenvolvidos em laboratório. Já em 1988 tais fibras apresentavam 0,170 dB/km e estavam disponíveis comercialmente apresentando menor atenuação que as fibras padrão [10]. Desde então, estas fibras vêm sendo desenvolvidas ao longo do tempo, e em 2010 foi possível o atingir uma atenuação de 0,162 dB/km. Em 2013 atingiu-se uma atenuação de 0,154 dB/km e finalmente 0,152 dB/km em 2016 [16].

Além disso, tais fibras apresentam grandes áreas efetivas da ordem de 130 a 150 μm^2 , o que facilitou a utilização das técnicas de modulações coerentes em Amplitude e Quadratura em Duas Polarizações (DP M-QAMs, *Dual Polarization Quadrature Quadrature Modulations*), tornando, portanto, os sistemas ópticos submarinos menos susceptíveis aos efeitos não-lineares da auto modulação de fase (SPM, *Self-Phase Modulation*) e da modulação cruzada de fase (XPM, *Cross Phase Modulation*) [3] [16 - 17].

As fibras submarinas com uma maior área efetiva, possuem uma melhor figura de mérito (FOM, *Figure-of-Merit*), e além de uma menor perda, também possui uma melhora na relação sinal-ruído óptico do enlace, uma vez que permite a propagação de um sinal óptico com maior potência [16] [18]. Mesmo com tantos avanços, há alguns obstáculos nesse tipo de sistema: como o fato que tem-se um limite na capacidade de transmissão, devido ao fornecimento de energia para os repetidores submarinos [19].

1.1 Problematização

Conforme comentado anteriormente, o aumento exponencial no consumo de dispositivos eletrônicos conectáveis e dos serviços de telecomunicações aumentou o tráfego de dados nas redes de acesso para ordem de 40000 exabytes (40000 10^{18} bytes) já em 2020 [5]. Assim toda essa grande quantidade de dados estará fluindo entre o acesso ao usuário final e as redes de *backbones*. Desta forma, o emprego de métodos matemáticos combinados com a utilização das fibras ópticas de grande área efetiva, conjugadas aos sistemas de modulações ópticas coerentes nos *backbones* submarinos, surgem como uma solução para infraestrutura de rede, além de facilitar o planejamento de novos sistemas ópticos e na análise para otimização de sistemas já instalados devido a aproximação e facilidade do uso de tais equações. Assim este trabalho estudará a aplicação do método perturbativo do ruído gaussiano (GN- *Guassian Noise*) para a predição de enlaces ópticos submarinos.

1.2 Hipótese

H₁: A aplicação do modelo em sistemas de longas distâncias utilizando fibras ópticas submarinas de grande área efetiva e as modulações ópticas coerentes, são capazes de prover resultados aproximados do desempenho óptico desses sistemas com os resultados de softwares de simulação?

H₀: A aplicação do modelo GN em sistemas de longas distâncias utilizando fibras ópticas submarinas de grande área efetiva e as modulações ópticas coerentes, não são capazes de prover resultados aproximados do desempenho óptico desses sistemas com os resultados de softwares de simulação?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

Este trabalho de conclusão de curso consiste em comparar os parâmetros do desempenho de sistemas ópticos de longas distâncias por meio de modelo GN e de simulações realizadas no *software* OptiSystem[®]. Em redes que utilizam fibras ópticas submarina de grande área efetiva e modulação coerente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Validar a aplicação do modelo GN em comparação com resultados simulados .
- Determinar qual a fibra mais adequada para o emprego em enlaces submarinos por meio do modelo GN.

- Determinar o ganho máximo de dos amplificadores por meio do modelo GN.
- Determinar a potência máxima de lançamento por canal por meio do modelo GN.
- Distância máxima alcançada do enlace submarino por meio do modelo GN.

1.4 Justificativa

Com a necessidade de suprir o tráfego de informações nas redes de telecomunicações, em que a quantidade de dados tem crescido exponencialmente e a complexidade dos links ópticos tem aumentado ao longo dos anos, é preciso estudar novas tecnologias, métodos e ferramentas capazes de analisar, otimizar, melhorar, planejar o desempenho das redes *backbones*, *backhauls* e de acesso de forma a subir as condições previstas para os próximos anos, de forma a garantir a eficiência e estabilidade das redes.

Uma alternativa para solucionar essa questão é a utilização do modelo de ruído gaussiano combinada com a utilização de fibras ópticas com grande área efetiva, visando proporcionar um análises, planejamento e otimização de redes sem a necessidade da montagem de setups físicos, aumentar a capacidade do tráfego de informações, aumentar a distância do enlace, e a distância entre os amplificadores nas redes núcleos, que é onde se concentra a maior quantidade de informações.

Para se obter esses resultados é de vital importância o estudo dos cálculos matemáticos que torna possível aproximar a perturbação provocada em um sistema óptico de transmissão não compensada, técnicas digitais coerentes e as características dos componentes de um sistema óptico. Neste contexto a modulação DP M-QAM tem-se mostrado muito eficiente para a transmissão de informações em um sistema de tráfego denso e que exige altas taxas e o instalação de fibras ópticas com grande área efetiva torna o sistema menos susceptível a alguns efeitos não lineares e aumentar a potência de transmissão dos sinais, possibilitando a criação de sistemas de longas distâncias.

1.5 Proposta e Organização do Trabalho

Este projeto tem como objetivo validar a aplicação do modelo GN em relação aos resultados obtidos por meio de simulações, em diversos cenário que foram utilizadas fibras ópticas submarinas com grande área efetiva e utilizando técnicas de modulações DP QPSK e DP 16-QAM, a fim de aferir a eficiência desse método em calcular os parâmetros de OSNR e BER de enlaces de longas distâncias com grande demanda por informações. Essa proposta surge como uma possível solução de facilitar as análises, planejamentos e otimizações de redes ópticas

devido ao surgimento de serviços que precisam de altas taxas de dados e do aumento da complexidade dos *links* de telecomunicações.

Este Trabalho de Conclusão de Curso será desenvolvido seguindo as seguintes ideias e etapas: a primeira etapa consiste em adquirir referenciais teóricos a respeito do método GN, suas equações, parâmetros, aplicações, estruturas e conceitos, além de estudar as características e funcionamento dos componentes utilizados no desenvolvimento de um sistema de comunicações ópticas, com o intuito de estruturar as equações e montar as simulações para análise dos enlaces ópticos submarinos.

Após essa etapa de adquirir conhecimento a respeito do método e destes sistemas de telecomunicações, serão realizadas simulações dos enlaces por meio do *software* OptiSystem[®]. O objetivo nesta fase, é analisar o desempenho óptico do sistema e fazer alterações nos parâmetros a fim de otimizar a capacidade e qualidade do sistema, buscando aumentar o comprimento do enlace, aumentar a distância entre os amplificadores ópticas e aumentar a taxa de transmissão do sistema.

Por fim a ideia é verificar a efetividade da aplicação no método do ruído gaussiano em obter resultados do desempenho óptico próximo aos resultados simulados e chegar a uma conclusão de todo esse processo. Será tomada sempre como referência a utilização de fibras ópticas submarinas de grande área efetiva e a utilização de modulações coerentes.

Capítulo 2

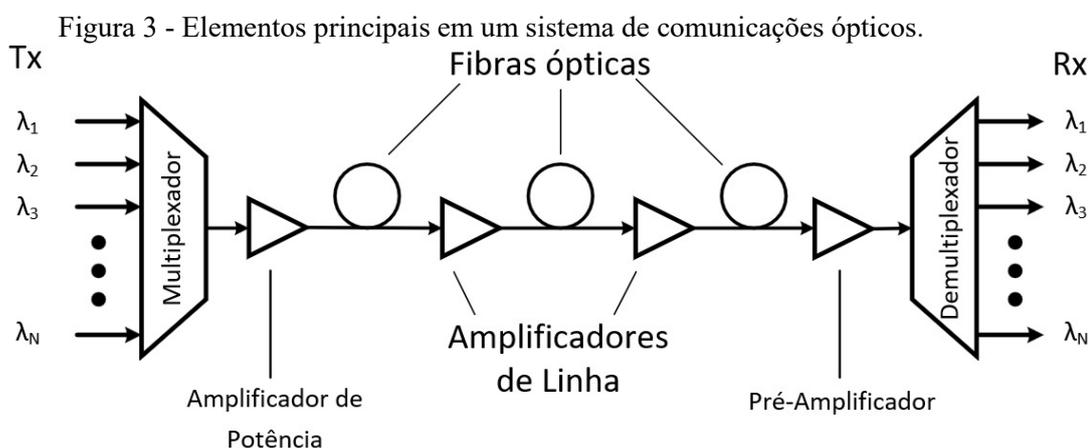
Sistemas Submarinos de Comunicações Ópticas

O avanço da tecnologia e a necessidade do mundo estar sempre conectado causado pela globalização juntamente com o aumento exponencial de dispositivos conectados as redes de telecomunicações, estimulou e ainda estimula de forma natural a evolução de sistemas de transmissão, capazes de trafegar informações por meio de altas taxas, baixa latência, a distâncias longas interconectando continentes [20][21].

Segundo a Cisco é previsto que até o ano de 2030 ao menos 500 bilhões de dispositivos estarão conectadas as redes internet de IoT, coletando, gerando dados, interagindo com o ambiente e com outros dispositivos M2M [22][23]. Além dos serviços citados anteriormente com implantação da quinta geração das redes móveis, está previsto a internet tátil, que propõem diagnósticos e cirurgias de forma remota [22].

Nos últimos dois anos iniciaram se os estudos da sexta geração das redes móveis, nas quais, estão previstas taxa de transmissão de 100Gbps, latências quase que instantânea, além de áreas de coberturas onipresentes. Tais requisitos só serão possíveis com a conjugação entre as móveis e as redes de comunicações ópticas [23][24].

Dessa maneira, os sistemas submarinos de comunicações ópticas passaram nessas últimas três décadas, de uma arquitetura ponto a ponto, para sistemas com arquiteturas multicamadas, bastante complexas com normas e recomendações bem estruturadas. Assim, tais redes tornaram-se um dos principais meios de transmissão em longas distâncias, principalmente quando há a necessidade de conectar países e continentes [25][26]. A Figura 3 ilustra os principais dispositivos de um sistema de comunicações ópticas [27].



Fonte: Modificada pelo autor de [27].

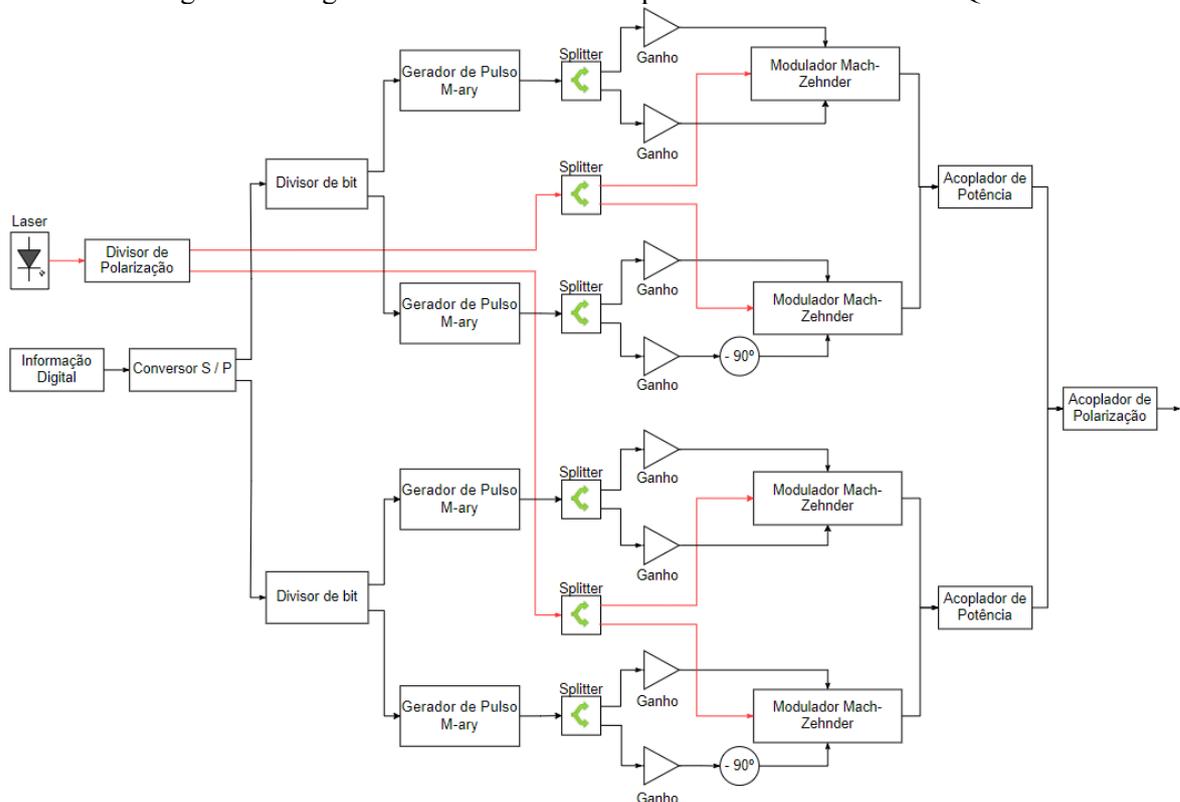
Nesse capítulo será apresentado em detalhes respectivamente o transmissor DP-16QAM, o receptor DP-16QAM, a fibra óptica de grande área efetiva e os amplificadores utilizados para o estudo de predição dos enlaces submarinos por meio do método numérico perturbativo do ruído gaussiano.

2.1 Transmissor

A transmissão de sinais ópticos utilizando modulação coerente começou a ser utilizada na última década, aumentando, portanto, a eficiência espectral dos canais tradicionais e limitados em 10 Gbps. Tal evolução só foi possível devido os processadores digitais de sinais (DSP, *Digital Signal Digitais*). Desde então novos métodos e tecnologias vem sendo desenvolvidos visando alcançar mais bits por segundo, conforme o limite teórico de Shannon, como pode ser visto em [19][25][26].

O transmissor utilizado neste trabalho apresenta taxa de transmissão de 200 Gbps, modulação DP-16QAM, taxa de símbolo de 28 Gbauds e banda igual a 28GHz, conforme discutido em [28][29]. A Figura 4 ilustra o diagrama em blocos da estrutura de um transmissor DP 16-QAM.

Figura 4 - Diagrama de um transmissor óptico de alta ordem DP 16-QAM.



Fonte: Modificada pelo autor de [30].

Tal transmissor é composto por um diodo laser, responsável por gerar a portadora óptica, sintonizado em canais pertencentes a banda C ou L, a qual, tem a função de transportar o sinal banda base até fim do enlace. A luz emitida pelo diodo laser é então polarizada nas polarizações X e Y, por meio do divisor de polarização, e posteriormente conectada aos interferômetros de Mach-Zehnder. Já a informação digital a ser transmitida é então convertida de serial para paralela e em seguida cada um desses sinais serão aplicados um codificador de linha de oito níveis, os quais, serão conectados aos braços dos interferômetros de cada um dos moduladores gerando então os sinais em fase e quadratura.

Por fim, na saída de cada par de interferômetros o somatório dos sinais fase e em quadratura resultará nos sinais em quadratura e em amplitude. A Equação (2.1) mostra a função de transferência do campo elétricos na saída de cada par de interferômetro.

$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = A_I \cos\left(\frac{\Delta\varphi_I(t)}{2}\right) + j A_Q \cos\left(\frac{\Delta\varphi_Q(t)}{2}\right). \quad (2.1)$$

Sendo A_I , A_Q respectivamente as amplitudes e as fases dos sinais em fase e em quadratura, $\Delta\varphi_I(t)$ e $\Delta\varphi_Q(t)$ referem-se as diferenças de fases que são aplicadas no dispositivo Mach-Zehnder respectivamente na fase, parte real e na quadratura, parte imaginária.

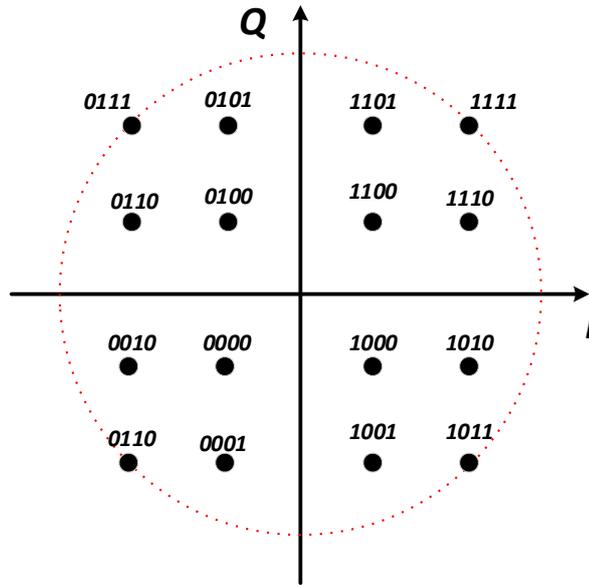
$$\Delta\varphi_I = \frac{u_1(t)}{V_\pi} \pi, \quad (2.2)$$

$$\Delta\varphi_Q = \frac{u_2(t)}{V_\pi} \pi, \quad (2.3)$$

Sendo u_1 , u_2 as amplitudes dos sinais elétricos 1 e 2 e V_π a tensão de polarização que deve ser aplicada a cada um dos interferômetros.

A Figura 5 ilustra a combinação dos sinais de fase e quadratura após o Mach-Zehnder, resultando constelação da modulação em amplitude e quadratura 16-QAM utilizando o código Gray[28].

Figura 5 - Constelação 16-QAM utilizando codificação Gray.

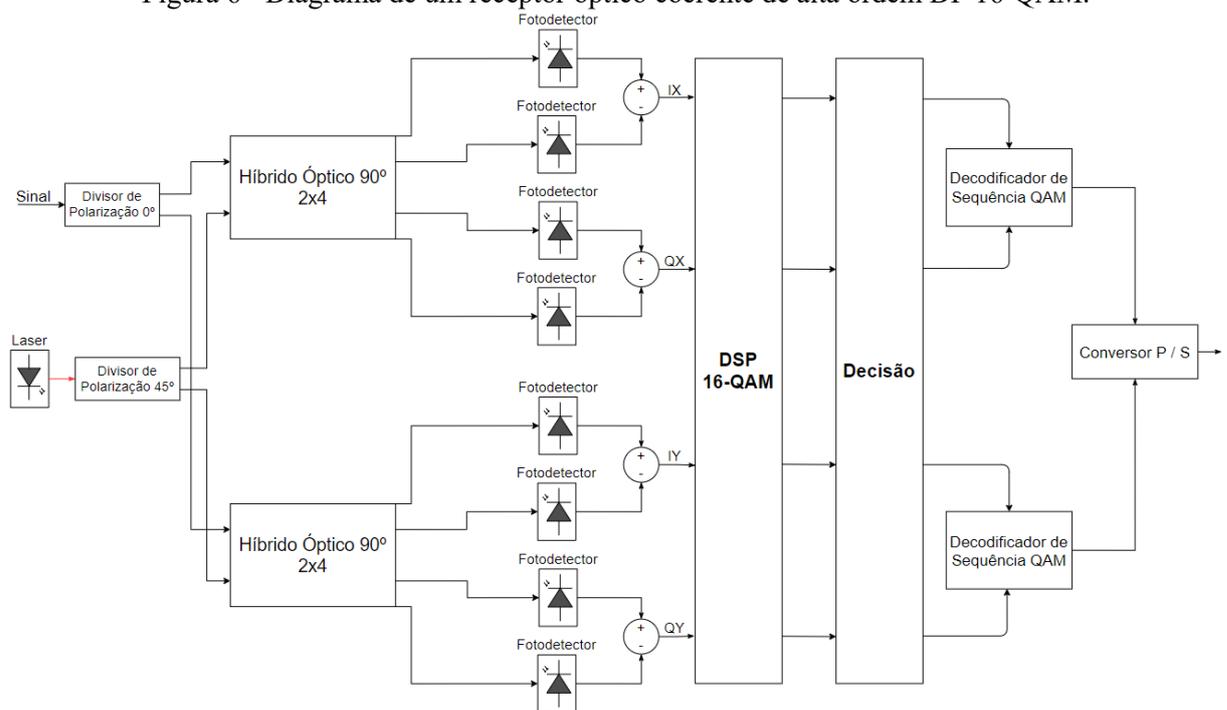


Fonte: Modificada pelo autor de [28].

2.2 Receptor

Conforme apresentado no tópico de transmissor, o receptor óptico utilizado neste trabalho deve ser capaz de detectar e recuperar um sinal DP 16-QAM. A seguir será descrito a estrutura do receptor coerente, conforme ilustrado no diagrama da Figura 6 [30][31].

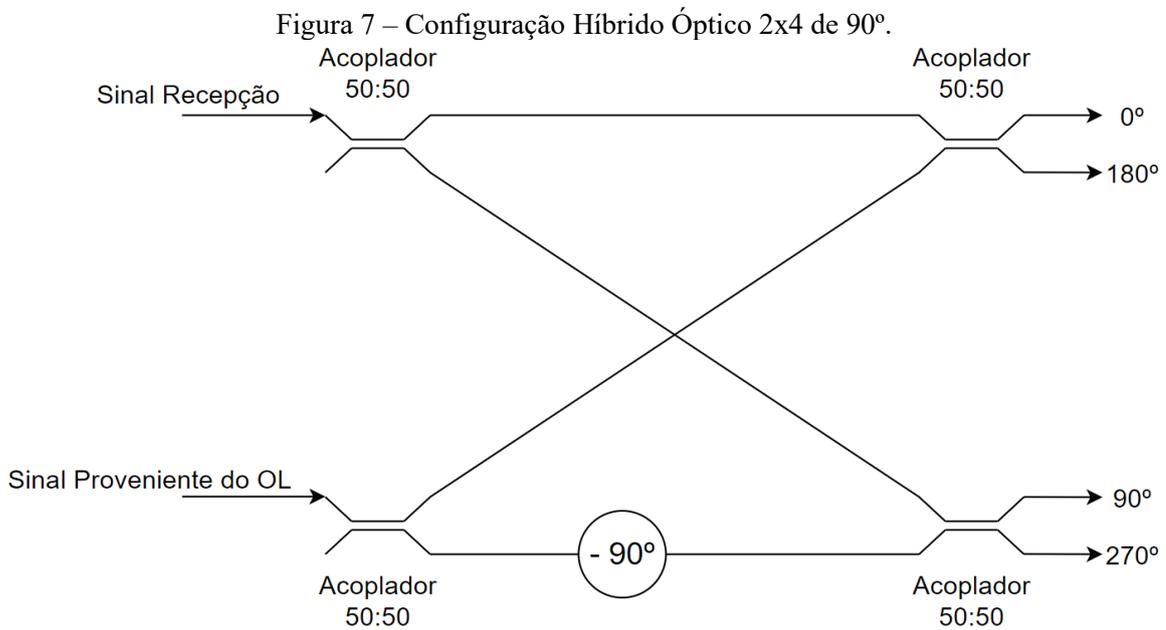
Figura 6 - Diagrama de um receptor óptico coerente de alta ordem DP 16-QAM.



Fonte: Modificada pelo autor de [30].

A detecção dos canais é realizada baseado na detecção homódina [32] por diversidade de fase e polarização, uma das grandes vantagens de se utilizar este modelo é que os sinais são obtidos na banda base, diferente de outros métodos como a recepção heteródina que exige a utilização de uma frequência intermediária bem alta [30][31].

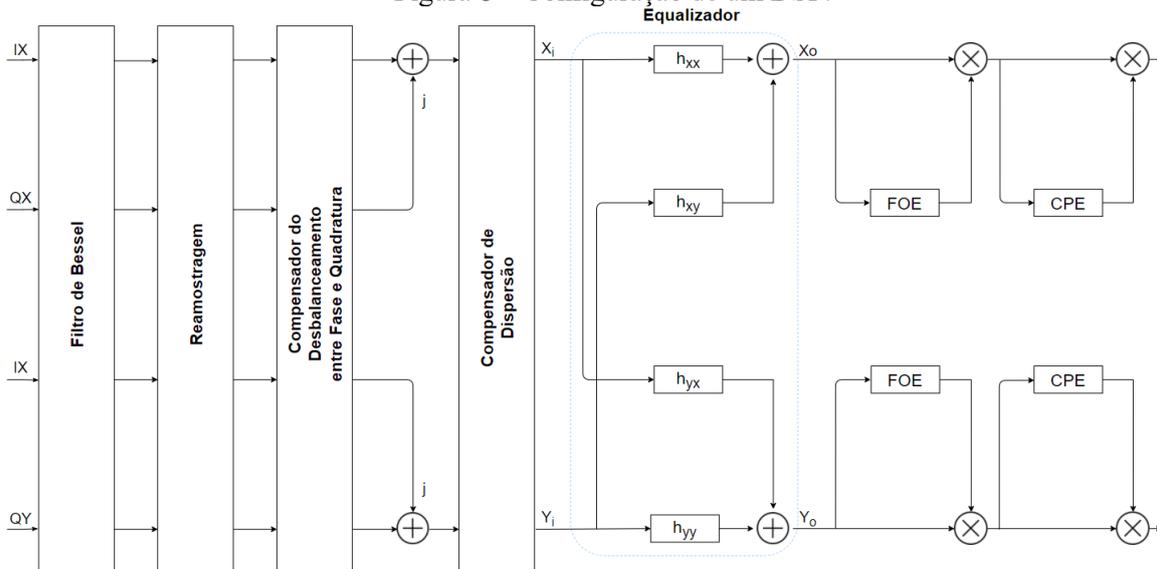
O sinal recebido é demultiplexado por um divisor de polarização, e conectado a um acoplador óptico 2x4 híbrido de 90°, conforme a ilustração da Figura 7. Este componente é composto por um circuito de acopladores híbridos que são combinados, além disso um dos sinais sofre um atraso de fase de noventa graus, com essa arquitetura torna-se possível a separação dos comprimentos de onda contendo as informações de fase com os dados em quadratura [32].



Fonte: Modificada pelo autor de [32].

Uma vez que o sinal passa pelo acoplador óptico 2x4 híbrido de 90°, utiliza-se fotodetectores para a detecção simultânea dos componentes em fase e quadratura do comprimento de onda recebido. Em seguida as informações recebidas são convertidos em dados digitais e processados por um DSP, a seguir será descrito as etapas realizadas durante o processamento digitais de sinais conforme ilustrado na Figura 8 [31][32].

Figura 8 – Configuração de um DSP.



Fonte: Modificada pelo autor de [31].

Primeiramente cada uma das componentes do DP 16-QAM detectada passará por um filtro de Bessel, em seguida o sinal será reamostrados. Uma vez que os sinais estão em condição de sobre amostragem, é realizada a compensação do desbalanceamento entre a fase e a quadratura de forma independente, esse processo é responsável por corrigir os componentes de IQ que provavelmente sofrerão atrasos durante a transmissão do sinal [31][32].

Em seguida são aplicados algoritmos compensadores da dispersão cromática acumulada durante a transmissão do sinal. Após o compensador de dispersão (CD, *Chromatic Dispersion*) utilizado, aplicou-se um equalizador com filtro estático de resposta ao impulso finito (FIR, *Finite Impulse Response*), configurado em uma arquitetura conhecida como borboleta 2x2 [31], o equalizador compara os sinais dos campos X e Y do campo elétrico para demultiplexar a polarização [31][32].

Posterior a equalização, utiliza-se a compensação da estimativa de frequência (FOE, *Frequency Offset Estimation*), que tem a finalidade de estimar a diferença entre a frequência do sinal recebido com a frequência do oscilador local, ou seja, essa é a etapa que o comprimento de onda transmitido é recuperado. Por fim, no DSP é utilizado um algoritmo de estimativa da fase de portadora (CPE, *Carrier Phase Estimation*), que é capaz de compensar o ruído de fase proveniente do processo de emissão estimulada do laser, ou seja, esse processo é o responsável pela recuperação da fase do sinal transmitido [31][32].

Conforme ilustrado na Figura 6, após o DSP, aplicou-se um componente de decisão que é o responsável por analisar os bits recebidos e tomar uma série de decisões, de forma a estabelecer qual símbolo foi transmitido. Tendo em vista que a constelação DP 16-QAM é recuperada, realizou-se o processo inverso para obter a informação transmitida. Portanto após a utilização dos procedimentos de decisão, aplicou-se em cada polarização, decodificadores de sequência QAM e por fim aplicou-se um conversor paralelo para série, dessa forma a sequência de bits que foram transmitidos são recuperados ao final do sistema [30] [31].

2.3 Fibra Óptica Submarina

As fibras ópticas submarinas são responsáveis por pelo menos 95% do tráfego de informações entre diferentes países e continentes segundo a *HMN Technologies*. No início de 2021 estavam ativos aproximadamente 426 cabos submarinos, correspondendo a 1,3 milhões de quilômetros ao redor do mundo [33][34]. Tendo em vista as dimensões e importâncias dessas redes, cada vez mais houve a preocupação de reduzir ainda mais a atenuação das fibras ópticas, buscando a transmissão de ultralongas distâncias com cada vez uma menor quantidade de spans nas redes, reduzir os efeitos não lineares ao sistema e diminuir custos [16][25][26].

Visando a quantidade de dados que trafegam por essas redes submarinas, as longas distância desses enlaces e sob as condições ambientais conforme listadas pela ITU-T em [35], as quais esses dispositivos são implantados é de fundamental importância o planejamento dos sistemas submarinos, que são realizados para ter uma vida útil de pelo menos 25 anos, prevendo que não será necessário praticamente nenhum reparo por falha interna, esse fator é muito importante devido ao tempo necessário para realizar esses tipos de operações no mar e que a interrupção desses tráfegos, comumente acarreta em uma perda significativa de dados. Por essa razão é fundamental manter a confiabilidade da rede mesmo com a degradação natural dos enlaces e muitas das vezes prevendo ter capacidade para aderir novos canais e ou equipamentos na transmissão e recepção das redes para aumentar o tráfego de dados [25][26][35].

Tendo em vista a transmissão em longas distâncias, optou-se por utilizar nesse trabalho uma fibra óptica submarina Z-Plus 150 da fabricante japonesa *Sumitomo*, as características desta e de outros modelos de cabos ópticos submarino de ultra baixa atenuação podem ser visualizadas pela Tabela 1. A escolha por utilizar esta fibra, justifica-se por possuir uma atenuação menor em dB/km do que outros modelos comerciais estudados. Além desse fato, as fibras ópticas com maiores áreas efetivas são menos susceptíveis aos efeitos não lineares, como SPM e XPM conforme citadas em [3][36].

Tabela 1 - Características de fibras ópticas submarinas *Sumitomo* em 1550 nm.

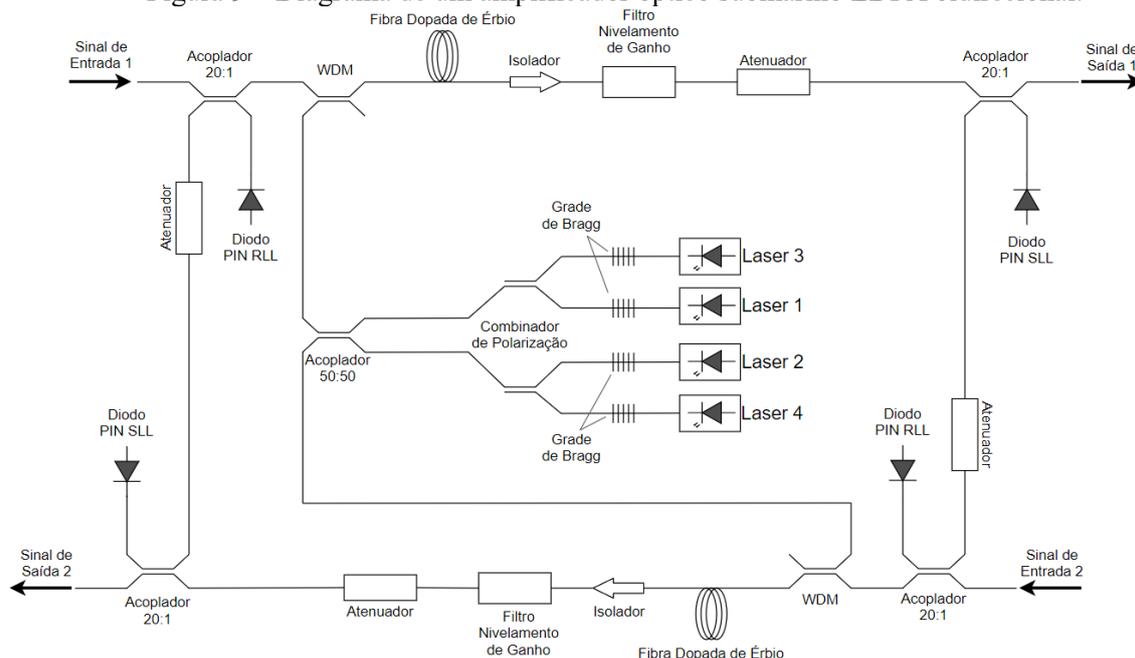
	Fibra Z	Fibra Z-Plus	Fibra Z-Plus 130	Fibra Z-Plus 150
ITU-T	G.654.C	G.654.B, .D	G.654.D	G.654.D
A_{eff} (μm^2)	78	112	130	150
Atenuação (dB/km)	0,171	0,168	ULL : 0,152	0,150
Dispersão Cromática (ps/nm*km)	18,5	20,5	20,5	20,9
Derivada da Dispersão (ps/nm ² *km)	0,06	0,06	0,06	0,06
Dispersão dos Modos de Polarização (PMD)	0,02	0,02	0,02	0,02

2.4 Amplificador

A implantação dos amplificadores ópticos são um fator chave no desenvolvimento de um sistema submarino, uma vez que é o elemento que permitirá a propagação em longas distâncias. No entanto, a utilização desses dispositivos introduz um ruído ao sinal, a intensidade do ruído aplicado na luz é uma função linear da figura de ruído (NF, *Noise Figure*) de cada amplificador. Portanto, o dimensionamento dos *spans* em uma rede submarina e a equalização dos sinais são fundamentais para garantir a confiabilidade do sistema óptico por pelo menos 25 anos, conforme as recomendações da ITU-T em [35], devido a esse fator os links da rede devem suportar a agregação de novos serviços prevendo o crescente aumento no tráfego de dados. Dessa forma, é necessário a otimização das implantações dos amplificadores. Neste trabalho utilizou-se amplificadores com NF igual a 4,5 dB, esse valor foi escolhido por ser um valor intermediário conforme descrito em [25], referente as características dos amplificadores submarinos aplicados na banda C. A seguir será descrito de forma geral como é o funcionamento de um repetidor submarino [25][35].

A Figura 9 mostra o diagrama de um repetidor submarino EDFA bidirecional e os principais elementos que compõem esse dispositivo. Nessa configuração, os quadros lasers de bombeio emitem um sinal que passará uma grade de Bragg, que tem a função de estabilizar o comprimento de onda de bombeio, que serão combinados em duas etapas por acopladores ópticos. Um fator importante é que na saída do acoplador tem-se duas ondas, a razão disso é que o bombeio será multiplexado por WDM tanto ao sinal de transmissão, representado pela Figura 9 como “Sinal 1” quando ao sinal de recepção, representado como “Sinal 2” [25].

Figura 9 – Diagrama de um amplificador óptico submarino EDFA bidirecional.



Fonte: Modificada pelo autor de [25].

Os sinais de entrada no repetidor submarino, passam por um acoplador óptico que permite a passagem de 95% a 98% da potência da onda que será multiplexado com a potência de bombeio, o restante é desviado para um outro caminho que contém um diodo PIN capaz de receber os níveis de luz (RLL, *Received Light Level*), que tem a função de monitorar os sinais de dados e de supervisão recebidos e são utilizados para ajustar a potência nos lasers de bombeio quando necessário [25].

Uma vez que os comprimentos de ondas dos canais transmitidos e dos lasers dos amplificadores são multiplexados, esses sinais são conectados em uma fibra dopada de Érbio. É durante essa etapa que ocorre a amplificação dos dados, esse processo consiste em elevar a energia dos íons de um material, para níveis de energia mais elevados do que seu estado fundamental, é importante destacar que essa energia é quantizada, ou seja, não admite qualquer valor, permitindo apenas pacotes discretos, que são níveis necessários para se alcançar a emissão de luz também conhecida como fóton. A emissão de um fóton se dá pela transição dos elétrons de um elemento entre as orbitas do núcleo [25]. Existem diversos elementos denominados de “Terras-Raras” que uma fibra pode ser dopada e para cada elemento é possível amplificar uma banda diferente, sendo o Érbio muito utilizado na amplificação de sinais na banda C, C+ e L [25].

Um isolador de baixa perda é aplicado após a fibra dopada, esse dispositivo é utilizado para evitar a passagem de uma luz refletida. Em seguida aplica-se um filtro de nivelamento de ganho ao sinal, que são utilizados corrigir uma inclinação no ganho da amplificação, que possui

uma dependência do comprimento de onda, dessa forma a potência de cada canal é nivelada. Para que tenha-se uma potência de saída constante ao final da amplificação é aplicado um atenuador. Esse processo também pode ser obtido utilizando um amplificador com um atenuador óptico variável (VOA, *Variable Optical Attenuator*). Por fim utiliza-se um diodo para enviar um sinal de luz (SLL, *Send Light Level*), esses dados emitidos pelo diodo são utilizados pelos circuitos de controle, que monitoram e atuam em tempo real, ajustando os ganhos e controlando o desempenho do sistema em cada repetidor. O sinal amplificado é acoplado a luz emitida do diodo SLL e enviada ao sistema [25].

Conforme exibido na Figura 9, um par de fibras conecta os acopladores dos sinais de entrada com os de saída e são utilizados para o monitoramento, atuação no controle de desempenho, detecção de falhas que podem ser localizadas com precisão. Outro fator muito importante é que a cada filtro de nivelamento de ganho, introduz erros que vão se acumulando durante a propagação e podem provocar desvios no nivelamento entre os canais. Portanto são introduzidos equalizadores na rede a cada número de spans, esse intervalo pode variar conforme o planejamento realizado do sistema óptico submarino [25].

No capítulo a seguir será apresentado o método numérico perturbativo do ruído Gaussiano, o qual, será utilizado para o estudo e predição dos enlaces ópticos submarinos propostos neste trabalho.

Capítulo 3

Modelo Analítico do Ruído Gaussiano

A constante e drástica evolução das redes de transporte ópticas possibilitou na última década a migração de canais como modulações não coerentes com taxas de 10 Gbps, com codificação on-off key, para canais de 100G, 200G, 400G, 800G e 1,2 Tbps utilizando respectivamente as modulações coerentes por desvios de fase em quadratura em duas polarizações (DP QPSK, *Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying*), por desvio de amplitude e quadratura em duas polarizações (DP 16-QAM, *Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying*), por desvio de amplitude e quadratura em duas polarizações com duas portadoras (DC-DP 16-QAM, *Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying*) e multiportadoras por divisão de frequências ortogonais (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [37] e [38]. Além das modulações citadas acima, em [39] e [40] é demonstrado como as modulações de formato probabilístico (*Probabilistic Constellation Shaping*) são capazes de aumentar as distâncias alcançadas pelas redes ópticas de transporte. Os casos anteriores contribuíram para atender à crescente e exponencial demanda por banda, devido a popularização de serviços de telecomunicações em todo o mundo [19]. Tal inequívoca evolução só se tornou possível devido a microeletrônica e dos processadores digitais de sinais [41]. Desta forma, os efeitos degradantes impostos pela própria fibra óptica ao campo elétrico, portador da informação, passaram a ser compensados eletronicamente, por meio do processamento de sinais realizados por *chips* dedicados [37].

Assim, a compensação de efeitos lineares da dispersão de velocidade de grupo (GVD, *Group Velocity Dispersion*) e a dispersão modo de polarização (PMD, *Polarization Mode Dispersion*) passaram a ser realizadas de forma eletrônica nos receptores, eliminando a necessidade da utilização de fibras ópticas de compensação de dispersão e controladores de polarização ao longo das redes de transporte ópticas. Além da compensação dos efeitos mencionados acima, tornou-se possível a compensação dos efeitos não-lineares oriundos do coeficiente de kerr, tais como a auto modulação de fase e a modulação e fase cruzada [37] [42].

A ausência do gerenciamento da GVD por meio de fibras compensadoras de dispersão (DCF, *Dispersion Compensation Fiber*) nas redes ópticas atuais, trouxe uma vantagem que é possibilidade da utilização de modelos matemáticos analíticos não -lineares para a predição e

comissionamento de tais redes, possibilitando projetos muito mais simples, rápidos, flexíveis e mais baratos se comparados com projetos que utilizam os simuladores comerciais existentes no mercado [11], [12] e [7].

Os métodos analíticos consideram as interferências devido aos efeitos não-lineares como perturbações muitas vezes menores que os sinais, manifestando-se como um ruído, as quais, apresentam como funções densidade de probabilidade uma Gaussiana. Tais métodos perturbativos não foram propostos recentemente, portanto, não são novos e em sua maioria derivam de duas aproximações: (a) Da série de Volterra (VS, *Volterra Series*) e (b) do efeito não-linear de mistura de quatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*).

A aproximação de modelo analítico baseado na mistura de quatro ondas, descreve o batimento não-linear das componentes espectrais de um determinado sinal durante a propagação por uma fibra óptica e é expressa de uma forma bem parecida com a equação clássica do FWM. Ainda em 1993 [11] definiu-se a densidade espectral de potência não-linear baseada na mistura de quatro ondas. Já a aproximação VS data de 1997 e consiste na solução aproximada da equação não linear de Schroedinger, no domínio da frequência, por meio de uma série reduzida de Volterra. Em 2002 esta mesma série foi utilizada para definir a atual densidade espectral de potência não-linear, como um ruído Gaussiano aditivo [43]. Uma terceira opção de aproximação para os modelos analíticos no domínio do tempo, foi proposta por [44]. Entretanto, tal aproximação se mostrou muito limitada em relação aos efeitos não-lineares intracanal.

Apesar de propostos e publicados há quase duas décadas, tais métodos não foram aplicados a época, pois não apresentavam boa acurácia para os sistemas com compensação da dispersão tradicionais, por meio de DCF. Este capítulo apresentará em detalhes a teoria envolvida no método perturbativo do ruído Gaussiano baseado no FWM proposto em [11 - 12] para a predição de redes ópticas que utilizam canais coerentes monoportadoras. Este capítulo está organizado da seguinte forma: primeiro será apresentado o referencial teórico do método GN e as equações para o cálculo da OSNR, com o intuito de analisar o desempenho de sistemas ópticos.

3.1 Fórmula de Referência do Modelo Analítico Gaussiano

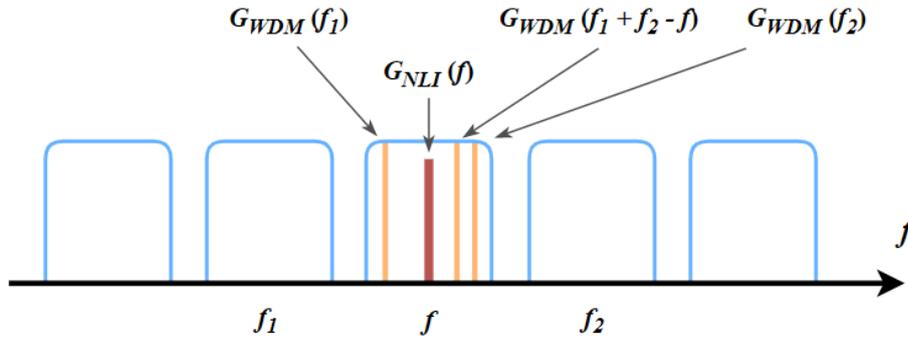
O modelo analítico não-linear apresentado neste capítulo e posteriormente utilizado para predições de enlaces submarinos, considera que cada *span* de um determinado enlace apresenta atenuações idênticas e que são exatamente compensadas por amplificadores ópticos. A Equação

1 mostra a fórmula de referência do modelo analítico Gaussiano (GNRF, *GN Model Reference Formula*). A densidade espectral de potência do ruído Gaussiano não-linear, acumulada ao final do enlace é determinada pela Equação (3.1).

$$G_{NLI}(f) = \frac{16}{27} \gamma^2 L_{\text{eff}}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{WDM}(f_1) G_{WDM}(f_2) G_{WDM}(f_1+f_2-f) \rho(f_1, f_2, f) \chi(f_1, f_2, f) df_2 df_1. \quad (3.1)$$

Sendo γ e L_{eff} o coeficiente de não-linearidade e comprimento efetivo da fibra óptica. $G_{WDM}(f_1)$, $G_{WDM}(f_2)$, $G_{WDM}(f_1+f_2-f)$ são respectivamente a densidade espectral do canal na frequência f_1 , a densidade espectral do canal na frequência f_2 e a densidade espectral do produto resultado do processo de FWM na frequência (f_1+f_2-f) . A Figura 10 ilustra a interação entre os canais resultando na densidade espectral do ruído não-linear.

Figura 10 - Geração de $G_{NLI}(f)$ devido ao processo de mistura de quatro ondas.



Fonte: Modificada pelo autor de [12].

Pode-se interpretar facilmente modelo GNRF, considerando o batimento não-linear dos canais f_1 e f_2 ao propagarem pela fibra óptica, o que reflete na presença da integral dupla e fator de eficiência do processo de FWM, capaz de criar interferências entre os canais originais, resultando em $f_3 = (f_1+f_2-f)$. Tal fator de eficiência é descrito pela Equação (3.2).

$$\rho(f_1, f_2, f) = \left| \frac{1 - e^{-2\alpha L_s} e^{j4\pi^2 \beta_2 L_s (f_1 - f)(f_2 - f)}}{2\alpha - j4\pi^2 \beta_2 (f_1 - f)(f_2 - f)} \right| L_{\text{eff}}^{-2}, \quad (3.2)$$

Sendo α , β_2 e L_s respectivamente a atenuação da fibra óptica em dB/km, o coeficiente de dispersão de primeira ordem em ps²/nm e o comprimento do *span* em km. Já a Equação (3.3) mostra o fator de interferência não-linear coerente, entre os canais, no receptor, produzida em cada um dos spans.

$$\chi(f_1, f_2, f) = \frac{\sin^2(2N_s \pi^2 (f_1 - f)(f_2 - f) \beta_2 L_s)}{\sin^2(2\pi^2 (f_1 - f)(f_2 - f) \beta_2 L_s)}, \quad (3.3)$$

3.2 Relação Sinal Ruído Óptica

A relação sinal ruído óptica é o principal parâmetro utilizado nas redes ópticas para quantificar o grau de interferência entre o ruído e o sinal. Tal parâmetro é definido como a relação entre a potência do sinal e do ruído em uma determinada banda. Para o modelo GNRF a OSNR total ao final de um determinado enlace é definida pela Equação (3.4)

$$\text{OSNR} = \frac{G_{\text{WDM}}}{G_{\text{ASE}} + G_{\text{NLI}}}, \quad (3.4)$$

Sendo respectivamente G_{WDM} , G_{ASE} e G_{NLI} as densidades espectrais do canal WDM, do ruído ASE e a Ruído Gaussiano não-linear, todas dadas em Hz/W. Define-se, portanto o parâmetro G_{WDM} pela relação entre a potência do canal WDM e a sua banda, como mostra a Equação (3.5)

$$G_{\text{WDM}} = \frac{P_{\text{ch WDM}}}{B_{\text{ch WDM}}}. \quad (3.5)$$

Já a banda do canal WDM é dado pela Equação (3.6)

$$B_{\text{ch WDM}} = R_s(1 + \alpha), \quad (3.6)$$

Sendo R_s a taxa de símbolo do canal WDM e a α o *roll-off* do filtro do multiplexador ou do comutador seletivo de comprimentos de ondas (WSS, *Wavelength Selective Switching*).

A densidade espectral do ruído espontâneo dos amplificadores G_{ASE} por sua vez é definida pela Equação (3.7)

$$G_{\text{ASE}} = 2 * NF * (G - 1) h \nu_0, \quad (3.7)$$

Sendo P_{ASE} a potência do ruído de emissão espontânea após o primeiro amplificador do enlace, definida pela Equação (3.8)

$$P_{\text{ASE}} = 2n_{\text{sp}} h \nu_0 (G - 1) \Delta \nu_0. \quad (3.8)$$

As variáveis $2n_{\text{sp}}$, h , G , ν_0 e $\Delta \nu_0$ são respectivamente os parâmetros relacionados ao ruído de emissão espontânea, a constante de Planck, o ganho do amplificador, que deve ser exatamente igual a atenuação do primeiro span e a banda de análise do ruído tipicamente igual

a 12,5GHz. Para o cálculo de $2np$ é necessário o conhecimento da figura de ruído dos amplificadores definida na Equação (3.9).

$$NF = \frac{1+2_{sp}(G-1)}{G}. \quad (3.9)$$

Para as redes ópticas mono portadoras, com atenuação do primeiro $span \geq 7dB$, $R_s \geq 28$ GBaud/s, $(B_{chWDM} / \Delta f) \geq 0.25$ e $\beta_2 \geq 4$ p²/km, pode-se definir a densidade espectral do ruído não-linear para um canal central f_0 , oriunda das Equações (3.1), (3.2) e (3.3), pela Equação (3.10)

$$G_{NLI}(0) \approx \frac{8}{27} \frac{\gamma^2 G_{WDM}^3 L_{eff}^2}{\pi \beta_2 L_{eff,a}} \operatorname{asinh} \left(\frac{\pi^2}{2} \beta_2 L_{eff,a} B_{ch}^2 N_{ch}^2 \frac{B_{ch}}{\Delta f} \right), \quad (3.10)$$

Sendo respectivamente B_{ch} , Δf e N_{ch} a banda do canal, o espaçamento entre canais e o número de canais.

Por fim, a definição da relação sinal ruído total no final do enlace com N spans de comprimentos iguais é definida pela Equação (3.11)

$$OSNR_{total} = \frac{G_{WDM}}{G_{ASE} N_s + G_{NLI}(0) N_s^{1+\varepsilon}}, \quad (3.11)$$

Sendo N_s o número de spans e ε o fator de aproximação que é função da frequência e dos demais parâmetros do sistema. Tal fator de aproximação é definido pela Equação (3.12)

$$\varepsilon \approx \frac{3}{10} \log_e \left(1 + \frac{6}{L_s} \frac{L_{eff,a}}{\operatorname{asinh} \left(\frac{\pi^2}{2} \beta_2 L_{eff,a} B_{ch}^2 [N_{ch}]^2 \frac{B_{ch}}{\Delta f} \right)} \right). \quad (3.12)$$

No próximo capítulo será apresentado os resultados referentes aos projetos de sistemas ópticos submarinos com aplicação do método perturbativo do ruído gaussiano.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

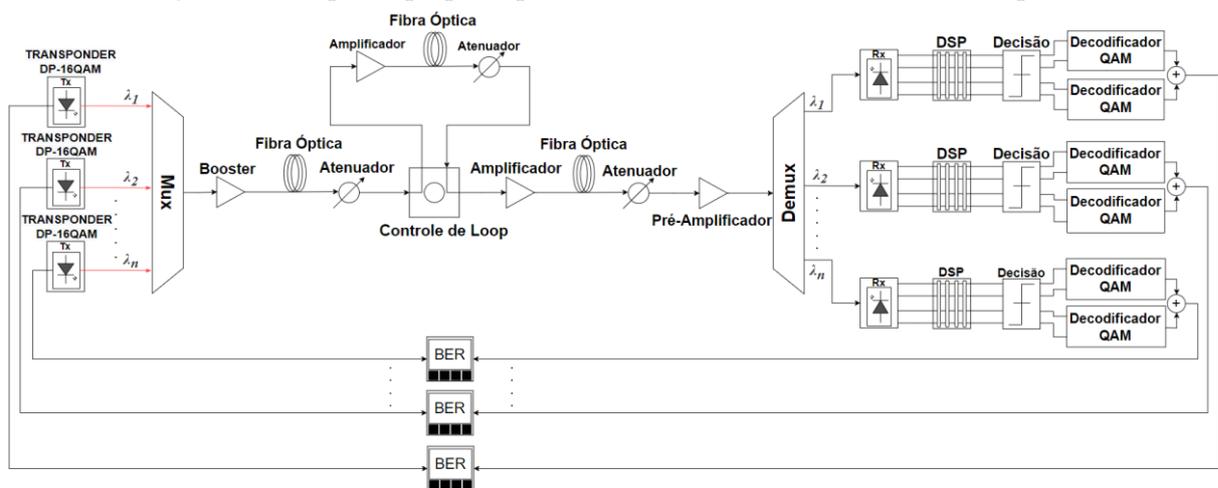
Serão apresentados neste capítulo, os cenários, as simulações, as análises e os resultados obtidos ao aplicar as equações referentes ao modelo do ruído gaussiano mostradas na capítulo 3, no software matemático Octave®. Também serão exibidos uma comparação dos desempenhos de alguns sistemas ópticos que foram simulados no software OptiSystem®, com os resultados obtidos ao aplicar as equações do modelo GN. Os cenários estudados, consiste em avaliar as predições de um sistema de transmissão ópticos, para 20, 40 e 80 canais, considerando uma fibra com grande área efetiva em spans de 50, 60, 70 e 80 quilômetros.

4.1 Simulações do sistema óptico submarino

4.1.1 Setup de Simulação

Nesta seção serão apresentados os setups utilizados para simular as redes ópticas submarinas. Para tal, utilizou-se o software OptiSystem®, v.18.0, de serial ALJWM-IYFN8, customer ID 7e1dbc77-4bb6-9050-ea28971e306, FCID 53ecfd25-9f12-4461-b194-cbe90bfaTb80. A Figura 11 mostra a arquitetura do enlace óptico submarino ponto-a-ponto construído no OptiSystem®, utilizado para o cenário de transmissão.

Figura 11 – Esquema proposto para criação dos cenários de transmissão óptica.



Fonte: Modificada pelo autor, dos componentes do OptiSystem®.

Tal cenário é composto por transmissores com taxa de transmissão de 200 Gbps, os quais, utilizam a modulação 16QAM em dupla polarização e estão alocados na Banda C. Foram

realizadas simulações com 20, 40 e 80 canais espaçados respectivamente por 200 GHz, 100 GHz e 50 GHz, estando o primeiro canal na $f_1 = 192,1$ THz.

Dessa forma, os sinais transmitidos são multiplexados, aplicados a um amplificador de potência de figura de ruído $NF = 4,5$ dB e ganho configurado apenas o suficiente para compensar as atenuações do primeiro span. Após o amplificador os sinais transmitidos se propagam em uma fibra óptica submarina, Z-Plus, de área efetiva de 150 um^2 , da fabricante japonesa *Sumitomo*. Esse modelo possui atenuação igual a $0,15$ dB/km, dispersão cromática de $20,9$ ps/nm.km, derivada da dispersão igual a $0,06$ ps/nm².km e $PMD = 0,02$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Um atenuador é inserido em cada trecho de fibra para representar possíveis perdas de conexão, degradação e emendas. Em seguida inseriu-se um loop, que nada mais é do que uma ferramenta do software OptiSystem®, para simplificar a montagem e criação de redes ópticas. Tal ferramenta permite que um determinado trecho seja executado N vezes. Uma vez que os parâmetros da fibra óptica foram configurados, com os dados apresentados anteriormente, realizou-se simulações com spans igualmente espaçados de 50, 60, 70 e 80 quilômetros.

Após os receptores e acopladores híbridos 2×4 de 90° , os sinais são processados por um processador digital, capaz de compensar a dispersão cromática, a dispersão de modo de polarização e estimar as fases e frequências dos sinais transmitidos.

Finalizados os processos de recepção e detecção utiliza-se um dispositivo de medição da taxa de erro de bits, capaz de comparar as sequências de bits transmitidos e recebidos. Na próxima seção serão apresentadas comparações entre as simulações do um sistema óptico submarino descrito acima e o método analítico do ruído Gaussiano, com o objetivo de validar tal método para a predição de enlace ópticos submarinos.

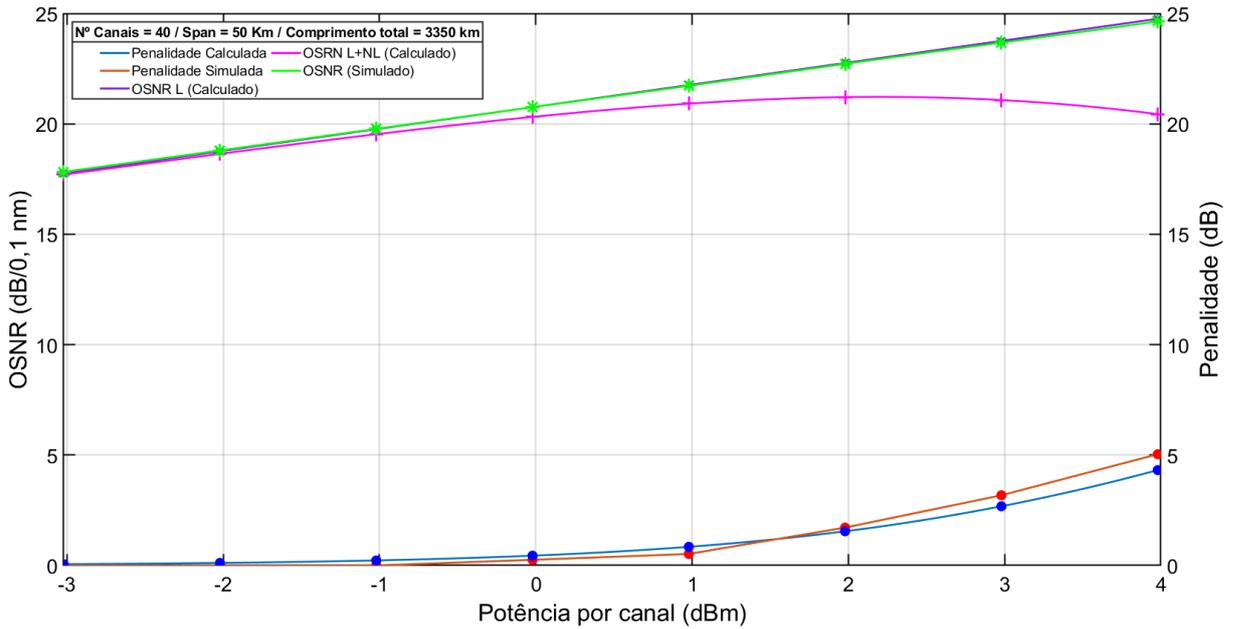
4.1.2 Comparação entre as simulações do sistema óptico submarino e o método analítico do ruído Gaussiano

A validação do método analítico do ruído gaussiano foi realizada por meio de comparação entre simulações e as soluções das equações referentes ao método analítico, separadas em duas partes. A primeira etapa consistiu nas modelagens dos enlaces submarinos utilizando o software OptiSystem®, conforme explicado na seção anterior. Uma vez que os cenários foram configurados, executaram-se diversas simulações no software, para coletar os dados de desempenho das redes ópticas simuladas. Na segunda etapa foram construídas as soluções matemáticas de forma equivalente aos sistemas ópticos submarinos que foram simulados no software.

Uma vez que as simulações e os resultados do método do ruído gaussiano foram coletados, alguns dados foram analisados para garantir a confiabilidade do modelo estudo. Realizou-se a comparação dos valores de OSNR medidas na recepção do enlace óptico, no entanto, só esse dado não é suficiente para validação do método GN, isso porque a OSNR coletada na recepção do software OptiSystem® apenas informa valores de linearidade. Para complementar esse resultado e também validar o impacto dos efeitos não-lineares no sistema, analisou-se a penalidade provocada pelo sistema. Para calcular a penalidade das simulações, primeiramente montou-se em uma simulação um sistema back-to-back (B2B), em que foram processadas diversas interações da rede com diversas combinações da OSNR de transmissão e do ganho dos amplificadores, dessa forma conseguimos coletar o BER da rede em cada iteração. O sistema back-to-back, consiste na confecção de um sistema transmissão e recepção sem a utilização de fibras ópticas, com isso é possível monitorar o BER do sistema desconsiderando a propagação do sinal. Tendo realizado esses procedimentos, é possível compara a BER obtida das redes simuladas com os resultados do B2B, e a diferença entre esses resultados é a penalidade provocada pelo sistema na rede. Portanto para comparação dos ambientes simulados com os cálculos do modelo do ruído gaussiano foram utilizados tanto os valores da OSNR e os valores das penalidades.

Algumas topologias de rede foram elaboradas para validar o modelo do ruído gaussiano, mesmo após alteração de pontos críticos da rede, como distância dos spans, distância total do sistema óptico e a quantidade de canais inseridos na rede. A Figura 12 ilustra o gráfico da OSNR (dB / 0,1 nm) e da penalidade (dB) em função da potência por canal (dBm), dessa forma é possível verificar as diferenças das OSNRs calculadas pelo modelo matemático com a OSNR simulada no OptiSystem®, também pode-se verificar a diferença entre as penalidades calculadas e simuladas. A Figura 12 representa um sistema óptico submarino utilizando uma taxa de 200 Gbps, modulação DP-16QAM, contendo 40 Canais em que o span é igual a 50 km e contendo um total de 3350 km de fibra óptica conectados.

Figura 12 – Comparação da OSNR e penalidade em função da Potência para 40 canais DP-16QAM.

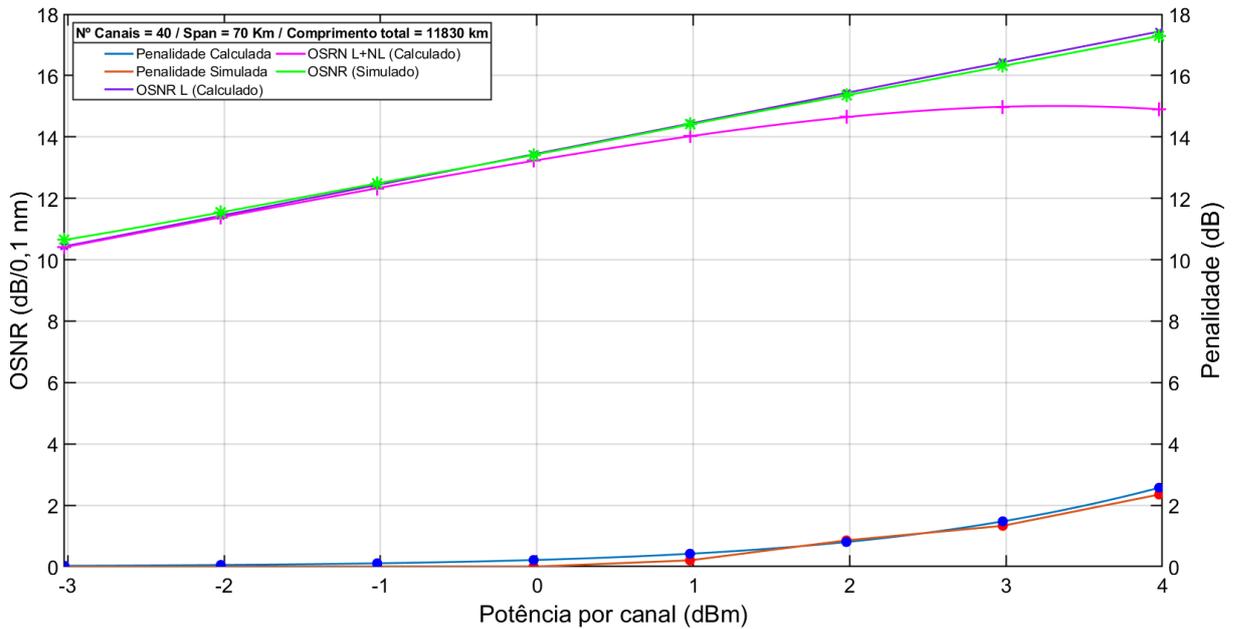


Fonte: O autor.

Analisando os resultados do gráfico acima, é perceptível que as medidas calculadas pelo método GN foram próximas aos valores obtidos pelas simulações da rede óptica, uma das informações que comprova este resultado é que a diferença das penalidades calculadas e simuladas são inferiores a 0,5 dB. Essa margem na penalidade se manteve em todos os cenários testados, no entanto os valores de OSNR também mantem uma diferença inferior a 0,5 dB apenas quando analisados os efeitos lineares intrínsecos ao sistema, conforme pode ser visto nos resultados exibidos a seguir.

A Figura 13 mostra um gráfico da OSNR (dB / 0,1 nm) e da penalidade (dB) em função da potência por canal (dBm) de um sistema óptico submarino configurado com taxa de 100 Gbps, modulação QPSK, em polarização dupla, contendo 40 Canais, spans de 70km e 170 amplificadores totalizando 11830 km de distância.

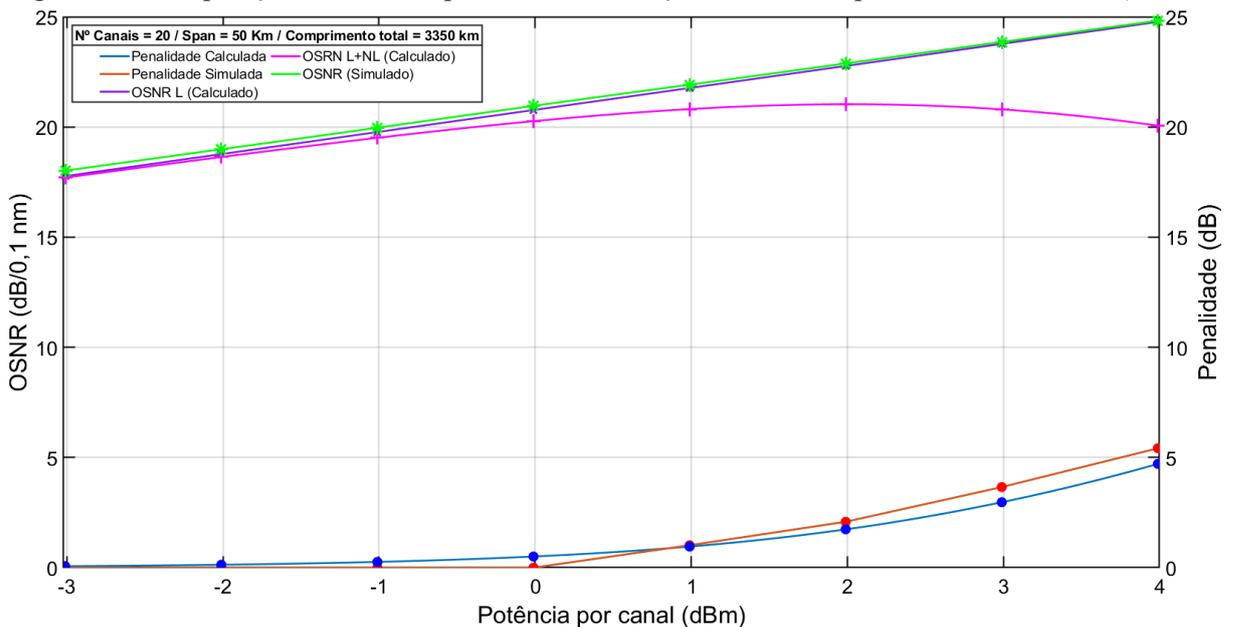
Figura 13 - Comparação da OSNR e penalidade em função da Potência para 40 canais DP-QPSK



Fonte: O autor.

Outro parâmetro importante para validar o método é a variação do span do enlace óptico, essa configuração é muito relevante, pois quanto maior o enlace maior a degradação e inserção de erros podem ser inseridos no sistema. A Figura 14 mostra um gráfico da OSNR (dB / 0,1 nm) e da penalidade (dB) em função da Potência por canal (dBm), de um sistema óptico submarino de 200 Gbps por canal, modulados em dupla polarização 16QAM contendo 20 canais em que o span é igual a 50 km e uma distância de 3350 km de comprimento do enlace.

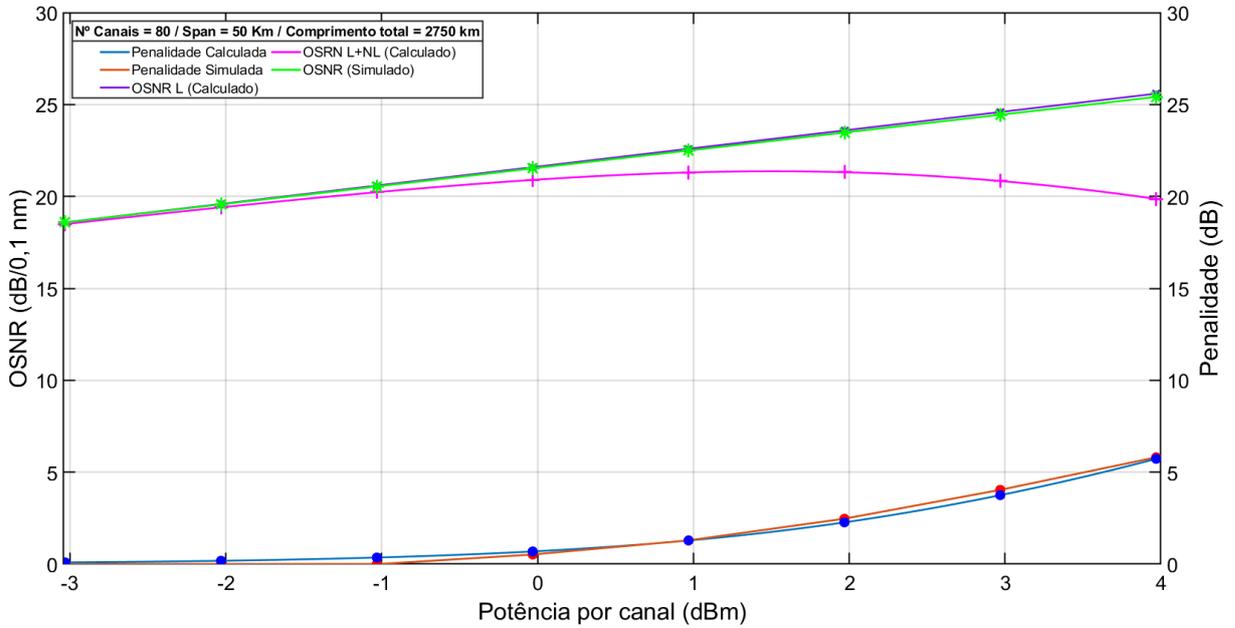
Figura 14 - Comparação da OSNR e penalidade em função da Potência para 20 canais DP-16QAM



Fonte: O autor.

A Figura 15 exibe um gráfico da OSNR (dB / 0,1 nm) e da penalidade (dB) em função da Potência por canal (dBm), corresponde a uma rede óptica submarina configurado com uma taxa de 200 Gbps, modulados em DP-16QAM, contendo 80 Canais, os spans igualmente espaçados em 50 km e com uma distância total da rede de 2750 km.

Figura 15 - Comparação da OSNR e penalidade em função da Potência para 80 canais DP-16QAM



Fonte: O autor.

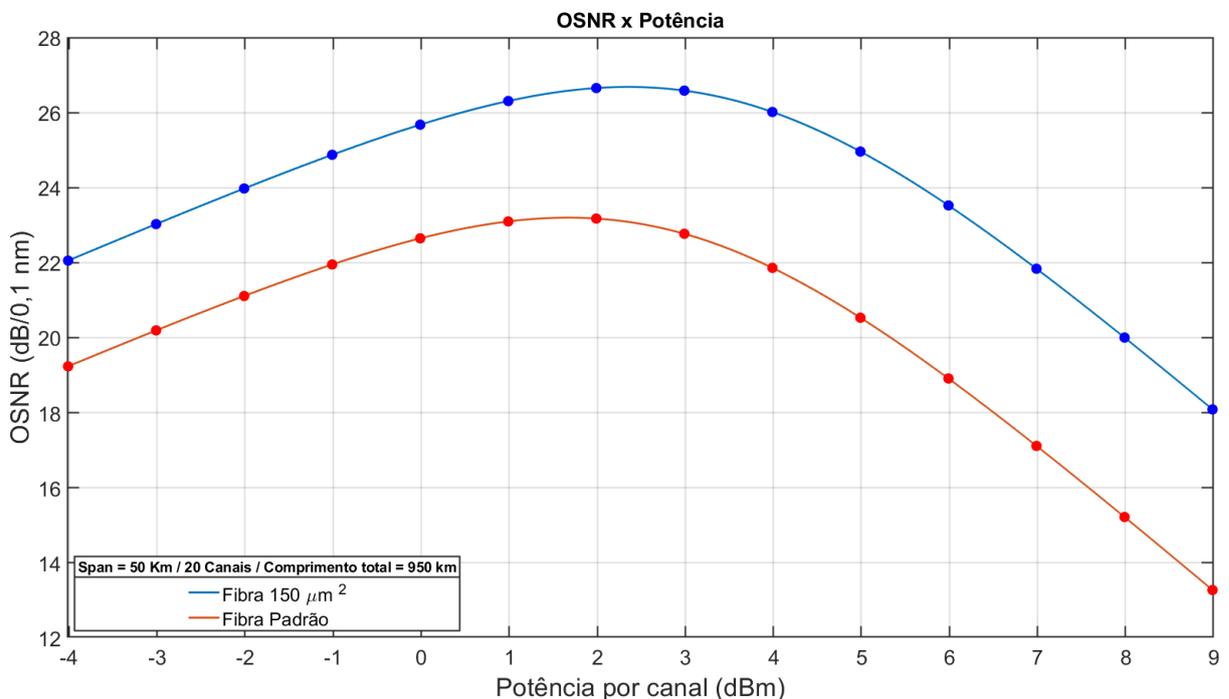
Analisando os resultados apresentados neste capítulo, observou-se que os resultados obtidos pelo modelo do ruído gaussiano, foram muito próximos dos resultados adquiridos nas simulações no OptiSystem®. Independentemente da quantidade de canais multiplexados, do comprimento da rede e da distância de cada span, é importante frisar que os cálculos aplicados consideram que os spans são sempre igualmente espaçados. Além desses parâmetros também testou-se a aplicação de tal método nas modulações DP-QPSK e DP-16QAM. Em todos os casos analisados, a diferença entre os valores de OSNR linear e das penalidades obtidos foram inferiores a 0,5 dB, portanto é possível validar a aplicação do modelo do ruído gaussiano, na predição do desempenho de sistemas ópticos submarinos.

Na próxima seção serão comparados os resultados de desempenho da rede, para um sistema óptico submarino utilizando a fibra óptica padrão, com um sistema utilizando cabos ópticos com grande área efetiva de terceira geração. Esses resultados foram obtidos pelas equações do método do ruído gaussiano.

4.2 Fibra óptica

Uma das informações fundamentais necessárias para aplicar a predição do desempenho óptico de um sistema, é estabelecer os parâmetros de caracterizam a fibra óptica. A Figura 16 exibe um gráfico da OSNR (dB / 0,1 nm) em função da Potência por canal (dBm), em que foram aplicados o método GN explicado no capítulo três, comparando um sistema óptico utilizando a fibra padrão de área efetiva igual a $80 \mu\text{m}^2$ com uma fibra com grande área efetiva igual a $150 \mu\text{m}^2$ em um sistema com 20 canais em que o span é igual a 50 km e um comprimento de 950 km.

Figura 16 – Comparação da OSNR em função da Potência por canal, para diferentes tipos de fibras.



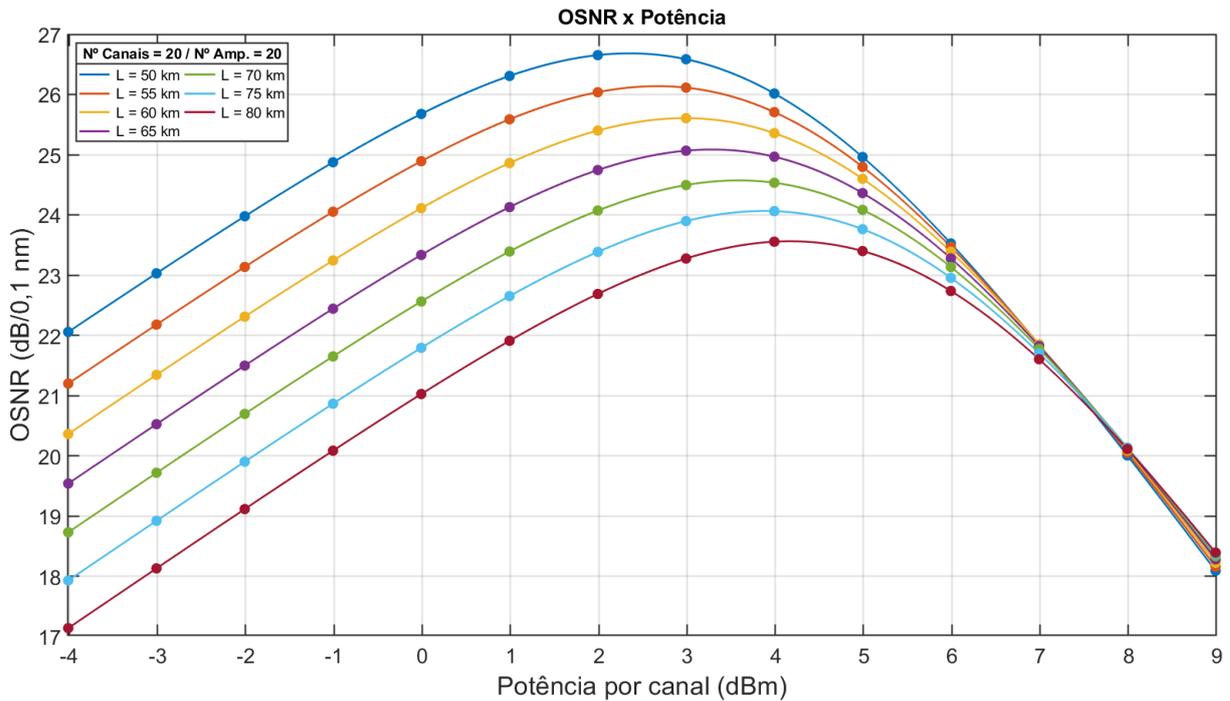
Fonte: O autor.

A Figura 16 comprova que a simples utilização de uma fibra óptica com maior área efetiva, torna o enlace menos susceptíveis a efeitos não lineares e possui de forma geral uma melhor relação sinal ruído óptico devido a uma melhor distribuição do sinal transmitido.

Após os resultados obtidos conforme mostrado na Figura 16, definiu-se que para os demais experimentos e simulações realizados neste trabalho de conclusão de curso, utilizará a fibra de grande área efetiva. Mais informações referentes as características de algumas fibras submarinas incluindo o modelo Z-Plus $150 \mu\text{m}^2$ da fabricante japonesa *Sumitomo*, estão presentes no tópico 2.3 deste trabalho.

Uma vez que os parâmetros do meio de transmissão estiveram estabelecidos, realizou-se uma comparação do desempenho de um enlace óptico submarino, A Figura 17 exibe um gráfico da OSNR (dB / 0,1 nm) em função da Potência por canal (dBm), comparando diferentes spans em um sistema com 20 canais e contendo 20 amplificadores ao longo da rede.

Figura 17 – OSNR (dB / 0,1 nm) x Potência por canal (dBm): 20 Canais e 20 Amplificadores.



Fonte: O autor.

Importante destacar dois fatores, o primeiro é o fato de quanto menor o comprimento do span, melhor é a OSNR obtida na recepção da rede, isso se deve ao fato de que quanto maior o span, mais atenuada são as potências dos canais, portanto menor é a relação sinal ruído óptica ao final de cada trecho de fibra. No entanto, o segundo fator que pode ser observado na Figura 17 é que os valores de OSNR tendem a convergir em valores próximos, isso ocorre devido ao fato que com o aumento da potência, alguns efeitos não lineares começam a predominar no enlace, até atingir o limiar do que pode ser suportado pelo comprimento efetivo da fibra óptica.

Portanto dos cenários apresentados para se chegar a uma distância mais longa, o melhor resultado é diminuir o comprimento dos spans, no caso da Figura 17 o ideal é utilizar um span de 50 km. Em contrapartida utilizar distâncias entre estações menores aumentam o custo de projeto uma vez que mais estações de amplificação serão necessárias na rede óptica. Tendo isso em vista, o método GN facilita na aplicação de cálculos para diversos cenários e analisar as diversas configurações possíveis para atender uma determinada demanda e ajuda a encontrar uma solução de mais baixo custo ou melhor desempenho óptico do sistema submarino.

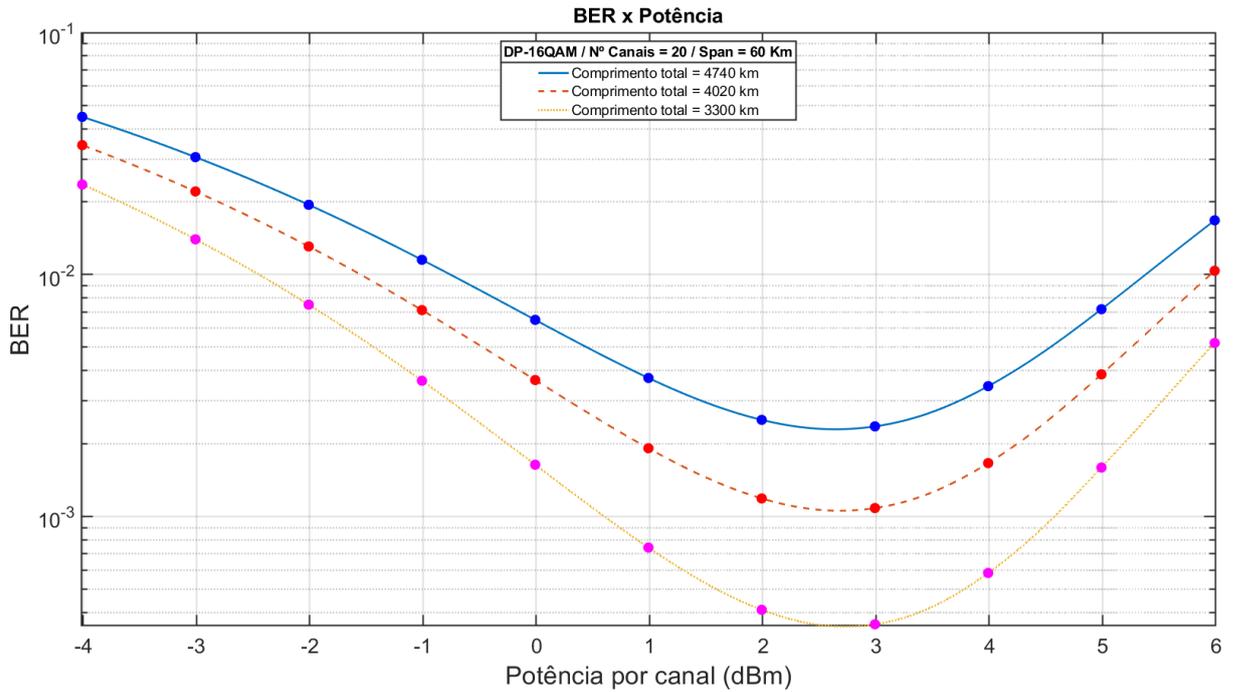
4.3 BER x Potência por canal.

Nesta seção serão apresentados os resultados da taxa de erro de bits calculada utilizando o método do ruído gaussiano, para sistema ópticos submarinos de 20, 40 e 80 canais e considerando spans igualmente espaçados de 60 km, também serão comparados a utilização de redes óticas de 100 Gbps utilizando modulação DP-QPSK e taxas de 200 Gbps modulados em DP-16QAM.

Uma das medidas mais relevantes para avaliar a qualidade de um sistema de transmissão óptica é a taxa de erro de bit, a quantidade de bits recebidos que são diferentes dos que foram transmitidos. Muitos dos fabricantes de produtos de comunicações ópticas já informam a porcentagem de bits errados que podem ser corrigidos conforme o FEC utilizado em cada receptor. Em redes mais otimizadas em que os efeitos não lineares são mínimos ou em sistemas que utilizam FEC e métodos probabilísticos conseguem corrigir uma BER na ordem de 10^{-2} . No entanto para validação da aplicação do método matemático, considerou-se neste trabalho que a taxa de erro mínima na ordem de 10^{-3} .

Conforme os resultados mostrados na Figura 17, o comprimento do span tem grande influência no desempenho de um sistema óptico. Portanto neste trabalho de conclusão de curso, considerou-se um span intermediário igual a 60 km de comprimento, que não representa a melhor das OSNRs obtidas em 50 km, nem os menores valores de OSNR obtidas em 80 km. A Figura 18 mostra um gráfico da BER em função da potência por canal (dBm), de um sistema óptico submarino de 200 Gbps por canal, modulados em dupla polarização 16QAM contendo 20 canais em que os spans são iguais a 60 km.

Figura 18 - BER x Potência por canal (dBm): DP-16QAM, 20 Canais.



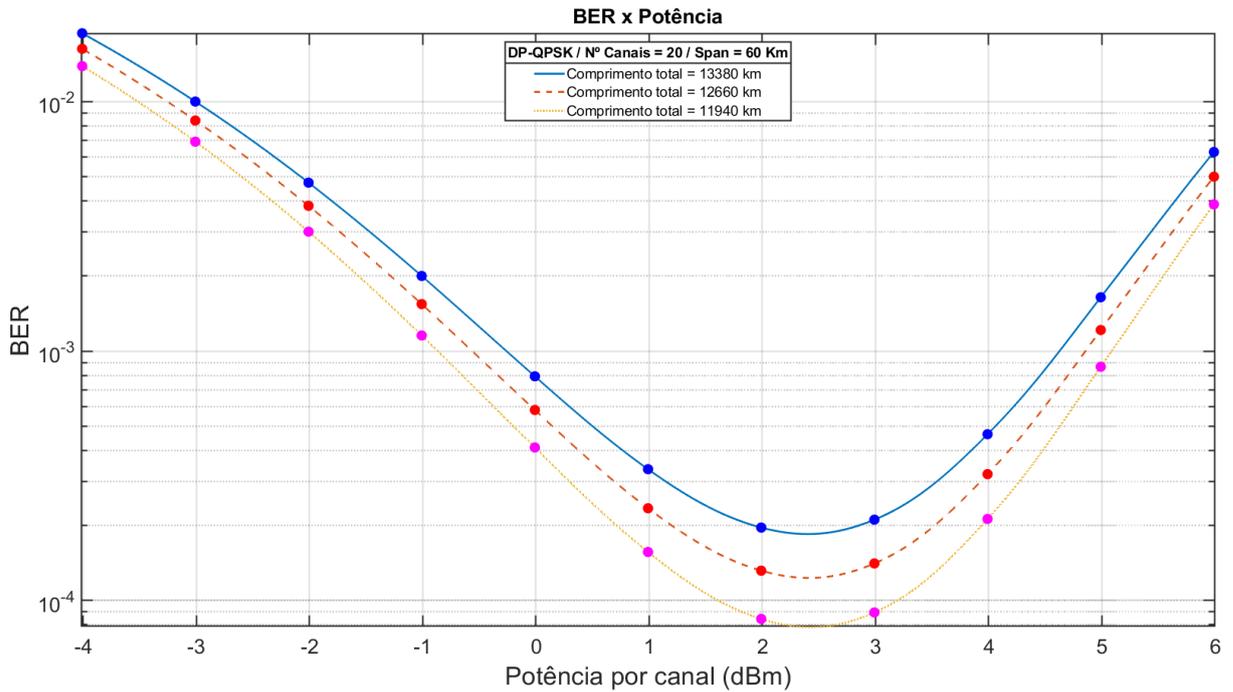
Fonte: O autor.

A Figura 18 mostra como a distância do sistema óptico afeta a taxa de erro de bit, sendo que quanto maior o comprimento da rede, mais erros são introduzidos. O cálculo da BER para sistemas ópticos coerentes utilizado para modulações 16QAM é representado pela equação (4.1), em que erfc é a função erro complementar de Gauss e SNR é a relação sinal ruído de recepção [45].

$$BER = \frac{3}{8} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{1}{10} SNR} \right). \quad (4.1)$$

A Figura 19 mostra um gráfico da BER em função da potência por canal (dBm), de um sistema óptico submarino de 100 Gbps por canal, modulados em dupla polarização QPSK contendo 20 canais em que os spans são iguais a 60 km.

Figura 19 - BER x Potência por canal (dBm): DP-QPSK, 20 Canais.



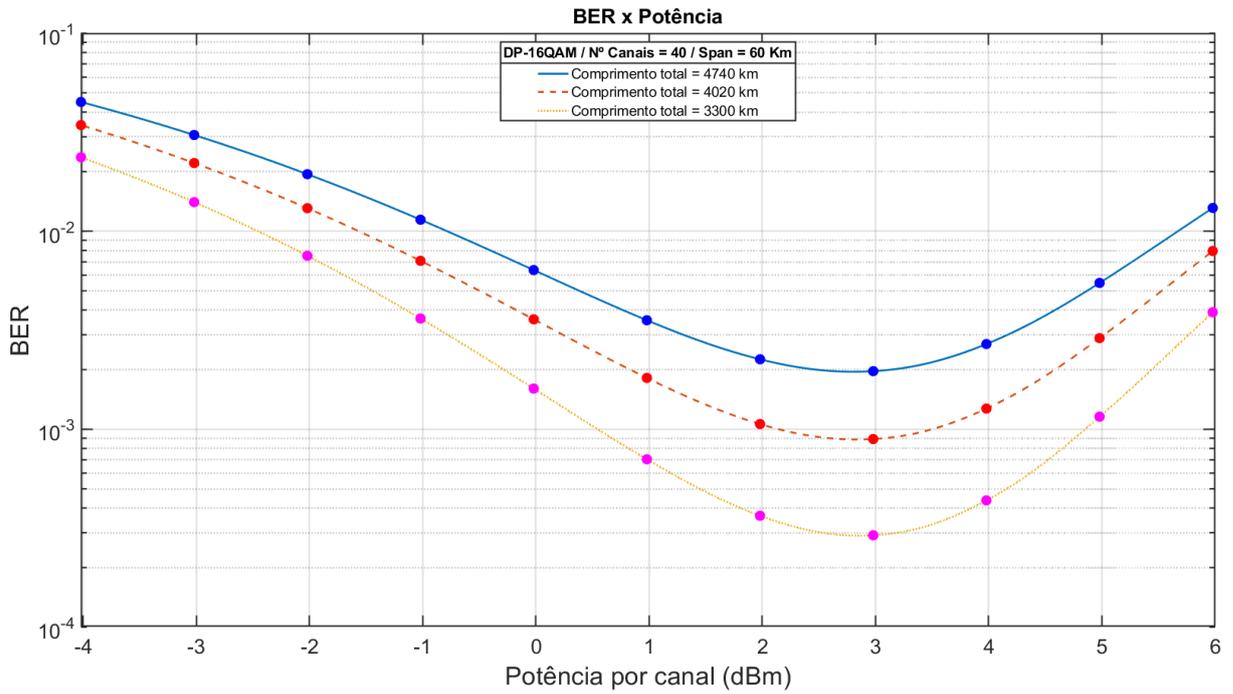
Fonte: O autor.

Comparando os resultados exibidos na Figura 18 com a Figura 19 é muito claro que a utilização de modulações mais avançadas como o 16QAM reduz drasticamente a distância total do sistema óptico, no entanto a utilização de tais modulações suporta maiores taxas de transmissão. O cálculo da BER para sistemas ópticos coerentes, utilizado para modulações QPSK é representado pela equação (4.2) [45].

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR}{2}} \right). \quad (4.2)$$

A Figura 20 a seguir mostra um gráfico da BER em função da potência por canal (dBm), de um sistema óptico submarino de 200 Gbps por canal, modulados em DP-16QAM contendo 40 canais em que os spans são iguais a 60 km.

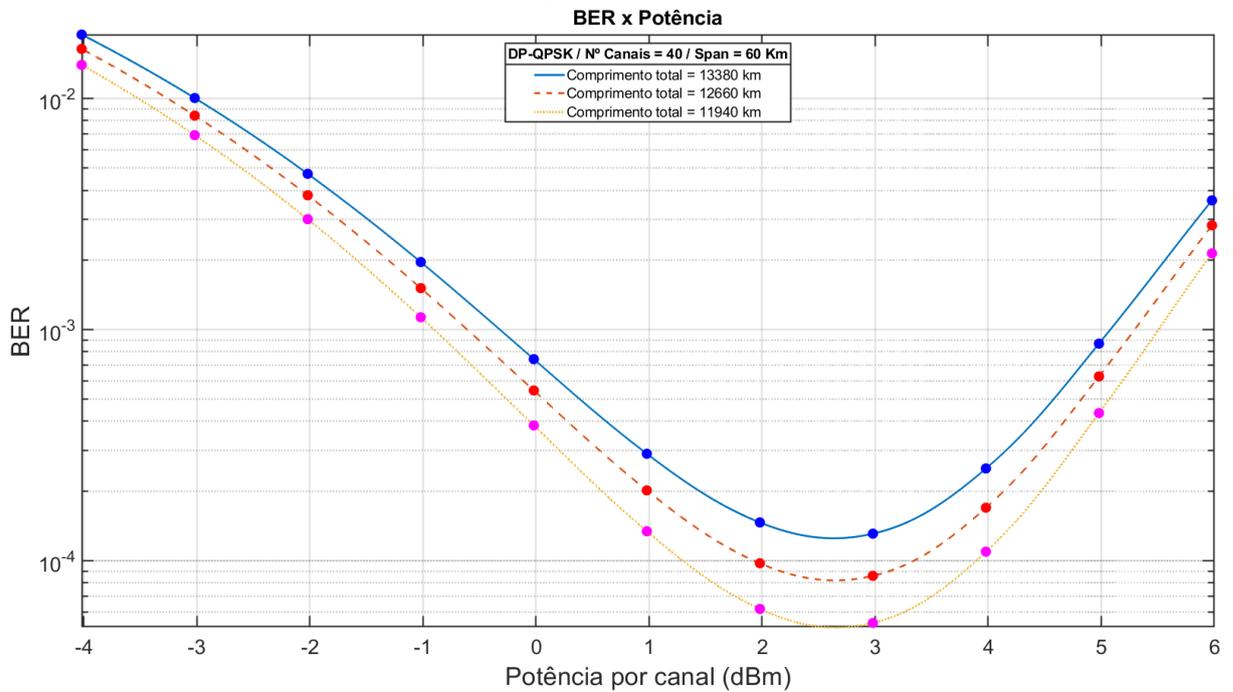
Figura 20 - BER x Potência por canal (dBm): DP-16QAM, 40 Canais.



Fonte: O autor.

A Figura 21 mostra um gráfico da BER em função da OSNR potência por canal (dBm), de um sistema óptico submarino de 100 Gbps por canal, modulados em DP-QPSK contendo 40 canais em que os spans são iguais a 60 km.

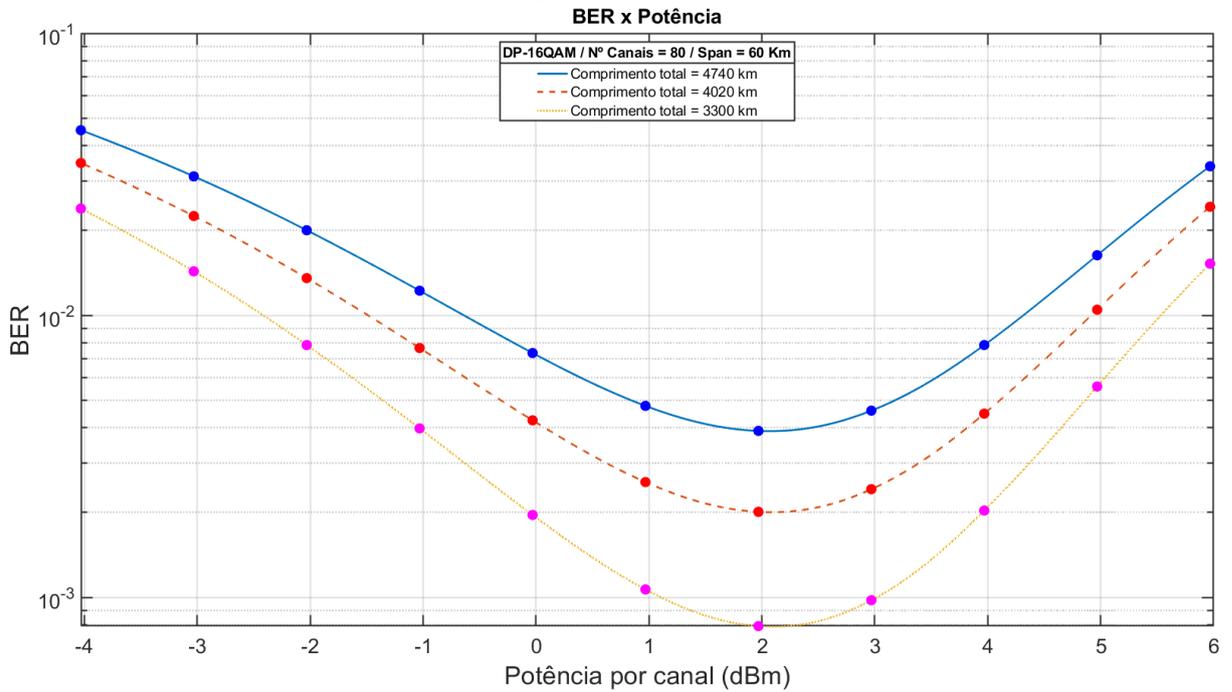
Figura 21 - BER x Potência por canal (dBm): DP-QPSK, 40 Canais.



Fonte: O autor.

A Figura 22 a seguir mostra um gráfico da BER em função da potência por canal (dBm), de um sistema óptico submarino de 200 Gbps por canal, modulados em dupla polarização 16QAM contendo 80 canais em que os spans são iguais a 60 km.

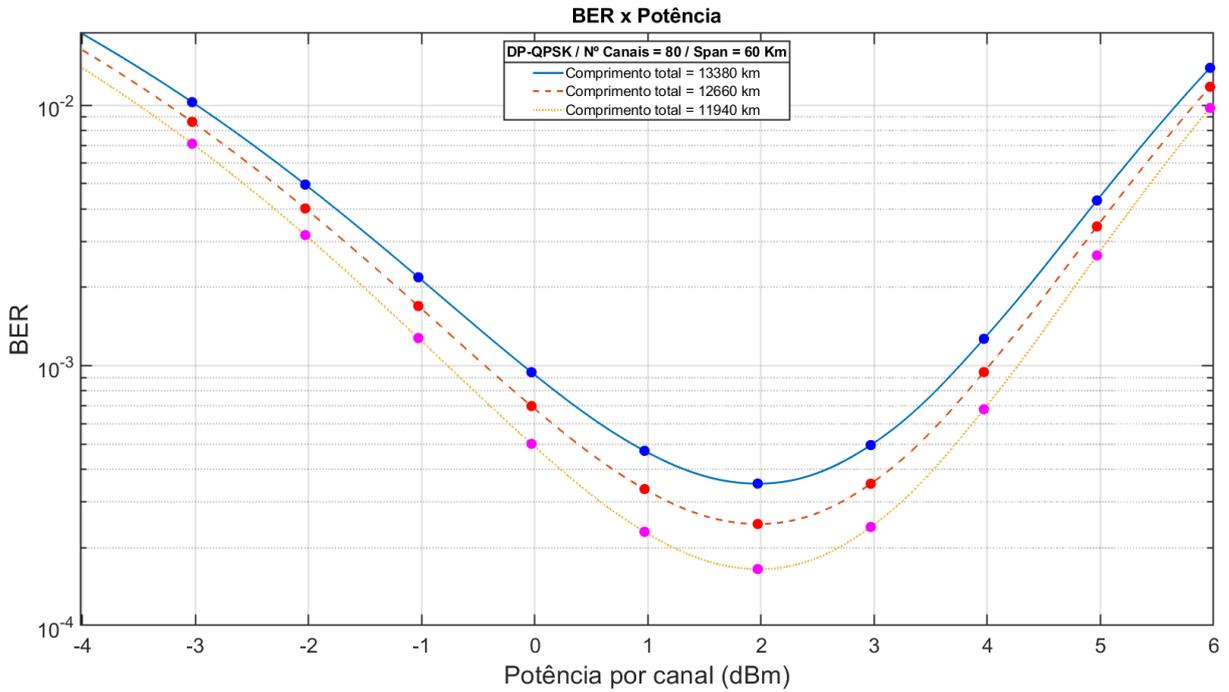
Figura 22 - BER x Potência por canal (dBm): DP-16QAM, 80 Canais.



Fonte: O autor.

A Figura 23 mostra um gráfico da BER em função da potência por canal (dBm), de um sistema óptico submarino de 100 Gbps por canal, modulados em dupla polarização QPSK contendo 80 canais em que os spans são iguais a 60 km.

Figura 23 - BER x Potência por canal (dBm): DP-QPSK, 80 Canais.



Fonte: O autor.

Comparando os resultados exibidos da BER em função da potência por canal para os sistemas ópticos submarinos modulados em DP-16QAM quando configurados em 20, 40 e 80 canais. Percebe-se que os resultados taxa de erro de bits são muito próximos para as redes ópticas de vinte e quarenta canais, no entanto quando aumentamos muito a quantidade de canais para oitenta. Dado os resultados a BER sofre um aumento, isso faz todo o sentido tendo em vista que a quantidade de informações trafegadas aumentam bastante e a largura de banda por canal é reduzida. Portanto os canais têm maior interação com seus vizinhos, tornando o sistema mais susceptível a terem erros de bits do que em redes em que os canais estão mais espaçados. Essa mesma conclusão pode ser observada ao comparar a BER para os links ópticos submarinos modulados em DP-QPSK. Uma grande diferença é esses sistemas transmitem a uma taxa de 100 Gbps, ocupam uma banda de transmissão menor que os enlaces de 200 Gbps DP-16QAM. Além do fato de que são necessários menos bits para formar um símbolo e estes símbolos estão mais espaçados, como foi descrito no capítulo 2. Devido a esses fatores a modulação em duas polarizações QPSK conseguem alcançar distâncias de transmissão mais longas do que a modulação em 16QAM.

4.4 Distância total do enlace.

Nesta seção serão apresentados os resultados da distância máxima alcançada pela rede óptica em função da potência por canal. Foram considerados sistemas ópticos submarinos de 20, 40 e 80 canais e spans igualmente espaçados de 60 km. Também serão comparados a utilização de redes óticas de 100 Gbps utilizando modulação DP-QPSK e taxas de 200 Gbps modulados em DP-16QAM. Além desses parâmetros serão apresentados os resultados levando em consideração a OSNR mínima de recepção e a OSNR planejada com uma margem de 3dB.

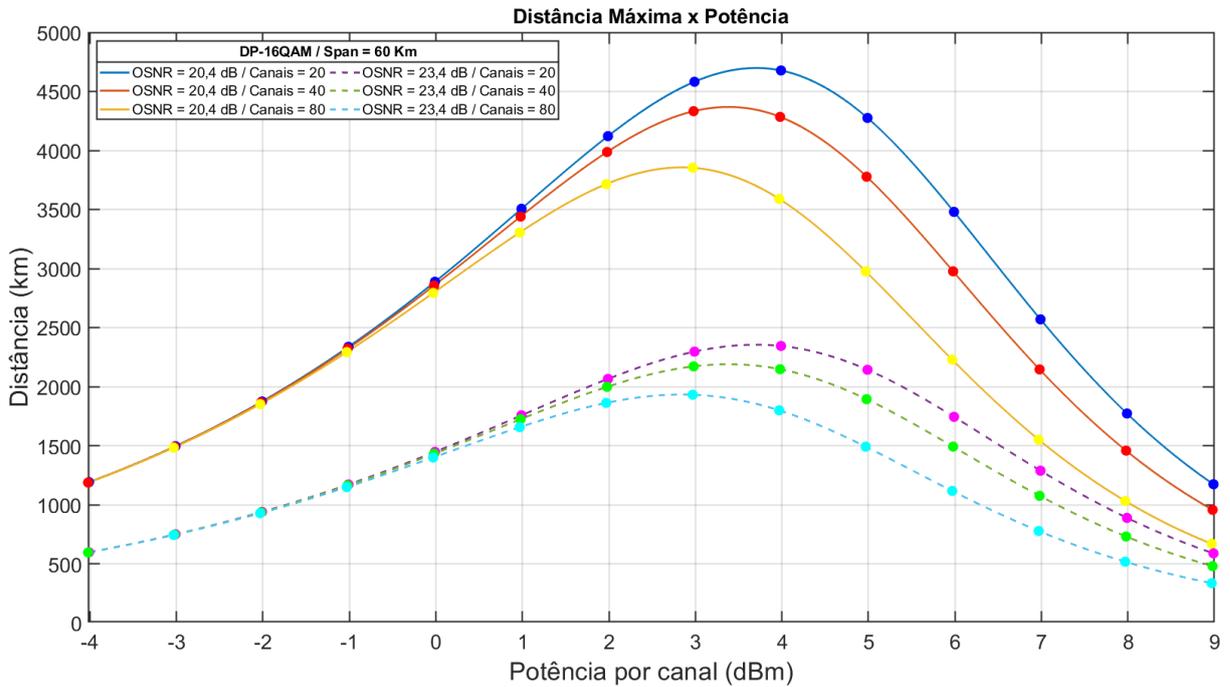
Durante a fase de planejamento de um sistema óptico seja *greenfield* ou *brownfield*, um dos fatores cruciais é verificar quais produtos e configurações da rede, atendem a distância do enlace. Essa é uma das principais aplicações das ferramentas de planejamento, em que o desempenho do link óptico é fundamental para validação do sistema. Nessa proposta a capacidade de prever o comprimento total da rede utilizando o método matemático do ruído gaussiano traz inúmeros benefícios devido ao fato que as equações para prever o desempenho óptico serem simplificadas e por apresentarem resultados próximos aos obtidos em softwares de simulação de redes.

Para calcular a distância máxima foram necessárias obter algumas informações dos sistemas óptico simulados. Primeiramente levou-se em consideração os valores da OSNR mínima aceita nos receptores para o cálculo do comprimento total do enlace. Esse resultado do valor da OSNR foi obtido em uma simulação no software OptiSystem® de um sistema back-to-back. Em que foram processadas diversas interações da rede com diversas combinações da OSNR de transmissão e do ganho dos amplificadores, como resultado dessa simulação analisou-se os valores da BER para cada iteração. Uma vez que esses dados foram analisados, adotou-se que a taxa de erro de bits máxima na ordem de 10^{-3} para esse sistema submarino, dessa forma a OSNR mínima utilizada foi a que apresentou uma BER nessa ordem de grandeza na simulação do B2B. O cálculo da distância máxima da rede óptica submarina é representada pela equação (4.3).

$$Distância\ Máxima = \left(\frac{G_{WDM}}{OSNR(G_{ASE} + G_{NLI})} \right) L_{SPAN}. \quad (4.3)$$

A Figura 24 mostra um gráfico da distância (m) em função da potência por canal (dBm), de um sistema óptico submarino de 200 Gbps por canal, modulados em dupla polarização 16QAM em que os spans são iguais a 60 km. neste gráfico contém os resultados para redes contendo 20, 40 e 80 canais.

Figura 24 – Distância (km) x Potência por canal (dBm): DP-16QAM, span de 60 km.

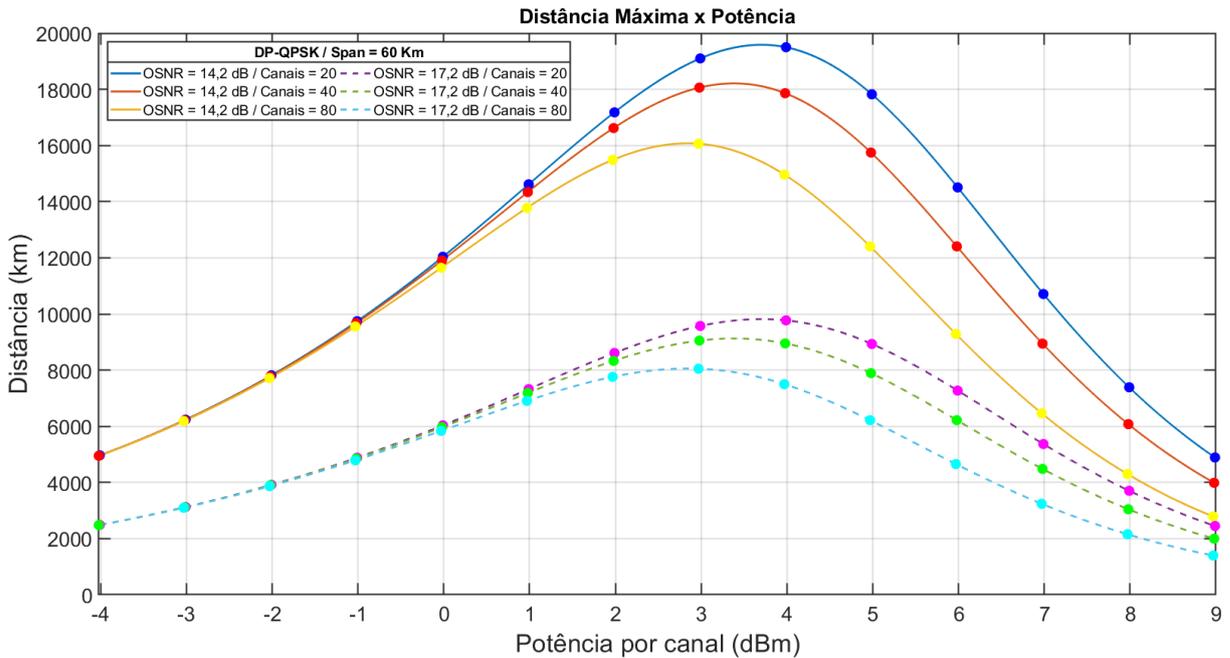


Fonte: O autor.

Algumas informações são importantes destacar quando se observa o gráfico da Figura 24, primeiramente é que o valor de OSNR de 20,4 dB foi estabelecido pela simulação do back-to-back em que neste valor de relação sinal ruído óptica foi obtido uma BER na ordem de 10^{-3} , Já o valor de OSNR de 23,4 dB é um valor de planejamento de rede em que se considerou uma margem de 3dB. Comumente uma margem é estabelecida antes de planejar um sistema óptico, levando em consideração a degradação do link com o tempo, possíveis emendas e perdas de conexões.

A Figura 25 mostra um gráfico da distância (m) em função da potência por canal (dBm), de um sistema óptico submarino de 100 Gbps por canal, modulados em dupla polarização QPSK em que os spans são iguais a 60 km. Neste gráfico contém os resultados para redes contendo 20, 40 e 80 canais.

Figura 25 - Distância (km) x Potência por canal (dBm): DP-QPSK, span de 60 km.



Fonte: O autor.

São importantes destacar quando se observa o gráfico da Figura 25, primeiramente é que o valor de OSNR de 14,2 dB foi estabelecido pela simulação do B2B em que neste valor de relação sinal ruído óptica foi obtido uma BER na ordem de 10^{-3} , Já o valor de OSNR de 17,2 dB é um valor de planejamento de rede em que considerou-se uma margem de 3dB.

Algumas conclusões podem ser retiradas ao analisar e comparar os resultados exibidos nos gráficos das Figura 24 e Figura 25. Primeiramente observa-se que a OSNR tem uma influência muito grande na distância total de sistema óptico. Essa informação faz todo o sentido, tendo em vista que para aumentar o comprimento de um link óptico, mais estações de amplificadores serão necessárias instalar. Uma vez que um dos principais elementos que impactam negativamente na OSNR são a introdução de ruído dos amplificadores da rede, como apresentado anteriormente, quanto maior a comprimento da rede mais amplificadores são necessários, ou seja, maior a inserção de ruídos a rede. Portanto sistemas ópticos que suportam menores OSNR na recepção, consequentemente podem ser amplificados mais vezes sem regeneração do sinal, dessa forma maior é a distância alcançadas nessas redes.

Também é importante observar que o aumento de canais reduz o comprimento máximo de um sistema óptico submarino. Isso ocorre devido ao fato que o aumento de canais implica que os mesmos estão mais próximos no espectro óptico, ou seja, há uma maior interferência entre os canais. Além desse fato para manter a mesma potência por canal é necessário aumentar

o ganho dos amplificadores, dessa forma os canais estão mais susceptíveis a efeitos não lineares como auto modulação de fase. A combinação desses fatores são os principais motivos para que quanto maior a quantidade de canais, menor é a distância total que um sistema óptico submarino pode ser configurado.

Comparando os resultados das Figura 24 e Figura 25, observa-se que sistemas de transmissão que utilizam uma taxa de 100 Gbps por canal e modulação DP-QPSK, conseguem alcançar distâncias mais longas que as rede de 200 Gbps por canal e modulação DP-16QAM. Esse fato é devido a alguns fatores, sendo eles, que transmissores de 100 Gbps ocupam uma menor banda no espectro óptico, são necessários menos bits para formar um símbolo e estes símbolos estão mais espaçados do que os transmissores de 200 Gbps, como descrito no capítulo 2. Devido a esses fatores os sistemas QPSK suportam uma menor OSNR de recepção e podem alcançar redes ópticas mais distantes.

Capítulo 5

Conclusão e Estudos Futuros

Neste capítulo serão apresentados a conclusão deste trabalho de conclusão de curso, com base nos estudos dos resultados obtidos na aplicação do método do ruído gaussiano e nas simulações realizadas no software OptiSystem®, assim como as sugestões para continuidade deste trabalho e estudos futuros.

5.1 Conclusões

Mediante aos estudos e resultados obtidos no decorrer deste trabalho de conclusão de curso, foi possível verificar e entender as aplicações do método do ruído gaussiano na predição do desempenho de sistemas ópticos submarinos. A princípio, foram realizados estudos sobre as características, equações e as condições que podem ser aplicados o modelo GN. Em seguida, foram apresentadas algumas configurações de redes ópticas de longas distâncias e as características dos componentes que integram nesse sistema, o transmissor, o receptor, a fibra óptica e os amplificadores. Em um terceiro momento, construiu-se esses links no software de simulações ópticas OptiSystem® para verificar os resultados de desempenho da rede proposta. Por fim, aplicou-se as equações teóricas do método do ruído gaussiano, os resultados desses cálculos foram comparados com as simulações realizadas no OptiSystem®, com a finalidade de validar a implementação de tal método na predição de sistemas ópticos submarinos.

Com o intuito de determinar qual fibra óptica apresentaria melhor desempenho para os *backbones* das redes submarinas, foram analisados valores da OSNR de recepção em função da potência por canal, para a fibra óptica padrão de 80 μm^2 e para fibras de terceira geração de 150 μm^2 , em que foram aplicadas as equações do método GN. Com a aplicação desse modelo é possível estimar o efeito linear da dispersão cromática e os efeitos não lineares da auto modulação de fase e da modulação cruzada de fase, por meio de um ruído gaussiano. Diante dos resultados encontrados ao comparar os valores de OSNR entre os diferentes modelos de fibra óptica, constatou-se que a fibra de 150 μm^2 apresenta melhor desempenho em sistemas DWDM de longa distância. Esses cabos por terem uma maior área efetiva, suportam potências mais altas e são menos susceptíveis a efeitos não lineares como SPM e XPM.

Como prova de conceito, comparou-se os valores de OSNR e da penalidade introduzida pela rede óptica calculada pelo método GN, com a mesma arquitetura configurada no software OptiSystem®, que é uma ferramenta bem consolidada no mercado. Observou-se ao comparar tais resultados que o modelo matemático possui uma boa aproximação com a simulação, sendo a diferença inferior a $\pm 0,5$ dB. Outro fator determinante é que as equações implementadas são simplificadas, quando comparadas as equações densidade espectral dos efeitos não-lineares, esse fator diminui o processamento das equações para verificar o desempenho de redes ópticas.

Diante de todos os resultados obtidos neste trabalho de conclusão de curso, foi possível validar a aplicação do método do ruído gaussiano na predição do desempenho de sistemas ópticos submarinos. Tal modelo matemático apresentou resultados satisfatórios sendo possível aproximar aos valores da OSNR de recepção desses sistemas. É importante destacar que a validação do método GN se aplica para modulações coerentes, além disso, foram analisados os casos em que os spans ao longo da rede são igualmente espaçados, para as modulações DP-16QAM com taxa de 200 Gbps por canal e DP-QPSK com taxa de 100 Gbps por canal.

Portanto verificou-se que a implementação do modelo matemático do ruído gaussiano, apresenta resultados próximos e satisfatórios, na validação do desempenho de sistemas ópticos submarinos, tendo como principais aplicações no planejamento de redes ópticas *greenfield* e *brownfield* e no estudo de otimização de links já existentes.

5.2 Estudos Futuros

Tendo em vista que a utilização do método do ruído gaussiano apresentado neste trabalho de conclusão de curso, mostrou resultados satisfatórios na predição do desempenho obtido, alguns estudos podem ser desenvolvidos na utilização de tal modelo matemático, a fim de expandir as aplicações dos cálculos para suportar novas configurações de redes ópticas. Sugere-se como continuação deste trabalho os estudos do modelo GN para inclusão dos amplificadores raman e para abranger spans de comprimentos variados.

Outro segmento que pode ser avaliado e incluído nessas equações é o estudo de redes OFDM de Nyquist, este método de multiplexação por divisão de frequências ortogonais, proporciona uma maior eficiência espectral, tendo em vista que as bandas de cada canal são sobrepostas no espectro óptico.

Referências

- [1] M. D. Hauser, *The Evolution of Communication*, 2000.
- [2] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Second Edition ed., 1996.
- [3] R. Ramaswami, K. N. Sivarajen e G. H. Sasaki, *Optical Networks, A Practical Perspective*, Third Edition ed., 2010.
- [4] T. Nguyen, A. Islam, M. T. Hossan e Y. M. Jang, “Current Status and Performance Analysis of Optical Camera Communication Technologies for 5G Networks,” *IEEE Access*, 2017.
- [5] S. Mohanty e S. K. Routray, “CE-Driven Trends in Global Communications, Strategic sectors for economic growth and development,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2017.
- [6] *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022*, 2019.
- [7] S. K. Routray, M. K. Jha, L. Sharma, S. Sarkar, A. Javali e R. Tengshe, “Energy Consumption Aspects of 5G Waveforms,” 2018.
- [8] J. Sachs, L. A. A. Andersson, J. Araújo, C. Curescu, J. Lundsjö, G. Rune, E. Steinbach e G. Wikström, “Adaptive 5G Low-Latency Communication for Tactile Internet Services,” *Invited*, 2019.
- [9] “mobility-report,” Ericsson, [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/mobility-visualizer?f=1&ft=2&r=2,3,4,5,6,7,8,9&t=1&s=1,2,3&u=1&y=2018,2026&c=1>. [Acesso em 2020].
- [10] R. C. Favoreto, *Uma Proposta de Solução para Levantamento do Inventário dos Elementos de Rede em Redes Ópticas de Transporte*, Vitória, 2014.

- [11] P. Poggiolini, “The GN Model of Non-Linear Propagation in Uncompensated Coherent Optical Systems,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2012.
- [12] P. Poggiolini, G. Bosco, A. Carena, V. Curri, Y. Jiang e F. Forghieri, “The GN-Model of Fiber Non-Linear Propagation and its Applications,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHN*, 2014.
- [13] K. C. KaoKao e G. Hockham, *Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies*, IEEE, 1966.
- [14] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka e T. Miyashita, *Ultimate low loss single-mode fiber at 1,55 μ m*, *Electronic Letters*, 1979.
- [15] I.-T. R. G.652, *Characteristics of a single-mode optical fibre cable*, 2000.
- [16] Y. Tamura, H. Sakuma, K. Morita, M. Suzuki, Y. Yamamoto, K. Shimada, Y. Honma, K. Sohma, T. Fujii e T. Hasegawa, “The First 0.14-dB/km Loss Optical Fiber and its Impact on Submarine Transmission,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2018.
- [17] E. P. Silva, L. H. H. Carvalho, R. Silva, J. P. K. Perin, P. P. G. Cardoso e J. C. R. F. Oliveira, “Experimental Optical Generation of DP 16QAM Modulation Format for High Spectral Efficiency Optical Transmission,” *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2013.
- [18] J. D. Downie, M.-J. Li e S. Makovejs, “Optical Fibers for Flexible Networks and Systems [Invited],” *Journal Optical Society of America*, 2016.
- [19] O. D. Domingues, D. A. A. Mello, R. Silva, S. Ö. Arik e J. M. Kahn, “Achievable Rates of Space-Division Multiplexed Submarine Links Subject to Nonlinearities and Power Feed Constraints,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2017.
- [20] “Cisco Annual Internet Report (2018–2023),” *Cisco public*, 2020.
- [21] M. Agiwal, A. Roy e N. Saxena, “Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey,” *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, 2016.
- [22] “Internet of Things,” *Cisco*, 2016.

- [23] C. Ranaweera, A. Nirmalathas, E. Wong, C. Lim, P. Monti, M. Furdek, L. Wosinska, B. Skubic e C. Mas Machuca, “Rethinking of Optical Transport Network Design for 5G/6G Mobile Communication,” *IEEE Future Networks*, 2021.
- [24] G. Fettweis, H. Boche, T. Wiegand, E. Zielinski, H. Schotten, P. Merz, S. Hirche, A. Festag, W. Häffner, M. Meyer, E. Steinbach, R. Kraemer, R. Steinmetz, F. Hofmann, P. Eisert, R. Scholl, F. Ellinger, E. Weiß e I. Riedel, “The Tactile Internet,” *ITU-T Technology Watch Report*, 2014.
- [25] J. Chesnoy, *Undersea Fiber Communication Systems*, 2002.
- [26] G. W. Tully, R. B. Thomas, M. A. Spalding e D. J. Buffitt, “Integration of Ocean Observing Systems within Submarine Telecom Networks,” 2011.
- [27] J. M. Senior, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*.
- [28] M. Seimetz, “High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission”.
- [29] P. Morkel e S. Tibuleac, “Coherent modulation in next-generation optical networks,” *LigthWave*, 2018. [Online]. Available: <https://www.lightwaveonline.com/network-design/high-speed-networks/article/16676197/coherent-modulation-in-nextgeneration-optical-networks>. [Acesso em 20 04 2021].
- [30] “OptiSystem: Optical Communication System and Amplifier Design Suite - New Features 12,” Optiwave, 2013.
- [31] “OptiSystem: Optical Communication System and Amplifier Design Suite - New Features 12.2,” Optiwave, 2014.
- [32] K. Kikuchi, “Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2016.
- [33] O. D. Domingues, D. A. A. Mello, R. Silva, S. Ö. Arik e J. M. Kahn, “Achievable Rates of Space-Division Multiplexed Submarine Links Subject to Nonlinearities and Power Feed Constraints,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2017.
- [34] “Submarine cable map,” *TeleGeography*, [Online]. Available: https://www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions?__hstc=196094579.1852b6f62ae5461a699aa7e80e055c6a.1620827506168.1

626126220956.1626139254572.81&__hssc=196094579.1.1626139254572&__hsfp=3839890209. [Acesso em 01 05 2021].

- [35] *ITU-T G.971: General features of optical fibre submarine cable systems*, 2020.
- [36] *Sumitomo Submarine Optical Fibers: Field-proven over 3 decades*, 2018.
- [37] M. Birk, P. Gerard, R. Curto, L. E. Nelson, X. Zhou, P. Magill, T. J. Schmidt, C. Malouin, B. Zhang, E. Ibragimov, S. Khatana, M. Glavanovic, R. Lofland, R. Marcoccia, R. Saunders, G. Nicholl, M. Nowell e F. Forghieri, “Real-Time Single-Carrier Coherent 100 Gb/s PM-QPSK Field Trial,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2011.
- [38] E. Pincemin, J. Karaki, Y. Loussouarn, H. Poignant, C. Betoule, G. Thouenon e R. L. Bidan, “Challenges of 40/100 Gbps and higher-rate deployments over long-haul transport networks,” *Optical Fiber Technology*, 2011.
- [39] J. Cho e P. J. Winzer, “Probabilistic Constellation Shaping for Optical Fiber Communications,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2019.
- [40] J. Cho, X. Chen, S. Chandrasekhar, G. Raybon, R. Dar, L. Schmalen, E. Burrows, A. Adamiecki, S. Corteselli, Y. Pan, D. Correa, B. McKay, S. Zsigmond, P. Winzer e S. Grubb, “Trans-Atlantic Field Trial Using Probabilistically Shaped 64-QAM at High Spectral Efficiencies and Single-Carrier Real- Time 250-Gb/s 16-QAM,” *Optical Society of America*, 2017.
- [41] L. C. Kimerling, D. Ahn, A. B. Apsel, M. Beals, D. Carothers, Y.-K. Chen, T. Conway, D. M. Gill, M. Grove, C.-Y. Hong, M. Lipson, J. Liu, J. Michel, D. Pan, S. S. Patel, A. T. Pomerene, M. Rasras, D. K. Sparacin, K.-Y. Tu, A. E. White e C. W. Wong, “Electronic-photonic integrated circuits on the CMOS platform,” *Silicon Photonics*, 2006.
- [42] V. Parahyba, J. Reis, S. Ranzini, E. Schneider, E. Rosa, F. Simões, J. Diniz, L. Carvalho, E. Filho, J. Oliveira e J. Oliveira, “Performance against implementation of digital backpropagation for high-speed coherent optical systems,” *ELECTRONICS LETTERS*, 2015.

- [43] J. Tang, "The Channel Capacity of a Multispan DWDM System Employing Dispersive Nonlinear Optical Fibers and an Ideal Coherent Optical Receiver," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2002.
- [44] A. Mecozzi, C. B. Clausen e M. Shtaiif, "Analysis of Intrachannel Nonlinear Effects in Highly Dispersed Optical Pulse Transmission," *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, 2000.
- [45] A. Carena, V. Curri, G. Bosco, P. Poggiolini e F. Forghieri, "Modeling of the Impact of Nonlinear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 15 may 2012.